UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO – CHILE

IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS DEL COMPORTAMIENTO DE TUBERÍAS ENTERRADAS SOMETIDAS A DEFORMACIONES PERMANENTE DEL TERRENO DEBIDO A SOLICITACIONES SISMICAS EN CHILE

RAÚL EMANUEL GERTNER MUÑOZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PREOFESOR GUIA: MAURICIO CORREA CÁCERES

PROFESOR CORREFERENTE: DR. GONZALO SUAZO FUENTEALBA

I. Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios, que es el que me dio la existencia y gracias a su protección he cumplido mis metas.

Agradecer a la Universidad Federico Santa María por la formación que me entregó, los buenos momentos vividos y los amigos que en ella hice.

Agradecer a mi profesor Mauricio Correa Cáceres por guiar la confección de este trabajo, por siempre estar dispuesto a colaborar y ayudar en todo lo solicitado. Así también, a los profesores Gonzalo Suazo Fuentealba y Joaquín Meza por su aporte en la culminación de esta memoria.

Agradecer a mis padres, Fredy Gertner Alvarez y Ester Muñoz Pineda, quienes siempre han estado conmigo y gracias a su constante apoyo me he convertido en todo lo que soy ahora. A mis hermanos, Jocabed Gertner Muñoz y Fredy Gertner Muñoz, por nuestra unidad y el cariño que siempre nos hemos entregado.

Finalmente, agradecer a la persona que me ha acompañado en gran parte de mi carrera universitaria y quien ha sido un apoyo incondicional desde el día que la conocí, quien siempre ha estado a mi lado siendo un apoyo fundamental en todas las metas que he logrado, una compañera, amiga y el amor de mi vida, Vania Barrera Hidalgo, gracias por todo.

II. Resumen

La gran cantidad de terremotos ocurridos en Chile ha permitido diseñar una infraestructura que responde de buena manera ante estos eventos. Sin embargo, en los últimos episodios se ha evidenciado inconvenientes en el sistema sanitario principalmente debido al colapso de redes de conducción de agua potable. Con el propósito de comenzar hacer frente a esta problemática, se implementó un modelo desarrollado por el profesor M.J. O'Rourke, junto con otros colaboradores, que permite predecir el comportamiento de tuberías enterradas durante un sismo y se aplicó a la realidad nacional.

El modelo implementado solicita como datos de entradas parámetros referentes a la tubería y suelo donde está enterrada como: diámetro, espesor, módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, cohesión, ángulo de fricción, densidad, etc. Además, se deben ingresar valores relacionados con la magnitud del sismo como: largo y ancho de la zona de ruptura, desplazamiento del terreno y dirección en la que afecta a la tubería (transversal o longitudinal a su eje). Con estos parámetros se determina la deformación en la tubería verificando si alcanzó el rango de fluencia o si sufrió pandeo.

El modelo se utilizó para determinar la deformación de tuberías variando su tamaño, material, el tipo de suelo donde está enterrada y la magnitud del sismo que la afecta. Los resultados obtenidos se presentan en forma gráfica en los anexos de este documento.

El estudio permitió concluir que la mejor forma de disminuir las deformaciones en tuberías es aumentando su espesor y/o su diámetro (menos eficiente). Por otro lado, el material que mejor comportamiento tiene frente a desplazamientos transversales al eje de la tubería es el HDPE de PE200 seguido por el Acero y Hierro Dúctil. En cuanto a desplazamientos longitudinales, destaca el Hierro Dúcil y Acero seguido por HDPE de PE200, PE100 y PE80. El PVC resultó ser un material de mal comportamiento debido a su rápido colapso ante un desplazamiento del terreno.

La experiencia actual muestra que en los diseños de ingeniería sanitaria no es rutinario analizar de forma explícita las instalaciones ante solicitaciones sísmicas, siendo un vacío que este trabajo tiene por objeto comenzar a enfrentar.

III. Abstract

The large number of earthquakes in Chile has allowed the design of an infrastructure that responds well to these events. However, in the last few episodes there have been signs of inconvenience in the health system due mainly to the collapse of drinking water conduction networks. In order to begin addressing this problem, a model developed by Professor M.J. O'Rourke, along with other collaborators, that allows to predict the behavior of pipes buried during an earthquake and applied to the national reality.

The implemented model requests as input data parameters related to the pipe and soil where it is buried as: diameter, thickness, modulus of elasticity, yield stress, cohesion, angle of friction, density, etc. In addition, values related to the magnitude of the earthquake must be entered as: length and width of the zone of rupture, displacement of the ground and direction in which it affects the pipe (transverse or longitudinal to its axis). With these parameters the deformation in the pipe is determined verifying if it reached the range of yield or if it suffered buckling.

The model was used to determine the deformation of pipes varying their size, material, the type of soil where it is buried and the magnitude of the earthquake that affects it. The results obtained are presented graphically in the appendixes of this document.

From the research that has been carried out, it is possible to conclude that the best way to reduce strain in pipes is to increase their thickness or increase their diameter (less practice). On the other hand, the material that best behaves against displacements transverse to the axis of the pipe is HDPE of PE200, followed for Steel and Ductile Iron. In terms of longitudinal displacements, the best material is ductile iron and Steel followed for HDPE of PE200, PE100 and PE80. The PVC proved to be an easy material to fail before a ground's displacement, independent of the direction.

Current experience shows that in engineering sanitary designs it is not a routine to analyze explicitly the installations before seismic stresses, being an emptiness that this paper aims to deal with.

IV. Glosario

A	Área transversal de la tubería.
C	Clase Hidráulica de la tubería.
c	Cohesión del terreno de fundación de la tubería.
D	Diámetro exterior de la tubería.
DPS	Deformación Permanente del Suelo o "Permanet Ground Deformation (PGD)".
E	Módulo de elasticidad.
e	Espesor de la tubería.
fy	Esfuerzo de fluencia de la tubería.
H	Distancia a la clave de la tubería.
I	Inercia de la tubería.
k	Factor de reducción de acuerdo con el revestimiento de la tubería.
K_c	Factor de capacidad de carga para el suelo no drenado.
k_o	Coeficiente de presión lateral en reposo.
L	Largo de la falla longitudinal.
L_a	Distancia desde los límites del ancho de falla a los puntos de anclaje de la tubería.
L_{em}	Longitud de empotramiento definida por O'Rourke para un DPS longitudinal.
N_{ch}	Factor de capacidad de soporte para suelos cohesivos.
N_{qh}	Factor de capacidad de soporte para suelos granulares.
$(N_1)_{60}$	Valor del SPT corregido.
n y r	Parámetros de Ramberg y Osgood, dependen de la resistencia del Acero.
p_u	Resistencia transversal del suelo.
PN	Presión nominal de la tubería de HDPE.
PE	Tensión de diseño de la tubería de HDPE.
R_f	Factor de reducción para suelos licuables.
R	Radio de la tubería.
T	Fuerza de tensión producida en la tubería.
t	Espesor de la tubería.
t_u	Resistencia longitudinal del suelo.
W	Ancho de falla de un DPS transversal.
α	Coeficiente de adhesión empírico que varía con "c".
γ	Peso específico del suelo.
δ	Desplazamiento del terreno en un DPS.
δcr	Máximo desplazamiento del terreno en un DPS transversal.
ε	Deformación de la tubería.
ε_y	Deformación de fluencia de la tubería.
σ	Esfuerzo en la tubería.
σ_y	Esfuerzo de fluencia en la tubería.
ϕ	Angulo de fricción del suelo.

V. Índice de contenidos

I. AGRADECIMIENTOS II

II. RESUMEN III

III. ABSTRACT IV

IV. GLOSARIO V

V. ÍNDICE DE CONTENIDOS VI

VI. ÍNDICE DE FIGURAS VIII

VII. ÍNDICE DE TABLAS IX

1. INTRODUCCIÓN 1

2. OBJETIVOS 2

2.1. OBJETIVOS GENERALES 2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

3. MOTIVACIÓN A NIVEL PAÍS PARA LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO 3

3.1. DESASTRE SANITARIO POSTERIOR AL TERREMOTO DEL 27F EN CONCEPCIÓN 3

4. MECANISMOS DE FALLA PRODUCIDOS DURANTE UN SISMO 7

4.1. TIPOS DE MECANISMO 7
4.1.1. Propagación de ondas 7
4.1.2. Deformación Permanente del Suelo 7
4.1.3. Ruptura por fallas activas 8
4.2. ANÁLISIS DE MECANISMOS 9

5. TUBERÍAS ENTERRADAS SOMETIDAS A DEFORMACIÓN PERMANENTE DEL SUELO. 11

5.1. TUBERÍAS CONTINUAS 11
5.1.1. DPS transversal en tuberías continuas 11
5.1.2. DPS longitudinal en tuberías continuas 23
5.2. TUBERÍAS SEGMENTADAS 26
5.2.1. DPS longitudinal en tuberías segmentadas 26
5.2.2. DPS transversal en tuberías segmentadas 27

6. TIPOS DE SUELOS 29

6.1. TIPOS DE SUELOS A MODELAR 29
6.2. MODELACIÓN 30
6.2.1. Movimiento longitudinal 31
6.2.2. Movimiento transversal 33
6.3. SUELOS LICUABLES 35

7. CRITERIOS DE FALLA DE TUBERÍA 37

7.1. TUBERÍAS CONTINUAS 37
7.1.1. Falla por tensión 37
7.1.2. Pandeo local 39

7.2. TUBERÍAS SEGMENTADAS 40

8. MATERIALES DE TUBERÍAS UTILIZADOS EN REDES DE CONDUCCIÓN 41

8.1. TUBERÍAS DE ACERO 41

8.1.1. Junta soldada 42

8.2. TUBERÍAS DE HDPE 42

8.2.1. Juntas Fijas 43

8.3. TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL 44

8.3.1. Junta elástica (JGS) 44

8.3.2. Junta Acerrojada Externa (JTE) 46

8.3.3. Junta Pamlock (JPK) 47

8.4. TUBERÍAS DE PVC 48

8.4.1. Unión Anger o Anillo de Goma 49

9. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE LA DEFORMACIÓN EN TUBERÍAS DEBIDO A DESPLAZAMIENTOS DEL SUELO TRANSVERSALES Y/O LONGITUDINALES A SU EJE. 51

9.1. DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL MODELO IMPLEMENTADO 51

9.2. PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN 58

9.2.1. Gráficos de desplazamientos transversales al eje de la tubería 59

9.2.2. Gráficos de desplazamientos longitudinales al eje de la tubería 61

9.2.3. Ejemplo de lectura de los gráficos 62

9.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN 66

9.3.1. Comparación entre variables para un mismo material 67

9.3.2. Comparación entre tuberías de distintos materiales 76

10. RECOMENDACIONES DE DISEÑO 86

11. CONCLUSIONES 89

12. REFERENCIAS 91

13. ANEXOS 93

A. EXPRESIÓN ANALÍTICA PARA UNA VIGA RÍGIDA. 93

B. EXPRESIÓN ANALÍTICA PARA UN CABLE FLEXIBLE. 97

C. CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN AXIAL. 99

D. SOLUCIÓN ECUACIÓN DE CUARTO GRADO 100

E. CALCULO DE DEFORMACIÓN UNITARIA MÁXIMA EN UNA TUBERÍA ELÁSTICA 101

F. EXTENSIÓN Y ROTACIÓN DEBIDO A DPS TRANSVERSAL 102

G. CATÁLOGO DE TUBEXA PARA TUBERÍAS DE ACERO 104

H. CATÁLOGO DE KRAH PARA TUBERÍAS DE HDPE 106

I. CATÁLOGO DE SAINT-GOBAIN PARA TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL 109

J. CATÁLOGO DE VINILIT PARA TUBERÍAS DE PVC 110

K. GRÁFICOS DE DEFORMACIÓN DE LA TUBERÍA POR DESPLAZAMIENTOS DEL TERRENO PERPENDICULARES A SU EJE. 111

k.1. Tuberías de Acero 111

k.2. Tuberías de HDPE 147

k.3. Tuberías de Hierro Dúctil 198

k.4. Tuberías de PVC 204

L. GRÁFICOS DE DEFORMACIÓN DE LA TUBERÍA POR DESPLAZAMIENTOS DEL TERRENO LONGITUDINAL A SU EJE 216

L.1. Tuberías de Acero *216*
L.2. Tuberías de HDPE *236*
L.3. Tuberías de Hierro Dúctil *296*
L.4. Tuberías de PVC *301*
M. SEPARACIÓN DE UNIÓN DEBIDO A DPS TRANSVERSAL 306
M.1. Tuberías de Hierro Dúctil *306*
N. SEPARACIÓN DE UNIÓN DEBIDO A DPS LONGITUDINAL 309
N.1. Tuberías de Hierro Dúctil *309*
N.2. Tuberías de PVC *310*

VI. Índice de Figuras

FIGURA 3-1: FALLA EN LAS REDES DE ABASTECIMIENTO EN LA OCTAVA REGIÓN DE CHILE. 4
FIGURA 3-2: REPOSICIÓN DE LÍNEAS DE ABASTECIMIENTO. 5
FIGURA 3-3: REPOSICIÓN DE REDES SECUNDARÍAS DE CONCEPCIÓN. 5
FIGURA 4-1: TIPOS DE FALLAS ACTIVAS. 9
FIGURA 4-2: PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN DPS. 10
FIGURA 5-1: MODELACIÓN DE LA TUBERÍA UTILIZADA POR LIU Y O'ROURKE. 12
FIGURA 5-2: MÁXIMA DEFORMACIÓN DE LA TUBERÍA VERSUS DESPLAZAMIENTO DEL SUELO (δ). 13
FIGURA 5-3: MÁXIMO DESPLAZAMIENTO DE LA TUBERÍA VERSUS DESPLAZAMIENTO DEL SUELO (δ). 14
FIGURA 5-4: DEFORMACIÓN DE LA TUBERÍA Y EL SUELO PARA W= 30 M. 15
FIGURA 5-5: DISTRIBUCIÓN DE MOMENTO FLECTOR PARA ANCHOS DE FALLA IGUAL AL CRÍTICO. 15
FIGURA 5-6: DISTRIBUCIÓN DE FUERZA AXIAL EN LA TUBERÍA PARA ANCHOS DE FALLA IGUAL AL CRÍTICO. 16
FIGURA 5-7: INFLUENCIA DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA "D". 17
FIGURA 5-8: INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA TUBERÍA "T". 17
FIGURA 5-9: INFLUENCIA DEL GRADO DE RESISTENCIA A LA FLUENCIA DEL MATERIAL. 18
FIGURA 5-10: INFLUENCIA DEL PEAK LONGITUDINAL DE RESISTENCIA DEL SUELO. 19
FIGURA 5-11: INFLUENCIA DEL PEAK DE RESISTENCIA TRANSVERSAL DEL SUELO "PU". 19
FIGURA 5-12: MODELO DE CABLE PARABÓLICO PARA ANCHOS DE FALLA CONSIDERABLES. 20
FIGURA 5-13: IDEALIZACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL SUELO. 23
FIGURA 5-14: MODELO DE TUBERÍA ELÁSTICA SOMETIDA A UN DPS DE GRAN DESPLAZAMIENTO. 24
FIGURA 5-15: MODELO DE TUBERÍA ELÁSTICA SOMETIDA A UN DPS DE GRAN LONGITUD DE FALLA. 24
FIGURA 5-16: ROTACIÓN Y EXTENSIÓN DE JUNTAS SOMETIDAS A DPS. 27
FIGURA 6-1: REPRESENTACIÓN IDEALIZADA DEL MODELO ELASTOPLÁSTICO DEL SUELO. 30
FIGURA 6-2: RELACIÓN IDEALIZADA DE CARGA-DEFORMACIÓN PARA LA INTERACCIÓN SUELO-TUBERÍA. 31
FIGURA 6-3: FACTOR DE ADHESIÓN VS RESISTENCIA NO DRENADA AL CORTE. 32
FIGURA 6-4: FACTOR DE SOPORTE HORIZONTAL VS PROFUNDIDAD/DIÁMETRO 35
FIGURA 7-1: GRÁFICO ESFUERZO VERSUS DEFORMACIÓN DEL POLIETILENO. 38
FIGURA 7-2: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE FUGA EN LAS JUNTAS DE TUBERÍAS SEGMENTADAS. 40
FIGURA 8-1: JUNTAS SOLDADAS EN TUBERÍAS DE ACERO. 42
FIGURA 8-2: JUNTA ELASTICA Y DESPLAZAMIENTOS ADMISIBLES. 45
FIGURA 8-3: JUNTA ACERROJADA EXTERNA. 47
FIGURA 8-4: JUNTA PAMLOCK. 48
FIGURA 8-5: UNIÓN ANGER PARA TUBOS DE PVC. 50
FIGURA 9-1: PESTAÑA "DATOS DE ENTRADA", PRIMERA PARTE. 52

FIGURA 9-2: PARÁMETROS CORRESPONDIENTES A LOS TRES PRIMEROS TIPOS DE SUELO, EN TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL. 53
FIGURA 13-1: TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL SEGMENTADAS 102

VII. Índice de Tablas

TABLA 5-1: FLUENCIA DE LOS GRADOS DE ACERO. 18
TABLA 6-1: ANGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN DE SUELOS. 29
TABLA 6-2: TIPOS DE SUELOS SUSCEPTIBLES A DEFORMARSE EN UN SISMO. 30
TABLA 6-3: FACTOR "K" PARA DISTINTOS REVESTIMIENTOS DE TUBERÍA. 33
TABLA 6-4: VALORES DE LAS CONSTANTES UTILIZADAS EN LAS ECUACIONES 6-5 Y 6-6. 34
TABLA 7-1: PARÁMETROS DE RAMBERG Y OSGOOD PARA ACERO EN FLUENCIA. 38
TABLA 7-2: DEFORMACIÓN CRÍTICA PERMITIDA ANTES DE FALLAR POR PANDEO LOCAL SEGÚN DIÁMETRO DE LA TUBERÍA. 39
TABLA 8-1: PARÁMETROS DEL ACERO A-36. 41
TABLA 8-2: PROPIEDADES TUBERÍAS DE HDPE PN200. 42
TABLA 8-3: PROPIEDADES TUBERÍAS DE HDPE PN100. 42
TABLA 8-4: PROPIEDADES TUBERÍAS DE HDPE PN80. 43
TABLA 8-5: PROPIEDADES TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL. 44
TABLA 8-6: RANGO DE DESPLAZAMIENTO PERMITO EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL. 45
TABLA 8-7: RANGO DE DESPLAZAMIENTO PERMITIDO EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL. 46
TABLA 8-8: DESPLAZAMIENTO ADMISIBLE JUNTA EXTERNA (JTE) 47
TABLA 8-9: PROPIEDADES PVC. 49
TABLA 8-10: LARGO MÍNIMO, L, DE LA UNIÓN ANGER. 50
TABLA 9-1: PARÁMETROS DE ENTRADA EN LA PESTAÑA "HDPE" PARA UNA TENSIÓN MÍNIMA PE80. 53
TABLA 9-2: FRAGMENTO DE LA TABLA CORRESPONDIENTE A LA PESTAÑA "ACERO" DONDE SE MUESTRAN TODAS LAS PROPIEDADES DE LA TUBERÍA EN ESTUDIO. 54
TABLA 9-3: FRAGMENTO DE TABLA DE LA PESTAÑA "ACERO" DONDE SE MUESTRAN LOS VALORES CORRESPONDIENTES A UNA DESLIZAMIENTO DE TERRENO TRANSVERSAL AL EJE DE LA TUBERÍA. 55
TABLA 9-4: FRAGMENTO DE TABLA DE LA PESTAÑA "ACERO" DONDE SE MUESTRAN LOS VALORES CORRESPONDIENTES A UNA DESLIZAMIENTO DE TERRENO TRANSVERSAL AL EJE DE LA TUBERÍA. 56
TABLA 9-5: FRAGMENTO DE LA TABLA QUE ANALIZA LAS TUBERÍAS DE "ACERO", DONDE SE INDICA SI LA TUBERÍA SUFRE FLUENCIA O PANDEO LOCAL. 57
TABLA 9-6: SEGMENTO DE LA TABLA PRESENTE EN LA PESTAÑA "HD" QUE HACE REFERENCIA A LA SEPARACIÓN SUFRIDA POR LAS JUNTAS ANTE LOS DESPLAZAMIENTOS DE TERRENO TANTO TRANSVERSAL COMO LONGITUDINAL AL EJE DE LA TUBERÍA. 58
TABLA 9-7: MÁXIMO ANCHOS DE FALLAS PERMITIDOS EN CADA MATERIAL PARA UN DPS TRANSVERSAL. 79
TABLA 9-8: MÁXIMOS LARGOS DE FALLAS PERMITIDOS EN CADA MATERIAL PARA UN DPS LONGITUDINAL. 83
TABLA 13-1: DIÁMETROS, ESPESORES Y PRESIÓN DE PRUEBA TUBERÍAS DE ACERO A-36. 104
TABLA 13-2: FACTORES OBTENER LA PRESIÓN DE PRUEBA DE DISTINTOS ACEROS 105
TABLA 13-3: DIÁMETROS Y ESPESORES TUBERÍAS DE HDPE PE100. 106
TABLA 13-4: DIÁMETROS Y ESPESORES TUBERÍAS DE HDPE PE 200. 107
TABLA 13-5: DIÁMETROS Y ESPESORES TUBERÍAS DE HDPE PE80. 108
TABLA 13-6: DIÁMETROS Y PRESIONES DE TRABAJO PARA TUBERÍA DE HD CLASE K7 109
TABLA 13-7:DIÁMETROS Y PRESIONES DE TRABAJO PARA TUBERÍA DE HD CLASE K9. 109
TABLA 13-8: DIÁMETROS, ESPESORES Y CLASES DE TUBERÍAS DE PVC. 110

1. Introducción

Históricamente el daño a las tuberías de agua potable durante los sismos ha afectado todo el sistema de abastecimiento. La rotura de las redes causa la pérdida rápida de agua y producen el vaciado de los estanques. Cuando el servicio público de energía está fuera de servicio los estanques no se pueden volver a llenar y el sistema puede quedar sin agua por varios días, a no ser que cuente con grupos electrógenos de respaldo que suministren energía mientras se repone el servicio eléctrico.

Un claro ejemplo de los daños que causan los terremotos en el sistema sanitario, fue el vivido en el terremoto del 2010 en Concepción, donde en términos económicos, los daños ascendieron a MM $50.000 por la destrucción total de 11 estanques de agua potable, 60 kilómetros de redes de agua potable, 100 kilómetros de redes de aguas servidas, 34 plantas elevadoras de aguas servidas y 2 emisarios submarinos. A lo que se debe sumar los daños parciales que obligaron a la reparación de 30 plantas de descontaminación de aguas servidas, 5 emisarios submarinos, 36 estanques de agua potable y 11 oficinas de atención al cliente [Essbio y Nuevosur, 2010].

Cuando las tuberías se encuentran enterradas en suelos inestables, susceptibles a sufrir licuefacción o asentamientos, el problema se ve incrementado debido a una mayor probabilidad de deslizamiento del terreno lo que provoca grandes solicitaciones en los ductos. Este fenómeno es común en los arenosos suelos de las costas de Chile potenciado por la mayor humedad presente en ellos.

Para evitar futuros desastres sanitarios al producirse eventos de esta naturaleza, es conveniente que al momento de diseñar las redes de agua potable se estimen las solicitaciones de las tuberías ante posibles desplazamientos del terreno, y así, determinar qué tipos y tamaños de tuberías tendrán un mejor comportamiento frente a determinadas circunstancias.

Con el fin de realizar un aporte en esta área, se implementará un modelo que permitirá calcular la deformación en una tubería de un material y tamaño determinado que se encuentra enterrada en un suelo que simulará desplazarse debido a un terremoto. El desplazamiento podrá ser transversal o longitudinal al eje de la tubería y será posible evaluar si el ducto ha alcanzado la fluencia o si sufrió pandeo en algún tramo de la conducción.

Finalmente, para poder concluir sobre el comportamiento de los distintos factores involucrados y saber los pasos a seguir en el caso de detectar potenciales problemas de fluencia o pandeo en las redes de agua, se calculará la deformación en tuberías variando su material, tamaño, tipo de suelo en el que está en enterrada y magnitud del sismo que la afecta. Los resultados serán presentados en gráficos para otorgar una lectura sencilla y una fácil comparación entre las variables involucradas.

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

- Implementar un modelo que logre estimar los esfuerzos y deformaciones a los que será sometida una tubería de agua potable, cuando se produzcan desplazamientos en el suelo donde está enterrada, debido a eventos sísmicos. Este modelo podrá ser utilizado para tomar decisiones criteriosas respecto a las dimensiones y material de la tubería en la etapa de diseño, reduciendo las pérdidas económicas y cortes de servicios al enfrentarse a movimientos telúricos.

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar los mecanismos que producen la falla o colapso de tuberías en eventos sísmicos.
- Aplicar las expresiones que permitan calcular las solicitaciones en tuberías debido a desplazamientos del terreno, tanto para tuberías continuas como segmentadas.
- Estudiar el comportamiento suelo-tubería durante un desplazamiento de terreno y determinar los suelos más susceptibles a fallar.
- Establecer criterios de falla de la tubería.
- Realizar una recopilación de las dimensiones y materiales de tuberías más utilizadas para redes de conducción de agua potable.
- Comparación de los factores y parámetros involucrados en el problema a fin de realizar recomendaciones de diseño.
- Presentar de forma gráfica el comportamiento de tuberías en suelos susceptibles a fallar, entregando los valores de la deformación esperada para distintas magnitudes del sismo, variando las dimensiones y material de la tubería, a fin de servir como guía de diseño para futuros proyectos.

3. Motivación a nivel país para la realización del presente estudio

Actualmente en las consultoras de ingeniería no es rutinario realizar un análisis detallado de los esfuerzos y deformaciones que puede provocar un terremoto en las redes de agua potable. No considerar los potenciales daños de un sismo sobre los ductos de conducción puede ocasionar la pérdida parcial o total del servicio luego de una catástrofe. Incluso, se pone en riesgo la vida de las personas debido a las grandes presiones a las que se encuentran sometidos algunos puntos de la red.

Un claro ejemplo del destrozo que puede provocar un sismo en la ingeniería sanitaria es el terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero del 2010, conocido como 27F, donde la octava región fue una de las más afectadas. La destrucción de tuberías de acero de 1000 mm de diámetro que impulsaban agua desde la planta productora La Mochita hasta los estanques que abastecen las ciudades de Concepción, Talcahuano y Hualpén, es un hecho que demuestra el daño causado a la infraestructura e instalaciones sanitarias. En algunos tramos, grandes conducciones estaban totalmente destruidas, situación que permitió hacerse una idea de lo difícil que sería reparar la destrucción que causo el 27F.

A continuación, se detallan los problemas sanitarios posteriores al terremoto del 27F descritos por Essbio y Nuevosur [referencia 9], empresas encargadas de los servicios sanitarios en la octava Región de Chile.

3.1. Desastre sanitario posterior al terremoto del 27F en Concepción

La energía del megasismo se propagó por los 617,71 km^2 de superficie que abarca el área de operación de Essbio y Nuevosur, desde la región de O´Higgins hasta la del Biobío. El terremoto y posterior tsunami afecto los procesos de producción, distribución, alcantarillado y descontaminación de aguas servidas.

En dos semanas, sólo en la ciudad de Concepción se realizaron reparaciones equivalentes a 72 megacortes (reparaciones programadas en grandes conducciones de agua), faenas que en situaciones normales implican una preparación mínima de tres meses y 30 horas de ejecución.

Una vez ocurrido el terremoto y realizado un análisis preliminar de daños, se definió priorizar la producción de agua potable. Si bien el proceso de producción se detuvo solo un par de horas, la población comenzó a sufrir desabastecimiento por el daño que se había producido en las redes de transporte del agua, provocando que la gente se agolpara en los puntos de distribución y comenzara a provocarse desborde en los accesos, ante lo cual, se decidió pedir a las autoridades resguardo de las instalaciones mediante apoyo militar.

En algunas comunas la reposición del servicio tardo más de cuatro semanas debido a que los daños en redes de agua potable se fueron conociendo paulatinamente. Cuando se reparaba una rotura en

los kilómetros posteriores aparecía otra, resultando imposible saber cómo se comportaría la red más adelante lo que retrasó las labores de reparación.

El frente de trabajo prioritario fue reparar las líneas que van desde La Mochita al cerro Chepe, ya que llegan a estanques que abastecen a gran parte de Concepción, a todo Hualpén y Talcahuano. Las líneas resultaron con roturas en diversos frentes que fueron visibles porque, al ser líneas de alta presión y romperse con el sismo, generaron una explosión que se llevó todo el material que estaba alrededor ocasionando grande socavones y destrucción de calles enteras (ver Figura 3-1 y Figura 3-2).

(Essbio y Nuevosur, 2010, referencia [9])

Figura 3-1: Falla en las redes de abastecimiento en la octava Región de Chile.

Una reposición similar puede durar meses, mientras que esta reparación se tuvo que organizar en cosa de días. Cuando se logró llevar agua por una de las líneas ocurrió el problema que, al intentar llegar a la red del centro de Concepción, el agua se iba rápidamente ya que las tuberías estaban fracturadas en varios puntos.

(Essbio y Nuevosur, 2010, referencia [9])

Figura 3-2: Reposición de líneas de abastecimiento.

(Essbio y Nuevosur, 2010, referencia [9])

Figura 3-3: Reposición de redes secundarías de Concepción.

A diferencia de las redes principales, donde afloró hacia la superficie el problema, en las redes secundarias más pequeñas la única forma de saber dónde estaban los problemas era inyectando agua y probándolas. Por eso, mientras no se tuviese agua en los estanques del cerro Chepe no se podía iniciar el trabajo en la zona más devastada por el terremoto y tsunami que era Talcahuano.

La reposición del suministro fue gradual y a una semana de la catástrofe se había llegado con agua a la red del centro de Concepción (ver Figura 3-3), pero no significó que se dispusiera de agua en las casas, pues la comunidad sabía que podía sacar agua de los grifos y los abrió masivamente afectando rápidamente la presión. Se trató de un problema sobre el cual la sanitaria tenía muy poco control en los primeros días.

Los problemas fueron resueltos paulatinamente y se continuó extendiendo la reposición del servicio a sectores como Collao y Nonguén, pero la prioridad estaba en llegar con agua potable a Talcahuano y para ello se fue avanzando de manera gradual. Primero se llegó al cerro Chepe, luego a Higueras localidad donde se encuentra el Hospital y finalmente el cerro Solar, lugar desde donde se alimenta a gran parte de la ciudad puerto. Llegar a ese punto fue importante, porque podía comenzar a ingresar agua a todas las redes de Talcahuano y comprobar el estado de las redes menores.

Con el terremoto se produjeron fallas en todas las redes, sin distinción entre las antiguas (que tenían entre 20 y 30 años) de las más nuevas. Es así como existieron redes nuevas que fallaron y por otro lado redes antiguas a las que no les pasó nada. Lo que tuvo mucha incidencia fue la calidad del terreno, el sismo se mueve distinto según el tipo de suelo, por ello una construcción que está en un cerro sobre roca se movió bastante menos que aquellas que están en suelos de relleno y/o licuables.

Una catástrofe como la vivida debe hacer que un país tome conciencia en cómo se debe reaccionar ante desastres sanitarios de esta índole y en lo posible evitarlos, para ello los ingenieros al momento de diseñar deben, de alguna manera, simular esta situación e incluir la resistencia necesaria en las redes y tuberías proyectadas para que tengan una menor probabilidad de fallar en estos eventos.

Actualmente en Chile no es recurrente estudiar la incidencia que tienen los sismos sobre las tuberías aun sabiendo la alta ocurrencia de terremotos en el país y los daños que provocan, es por ello que se motiva la realización del presente trabajo para enfrentar el problema entregando información que sirva de referencia para determinar las deformaciones producidas en las tuberías según el material utilizado en la red y el terreno de fundación, y así, en el caso de producirse un terremoto similar al vivido en el 27F se evite o se aminore un desastre sanitario como el ocurrido en Concepción.

4. Mecanismos de falla producidos durante un sismo

Los mecanismos de fallas que afectan a las tuberías enterradas durante un terremoto son: la propagación de ondas, la deformación permanente del suelo (DPS) y la ruptura por fallas geológicas. Estos tres tipos de mecanismos serán descritos en el siguiente capítulo.

4.1. Tipos de mecanismo

4.1.1. Propagación de ondas

Durante la ocurrencia de un sismo desde el hipocentro se propagan dos tipos de ondas: de cuerpo y superficiales. Las primeras viajan a través de la corteza terrestre, en cambio, las segundas (como su nombre lo indica) viajan por la superficie debido a la refracción y reflexión de las de cuerpo. La atenuación de las ondas de cuerpo es más rápida que las de superficie debido a que las ondas de alta frecuencia lo hacen de manera más rápida que las de baja frecuencia.

La propagación de las ondas sísmicas causa deformaciones axiales y de flexión en una tubería enterrada debido a la interacción que existe entre su manto y el suelo que la rodea. Si se trata de una tubería continua, el paso de la onda causará un movimiento diferencial a lo largo de su eje longitudinal provocando esfuerzos que pueden ser considerables. En tuberías segmentadas, la flexión o rotación causada por la onda no tiene gran influencia sobre las uniones.

En la mayor parte de los casos, las tuberías de acero soldado por arco voltaico o las tuberías de polietileno son lo suficientemente dúctiles para soportar sin daño alguno las deformaciones del terreno debido a la propagación de ondas.

El debilitamiento que produce la corrosión en las tuberías también puede provocar que se rompan con el paso de la onda, por lo tanto, se deben evaluar las tuberías que tienen un historial de mantenimiento excesivo debido a fugas causadas por la corrosión, proporcionando tuberías con un revestimiento o una protección catódica apropiada para su control.

T. O'Rourke estudió el colapso de tuberías posterior al terremoto de 1906 en San Francisco, California. Observando que la cantidad de fallas debido a propagación de onda era pequeña comparada con los daños causados por desplazamientos de terreno.

4.1.2. Deformación Permanente del Suelo

La deformación permanente del suelo (DPS) se refiere al movimiento no recuperable del suelo debido a deslizamientos de terreno, compactación cíclica de suelos arenosos, desplazamientos laterales inducidos por licuación de suelos, etc. La falla de una tubería enterrada cuando está sometida a una DPS depende de la magnitud y de la extensión espacial de la deformación (O'Rourke y Liu, 1999).

Al ocurrir un DPS la tubería, en un principio, se desplaza junto con el suelo. En este desplazamiento el tubo se dobla y estira en un afán de adaptarse al movimiento del terreno produciendo esfuerzos de corte, tracción y compresión que muchas veces lo hacen colapsar.

Dada la directa relación que tiene la calidad suelo con la magnitud del DPS, es importante realizar un estudio del terreno donde se enterrará la tubería, para evitar que sea un suelo licuable o susceptible a cualquier tipo de deslizamiento. Si el análisis arroja que el suelo no es apto para enterrar la tubería es preferible reubicar la conducción, de no ser posible, se debe diseñar la tubería para que sea capaz de resistir las deformaciones del terreno.

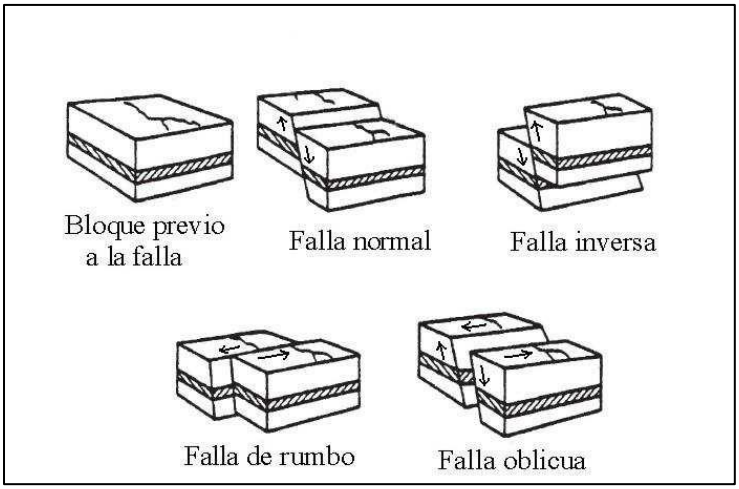
El DPS produce una combinación de desplazamiento longitudinal y transversal en relación con el eje axial de la tubería. Para uniones sueltas, como la de espiga y campana, el movimiento longitudinal es soportado principalmente por la extensión y comprensión axial en la unión. Dependiendo de la resistencia y la ductilidad de la tubería, la espiga puede empujar la campana y la tubería longitudinalmente transfiriendo parte de la deformación unitaria por compresión. Sin embargo, esta transferencia de esfuerzos puede provocar la rotura de la campana. En las tuberías continuas o con uniones fijas (soldadas o termofusionadas), la deformación permanente del suelo en sentido longitudinal produce esfuerzos de tracción y compresión que causan una deformación axial en el segmento de la tubería. En el caso de movimiento transversales, la tubería en el afán de acomodarse al movimiento del suelo se somete a diversos tipos de esfuerzos (flexión, corte, compresión y tracciones), lo que hace que este mecanismo sea el principal causante del colapso de tuberías.

4.1.3. Ruptura por fallas activas

Este tipo de mecanismo se produce cuando un terreno donde existe una falla geológica activa se ve sometido a movimientos sísmicos que provocan bruscos desplazamientos del suelo y la consiguiente rotura de las tuberías enterradas en el lugar.

Existen cuatro tipos de falla activas (ver Figura 4-1), estos son: normal, inversa, de rumbo y oblicua. Las dos primeras se producen por un movimiento relativo de la falla activa en dirección vertical, la falla de rumbo se produce por un movimiento relativo horizontal y la oblicua por una combinación de ambos. Dependiendo de la orientación de la tubería estas fallas provocarán esfuerzos de tracción o compresión de gran magnitud.

En este tipo de mecanismo, debido a los grandes y bruscos desplazamientos que produce, es más efectivo realizar un sistema de prevención de falla en el terreno donde se emplazará la red que en el diseño resistente que se le pueda dar a las tuberías. Más aún, en fallas geológicas debido a su abrupta naturaleza es difícil que un modelo pueda predecir con relativa certeza el comportamiento que tendrá el terreno y su interacción con la tubería enterrada en él.



(O´Rourke and Liu, 1999, referencia [15])

Figura 4-1: Tipos de fallas Activas.

4.2. Análisis de mecanismos

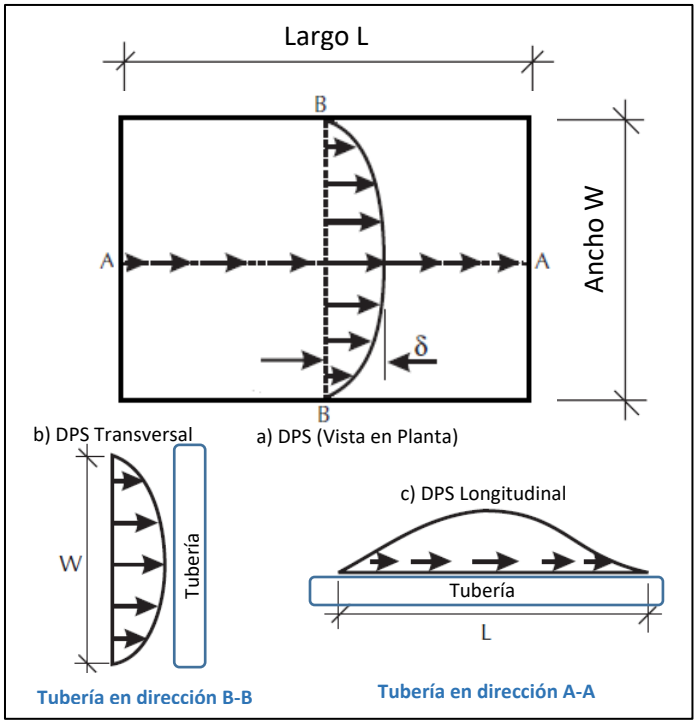
Según lo descritos anteriormente, y basado en los estudios del profesor O´Rourke, se puede concluir que el DPS es el mecanismo que tiene mayor recurrencia y tasa de daños en tuberías. A diferencia del mecanismo de ruptura por fallas activas, en el DPS es posible aplicar un modelo a la tubería que permita predecir en forma razonable su comportamiento.

La deformación permanente del suelo dependerá de las condiciones del suelo local, por lo tanto, es importante que al realizar un proyecto sanitario en una zona determinada, se realice un estudio del terreno que logre predecir en forma aproximada las deformaciones a las cuales puede ser sometido antes de enterrar las tuberías.

Se distinguen dos tipos de DPS, uno es el que se localiza cerca de una falla geológica y es similar a lo que ocurre en el mecanismo de falla activa ya que la deformación es abrupta. Y otro, es el que presenta un desplazamiento permanente espacialmente distribuido. Este último podría tener lugar, por ejemplo, en terrenos húmedos propensos a sufrir licuefacción o en asentamiento de terreno debido a la consolidación del suelo.

En ambos tipos de DPS el movimiento de tierra es principalmente horizontal. Towhata (1991) observó que también se producían DPS verticales, pero eran insignificantes en comparación al horizontal.

El DPS tiene cuatro características geométricas que lo pueden describir, estas son: el desplazamiento “δ”, el ancho de falla “W”, la distancia longitudinal “L” y la distribución espacial, las que pueden ser observadas en la Figura 4-2.



(Adaptación de Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 4-2: Parámetros característicos de un DPS.

En la vista en planta (a) se observa todos los parámetros descritos, tanto para un DPS transversal (tubería en dirección B-B) como longitudinal (tubería en dirección A-A) al eje de la tubería.

Algunos autores como: Dobry y Baziar (1990), Hamada (1987), Towhata y Yasuda (1991) y Orense (1992) han trabajado en expresiones que permiten estimar "δ" en función de parámetros como la magnitud del sismo, la pendiente del terreno y altura del estrato.

Liu y O'Rourke utilizaron los parámetros de la Figura 4-2 y parámetros del suelo, como la resistencia longitudinal y transversal, para determinar el desplazamiento crítico "δcr" al que puede ser sometida una tubería enterrada en un suelo que se encuentra bajo una deformación "δ", es decir, hasta qué punto la tubería se desplaza junto con el terreno. Con el valor de "δcr" obtenido, dedujeron ecuaciones analíticas (basados en sus modelos de elementos finitos) para calcular los esfuerzo y deformaciones, tanto axiales como de flexión, en la tubería.

El detalle del modelo de elementos finitos utilizado para estudiar el comportamiento suelos-tuberías y obtener las expresiones analíticas que lo representaran, son presentadas en el capítulo 5.

5. Tuberías enterradas sometidas a Deformación Permanente del Suelo.

La forma en que una tubería puede fallar debido a un DPS dependerá de la cantidad relativa de tensión axial y de momento flector. Si los esfuerzos de tensión son bajos, la tubería puede doblarse en forma excesiva fallando principalmente por los esfuerzos de flexión. En cambio, si las tensiones axiales son grandes, la tubería puede fallar a causa del efecto combinado de los esfuerzos de tensión y flexión.

Dentro del análisis de tuberías enterradas se debe distinguir entre deformaciones longitudinales, causadas por el movimiento del suelo paralelo al eje de la tubería, y deformaciones transversales que ocurren por movimientos perpendiculares al eje de la misma. Es importante el estudio de los desplazamientos longitudinales debido a las fallas que puede provocar en la tubería, como pandeo local debido a los esfuerzos de compresión que induce el suelo sobre el ducto. Sin embargo, el estudio de los desplazamientos transversales, evalúa tanto la resistencia transversal como longitudinal del suelo sobre la tubería. Además, debido a este tipo de desplazamiento se producen los mayores esfuerzos de tensión y flexión que son la principal causa de falla.

A continuación, se analizará el DPS transversal y longitudinal (en tuberías continuas y segmentadas) citando a los autores que han hecho los mayores avances en esta materia, con el fin de llegar a un enfoque práctico que pueda ser considerado al momento de diseñar tuberías de transporte de agua potable bajo tierra.

5.1. Tuberías continuas

5.1.1. DPS transversal en tuberías continuas

El modelo de elementos finitos de Liu y O'Rourke y las conclusiones obtenidas de éste son ampliamente utilizadas en la literatura del estudio de tuberías enterradas sometidas a deslizamientos transversales del suelo y reconocidas por numerosos autores por ser las que mejor se ajustan a los registros históricos de fallas por DPS. El modelo y las ecuaciones analíticas obtenidas en base a él se presentan a continuación.

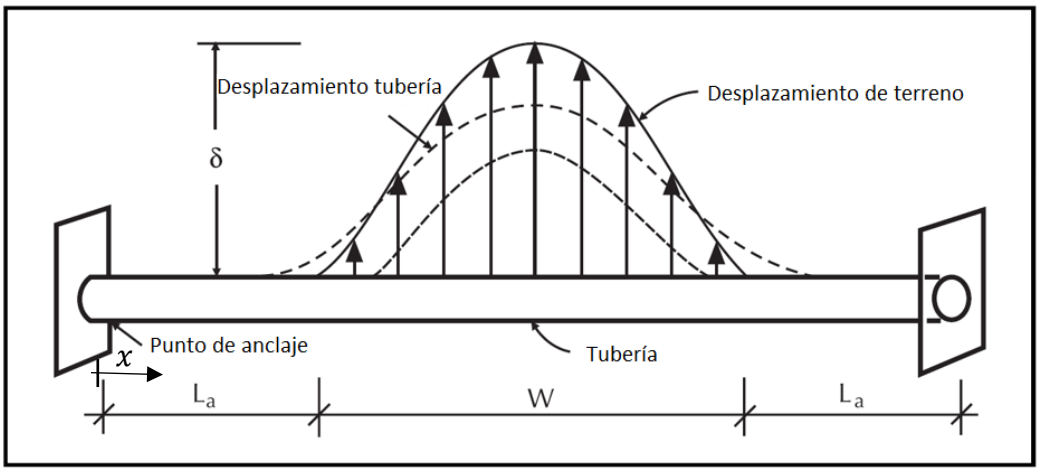
5.1.1.1. Modelos de elementos finitos

Los métodos de elementos finitos permiten considerar las características no lineales de la interacción suelo-tubería, así como los esfuerzos y deformaciones no lineales a los que se somete el material de los ductos. Por lo mismo, varios autores han intentado modelar por este método el comportamiento de la tubería al ser sometida a un DPS.

Entre los trabajos más destacados se encuentran los de O'Rourke (1988), Suzuki (1988) y Kobayashi (1989). Quienes realizaron sus modelos otorgándole al suelo una función de probabilidad que simulaba su movimiento y asumiendo que la tubería se desplazaba junto con él. Luego Liu y O'Rourke (1997), desarrollaron un modelo el cual asumía que la tubería se desplaza junto al suelo hasta cierta distancia crítica, y posterior a ella, solo se continuaba moviendo el suelo hasta el colapso de la tubería. Siendo esto lo que realmente se observa en terreno.

5.1.1.2. Modelo de Liu y O'Rourke

Liu y O'Rourke (1997) desarrollaron un modelo de elementos finitos utilizando la teoría de grandes deformaciones, la interacción no lineal suelo-tubería y la relación de Ramberg Osgood para los esfuerzos y deformaciones del material fuera del rango elástico. La tubería fue modelada como una viga acoplada tanto axial como lateralmente por un suelo conformado de resortes (ver Figura 6-1). La longitud de los anclajes de la tubería, fueron hechos lo suficientemente grandes para que las deformaciones debido a flexión y fuerza axial que se encuentran fuera del ancho de falla "W" sean muy cercanas a cero (ver Figura 5-1).



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-1: Modelación de la tubería utilizada por Liu y O'Rourke.

Para calibrar el modelo se utilizó arena semidensa (ángulo de fricción ϕ=35° y suelo de densidad $\gamma = 1.87x10^4$ $[N/m^3]$) y una profundidad desde la superficie a la clave de la tubería de 1.2 [m]. Los valores del peak de resistencia transversal "p_u", y longitudinal "t_u", del suelo fueron de $1.0x10^5$ y $2.4x10^4$ [N/m] respectivamente (valores obtenidos como resultado de modelar el suelo como se presenta en la sección 6.2).

La Figura 5-2 muestra la máxima deformación de la tubería tanto en tensión como en compresión versus el desplazamiento del suelo y la Figura 5-3 muestra el máximo desplazamiento de la tubería versus el desplazamiento del suelo. Ambos casos para anchos de falla de 10, 30 y 50 metros.

Los resultados presentados en ambas figuras fueron calculados para una tubería de acero de grado X-52 (f_y= 3660 kg/cm^2), diámetro D = 0.61 [m] y espesor t= 0.0095 [m]. El movimiento del suelo fue modelado con la ecuación (5-1).

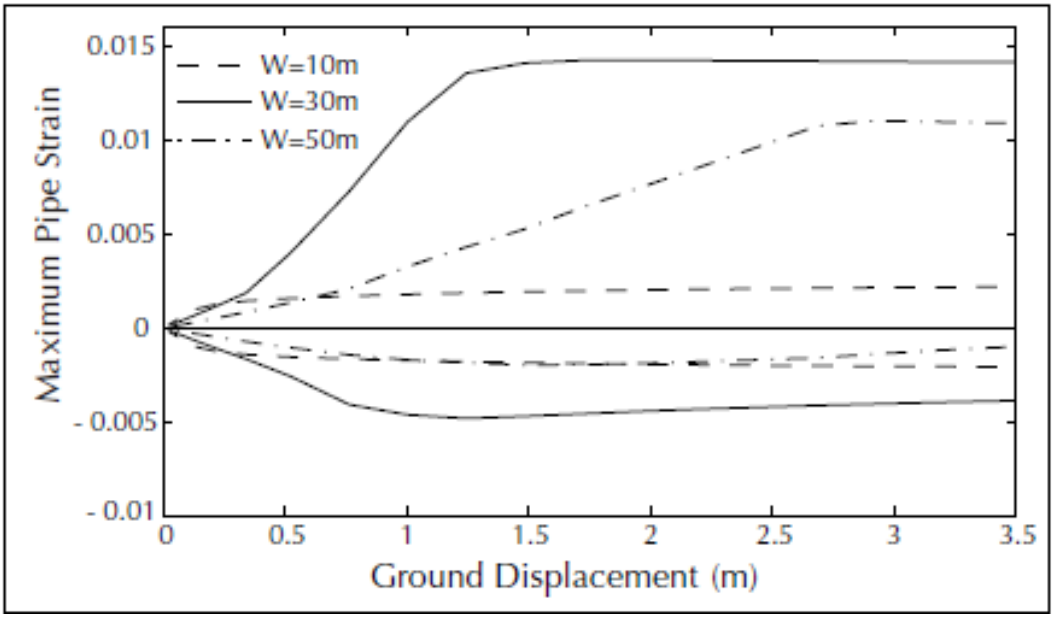
$$Y(x) = \frac{\delta}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{\mathrm{W}}\right)\right) \quad \textbf{(5-1)}$$

Donde:

x: distancia desde el margen de la zona de falla

W: ancho de la zona de falla (ver Figura 5-1).

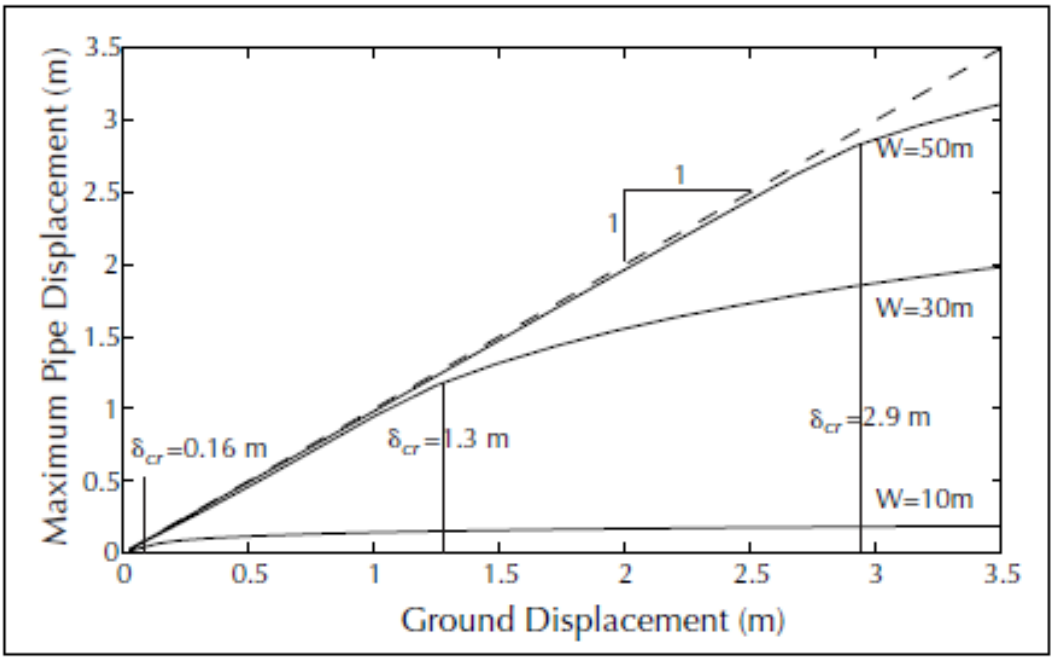
Excepto por el ancho de falla W= 10 m, la Figura 5-2 indica que el peak de deformación bajo esfuerzos de tensión es bastante mayor que el peak bajo esfuerzos de compresión, en especial para grandes valores de desplazamiento del suelo "δ". También se observa que, para los casos considerados, la mayor deformación es para un ancho de falla W= 30 metros.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-2: Máxima deformación de la tubería versus desplazamiento del suelo (δ).

En la Figura 5-3 se observa que el máximo desplazamiento de la tubería coincide con el desplazamiento del suelo hasta cierta distancia crítica "δ_{cr}". A partir de ahí, la deformación de la tubería permanece relativamente constante, mientras que su desplazamiento se incrementa más lento que el desplazamiento del suelo. Para desplazamientos del suelo mayores a δ_{cr} la curvatura de la tubería permanece prácticamente constante, por lo tanto la deformación por flexión casi no varía. Por otro lado, la deformación axial se incrementa lentamente hasta llegar a la máxima deformación por tensión.

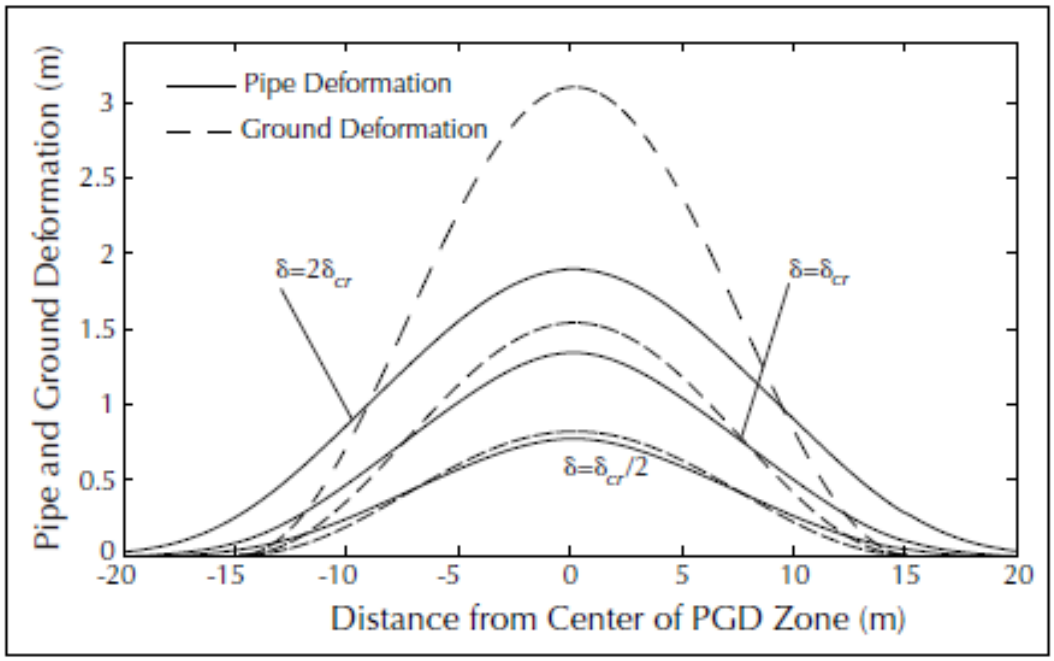


(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-3: Máximo desplazamiento de la tubería versus desplazamiento del suelo (δ).

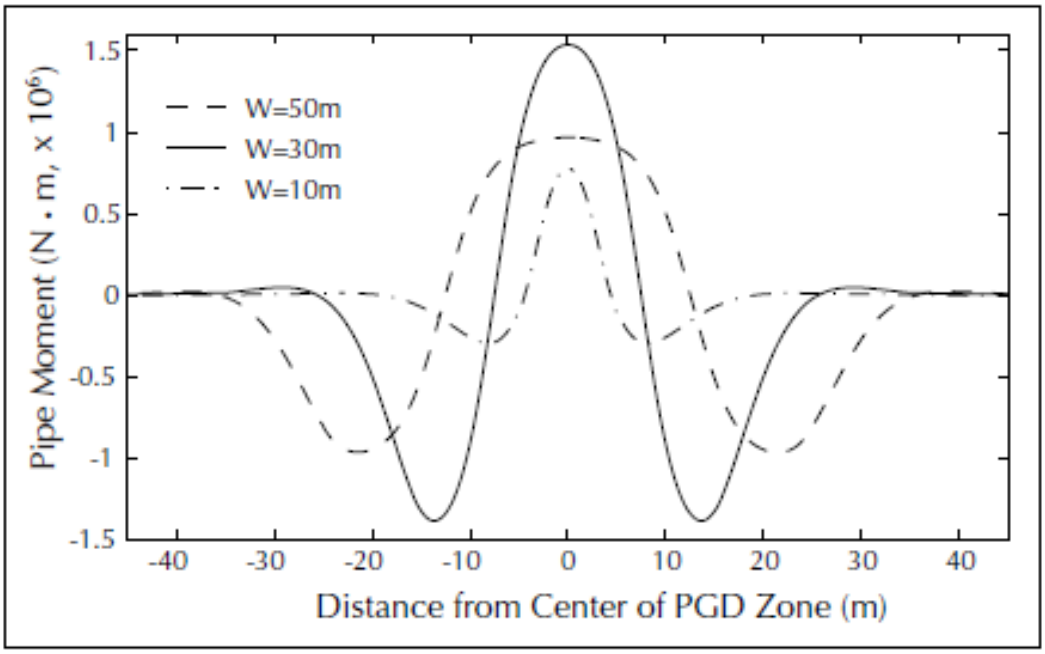
La Figura 5-4 muestra, para un valor fijo del ancho de falla (W=30 m), la distribución espacial del desplazamiento de la tubería y del suelo para δ=0.5δ_{cr}, δ=δ_{cr} y δ=2δ_{cr}.

Se observa que la deformación de la tubería coincide baste bien con la del suelo para δ < δ_{cr}. Sin embargo, para δ > δ_{cr} el máximo desplazamiento de la tubería es menor al del suelo y el ancho de la deformación, que es la longitud sobre la cual el tubo tiene deformación notable, es mayor al ancho de la zona de falla. Como resultado, la curvatura de la tubería es sustancialmente menor que la curvatura del suelo para δ > δ_{cr}. También se aprecia que la curvatura de la tubería para δ=δ_{cr} es comparable a la curvatura para δ=2δ_{cr}.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

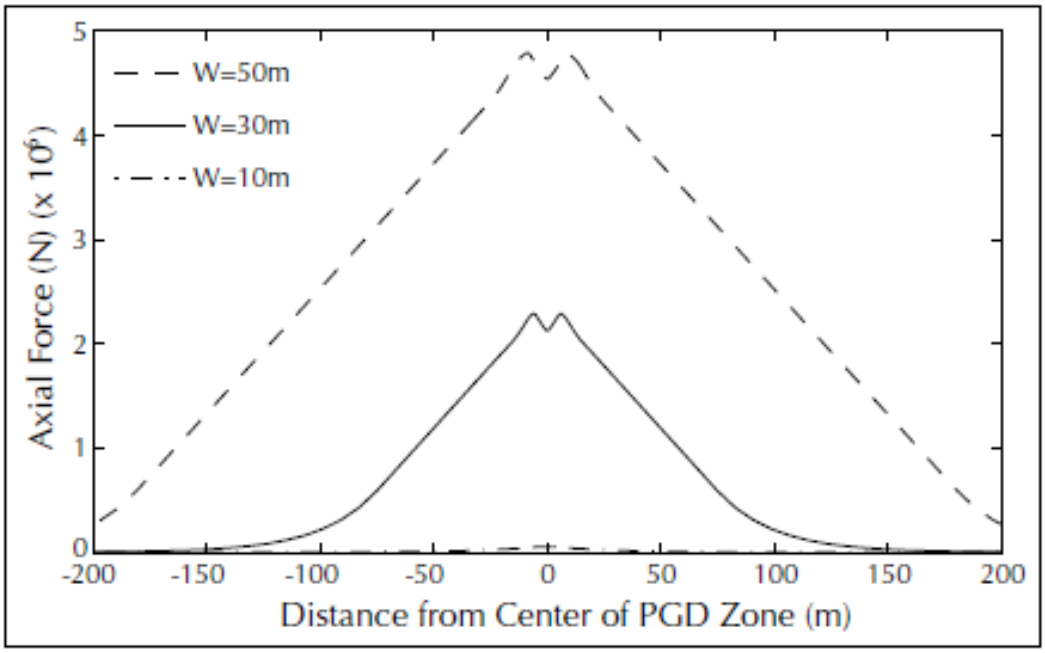
Figura 5-4: Deformación de la tubería y el suelo para W= 30 m.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-5: Distribución de momento flector para anchos de falla igual al crítico.

La Figura 5-5 y la Figura 5-6 muestran la distribución en la tubería de momento flector y fuerzas axiales respectivamente, para $\delta=\delta_{cr}$, considerando anchos de falla de 10, 30 y 50 metros.



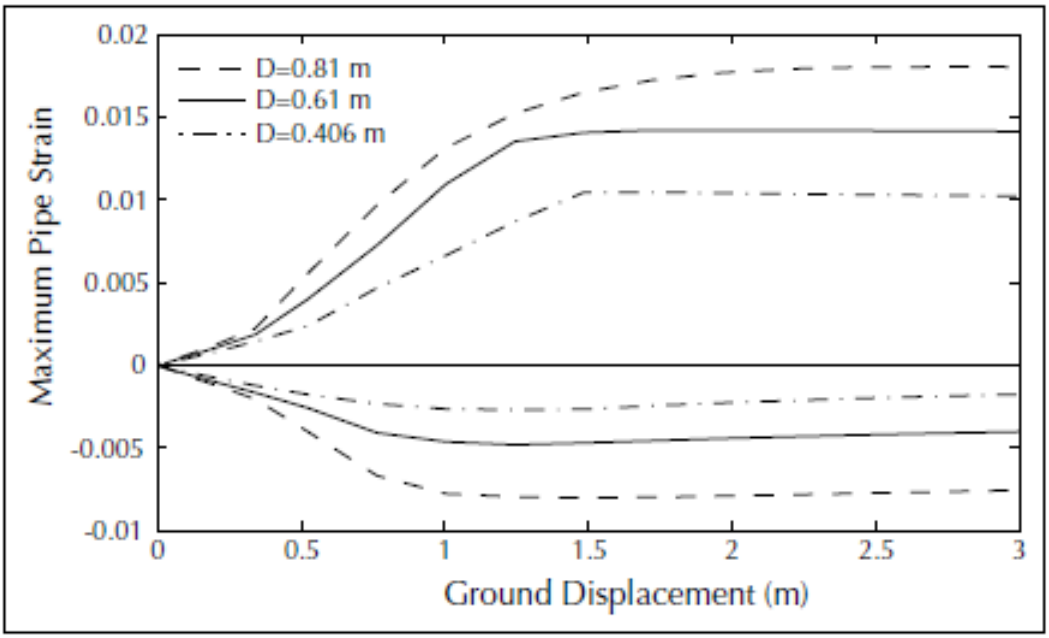
(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-6: Distribución de fuerza axial en la tubería para anchos de falla igual al crítico.

En la Figura 5-5 se observa que los momentos flectores son simétricos con respecto al centro de la zona de falla y su distribución es similar a lo que ocurre en una viga empotrada en ambos extremos sometida a una carga distribuida, es decir, con momentos positivos cerca del centro de la zona de falla y momentos negativos cerca de los márgenes. Se puede apreciar que los momentos de flexión para W= 30 metros son mayores que para W= 10 o 50 metros y en los tres casos se hacen cero aproximadamente 10 metros más allá de los márgenes.

La fuerza axial sobre la tubería (ver Figura 5-6) también tiene un comportamiento simétrico, con su máximo en el centro de la zona de falla y disminuyendo de forma prácticamente lineal al acercarse a los márgenes. A diferencia de los momentos flectores, la fuerza axial siempre aumenta con "W" y se hace cero a una distancia bastante más alejada de los márgenes de la zona de falla.

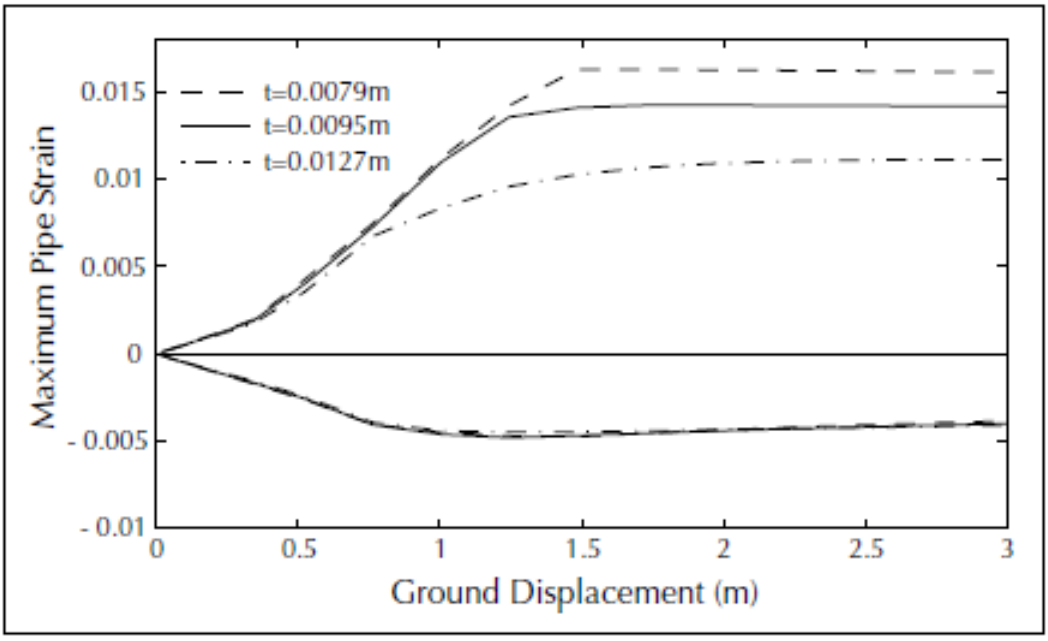
Luego de observar el comportamiento de la tubería según el ancho de la zona de falla, Liu y O'Rourke analizaron qué ocurría al variar propiedades de la tubería como el diámetro, espesor o el grado de resistencia a la fluencia. Las Figura 5-7, 5-8 y 5-9 muestran estos resultados.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-7: Influencia del diámetro de la tubería "D".

Como se puede ver en la Figura 5-7, el peak de deformación debido a esfuerzo de tensión y compresión aumenta en función del diámetro, manteniendo W constante e igual a 30 metros.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-8: Influencia del espesor de la tubería "t".

Si bien todos los parámetros analizados, en mayor o menor medida, son una función de la deformación en tensión o compresión de la tubería, la Figura 5-8 muestra que el espesor de la pared prácticamente no influye en la deformación por compresión. En cambio, es una función decreciente para peak de deformación por tensión.

Con respecto al grado de resistencia a la fluencia del acero, la Figura 5-9 muestra que es una función decreciente para la deformación por tracción, y al igual que lo ocurrido con el espesor de la tubería, el grado del acero es practicamente independiente de la deformación por compresión. El grado de fluencia de los aceros analizados se indica en la Tabla 5-1.

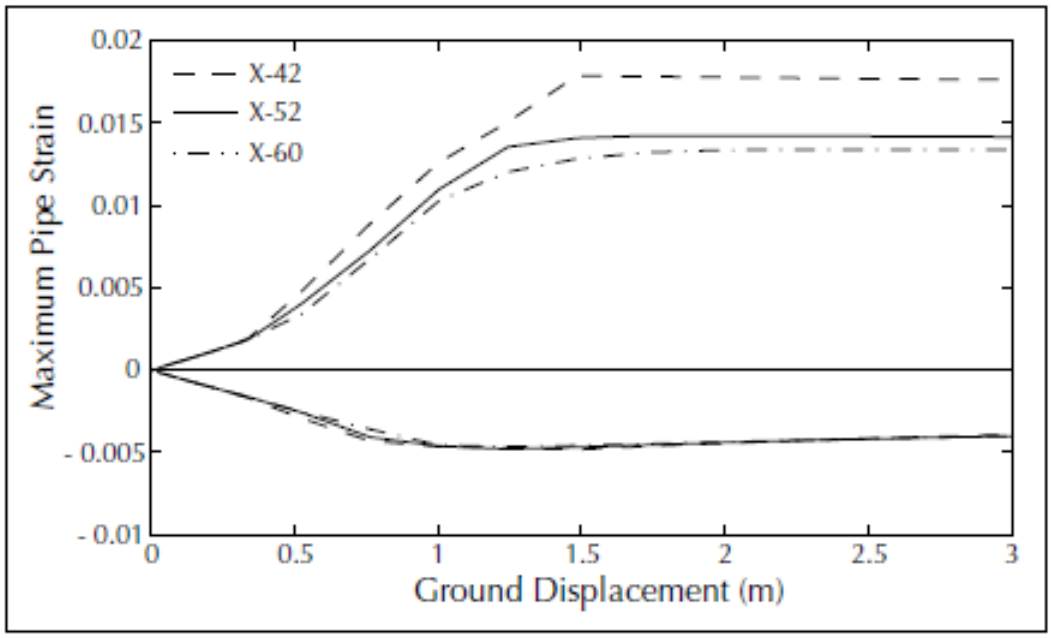
Tabla 5-1: Fluencia de los grados de acero.

Grado	Fluencia $[kg/cm^2]$
X-42	2950
X-52	3660
X-60	4220

La Figura 5-10 y Figura 5-11 muestran el comportamiento de la tubería variando ahora propiedades del suelo como la resistencia transversal "p_u" y longitudinal "t_u".

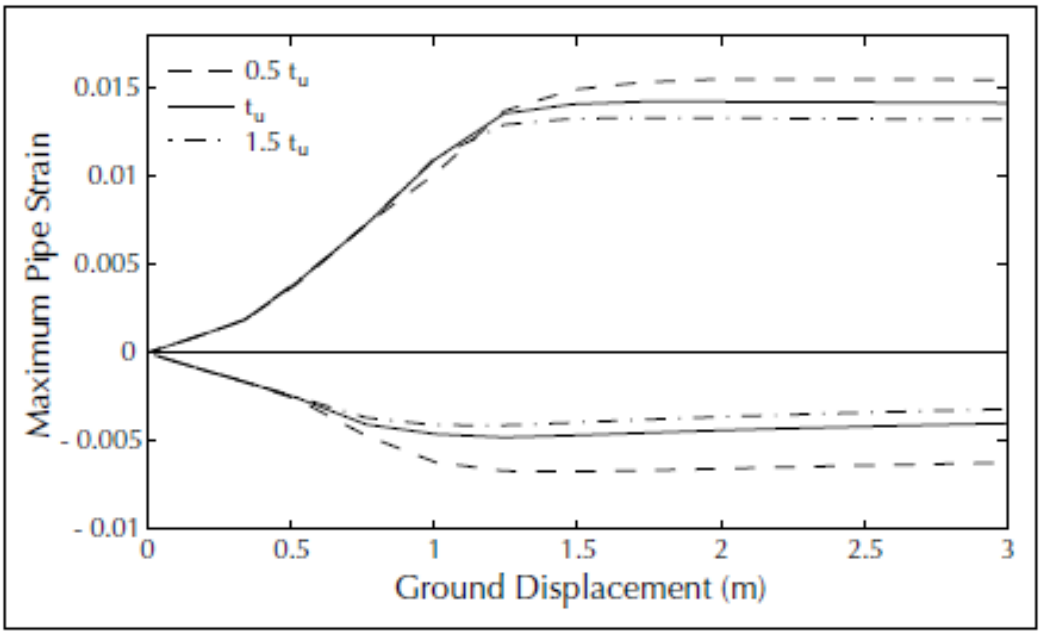
La Figura 5-10 muestra que la resistencia longitudinal del suelo es una función decreciente de la deformación tanto por compresión como tracción. Sin embargo, su variación no tiene gran influencia en el valor peak.

La resistencia transversal, como se muestra en la Figura 5-11, es una función creciente del peak de deformaciones y tiene una influencia significativa sobre la deformación por tracción.



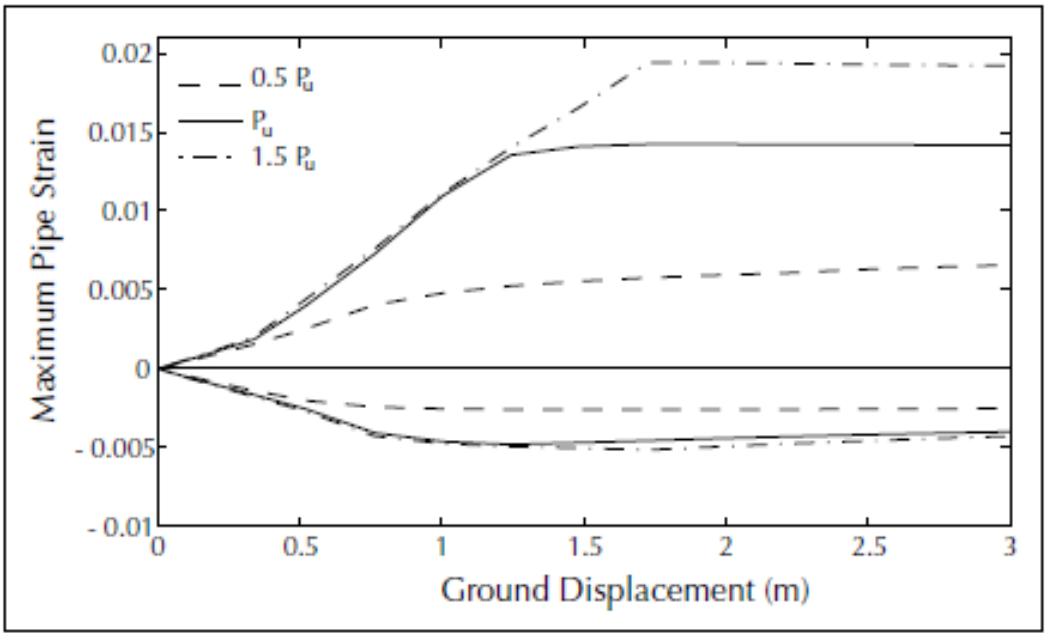
(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-9: Influencia del grado de resistencia a la fluencia del material.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-10: Influencia del peak longitudinal de resistencia del suelo.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-11: Influencia del peak de resistencia transversal del suelo "pu".

Resumiendo, los parámetros que tienen mayor influencia en la deformación por tracción en orden decreciente son: el ancho de la zona de falla, la resistencia transversal del suelo, el diámetro de la tubería, el grado de resistencia a la fluencia, el espesor de las paredes del tubo y la resistencia longitudinal del suelo. En el caso del desplazamiento crítico, es una función creciente del ancho de falla y de la fuerza de interacción lateral suelo-tubería, pero una función decreciente de la fuerza de interacción axial suelo-tubería, grado de fluencia, diámetro y espesor de la tubería.

5.1.1.3. Deducciones analíticas del modelo de Liu y O'Rourke

Del análisis del modelo de elementos finitos, Liu y O'Rourke, dedujeron expresiones analíticas que permiten modelar el comportamiento de la tubería enterrada en función del ancho de falla del terreno. Si el ancho de la zona de falla "W" es pequeño (menor a 30 metros), los esfuerzos de flexión controlaran el comportamiento de la tubería y puede ser modelada como una viga biempotrada a la cual se le aplica una carga distribuida p_u. Así, el desplazamiento crítico de la tubería y la deformación por flexión a la que se ve sometida están dadas por las ecuaciones (5-2) y (5-3) respectivamente. La deducción detallada de estas expresiones se presenta en el Anexo A.

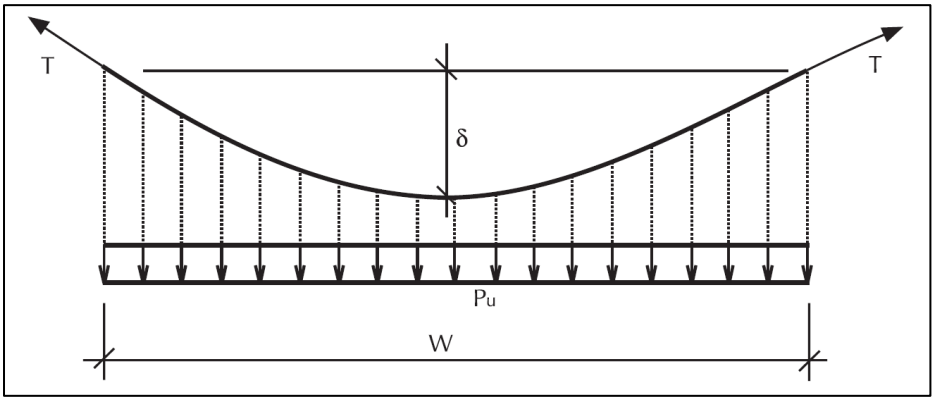
$$\delta_{cr-f} = \frac{p_u \mathrm{W}^4}{384\mathrm{EI}} \tag{5-2}$$

$$\varepsilon_f = \pm \frac{\pi^2 \delta \mathrm{D}}{\mathrm{W}^2} \tag{5-3}$$

Donde:

p_u: resistencia transversal del suelo
W: ancho de la zona de falla del suelo
E: módulo de la elasticidad del material de la tubería
I: inercia de la tubería.

Cuando el ancho de falla "W" es mayor (más de 30 metros) el comportamiento de la tubería comienza a ser controlado por los esfuerzos axiales. De acuerdo a esto, la relación entre la fuerza axial "T" en los extremos del cable y el desplazamiento crítico "δ_{cr}" se puede modelar como un problema de cables parabólicos (ver Figura 5-12). La deducción detallada de las expresiones se presenta en el Anexo B.



(Liu and O'Rourke, 1997, referencia [15])

Figura 5-12: Modelo de cable parabólico para anchos de falla considerables.

Luego la tensión queda definida según la ecuación (5-4).

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{p_u W}^2}{8\delta} \tag{5-4}$$

Como se observa en la Figura 5-4, luego de sobrepasar el desplazamiento critico el movimiento del suelo comienza a ser mayor que el de la tubería. Si se considera un desplazamiento de $\delta/2$ a una distancia W/2 del comienzo de la zona de falla se obtiene la ecuación (5-5) para relacionar la tensión en la tubería con el desplazamiento del suelo:

$$\mathrm{T} = \pi \mathrm{Dt}\sigma = \frac{\mathrm{p_u}(\mathrm{W}/2)^2}{8(\delta/2)} = \frac{\mathrm{p_u W}^2}{16\delta} \tag{5-5}$$

Donde:

σ: tensión axial en la tubería.

La fuerza axial "T" producida en la tubería generará un desplazamiento en los bordes de zona de falla "W". Suponiendo que la fuerza longitudinal "t_u" es constante y el largo de los bordes de anclaje "L_a" es igual a T/t_u, el movimiento de la tubería en los márgenes de falla será:

$$\Delta = \frac{\pi \mathrm{Dt}\sigma^2}{2\mathrm{Et_u}} \tag{5-6}$$

En el Anexo C se deduce la elongación axial de la tubería, esta deformación es aproximadamente igual a la deformación debido a los esfuerzos de tracción más el movimiento en los extremos de la tubería presentado previamente. Igualando estas expresiones se obtiene:

$$\frac{\pi^2\delta^2}{4\mathrm{W}} = \frac{\sigma \mathrm{W}}{\mathrm{E}} + \frac{\pi \mathrm{Dt}\sigma^2}{\mathrm{Et_u}} \tag{5-7}$$

Despejando "σ" de la ecuación (5-5) y reemplazando en (5-7), se obtiene la ecuación (5-8) de la cual se puede calcular el valor de δ_{cr-t}, cuya solución se presenta en el Anexo D.

$$\delta_{cr-t}{}^4 - \left(\frac{\mathrm{W}^4\mathrm{P_u}}{4\pi^3\mathrm{DtE}}\right)\delta_{cr-t} - \left(\frac{\mathrm{W}^5\mathrm{P_u}^2}{64\pi^3\mathrm{DtEt_u}}\right) = 0 \tag{5-8}$$

La expresión (5-9) combina la deformación en la tubería debido a los esfuerzos de tensión y flexión en una sola ecuación asumiendo que éstos actúan en paralelo.

$$\delta_{cr} = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{cr-f}} + \frac{1}{\delta_{cr-t}}} \tag{5-9}$$

La deformación en la tubería se obtiene de la expresión (5-10), cuya deducción detallada se presenta en el Anexo E.

$$\varepsilon_{elast} = \begin{cases} \frac{\sigma}{\mathrm{E}} \pm \frac{\pi^2\delta\mathrm{D}}{\mathrm{w}^2}, & \delta \le \delta_{\mathrm{cr}} \\ \frac{\sigma}{\mathrm{E}} \pm \frac{\pi^2\delta_{\mathrm{cr}}\mathrm{D}}{\mathrm{w}^2}, & \delta > \delta_{\mathrm{cr}} \end{cases} \tag{5-10}$$

La expresión (5-10) es la suma de la deformación producida debido a los esfuerzos de tensión y flexión en la tubería. El termino debido a la tensión (σ/E) se puede aproximar como:

$$\frac{\sigma}{E} = \begin{cases} \frac{\pi\delta}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}}, & \delta \leq \delta_{cr} \\ \frac{\pi\delta_{cr}}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}}, & \delta > \delta_{cr} \end{cases} \quad \textbf{(5-11)}$$

Resultando finalmente una expresión para la deformación en la tubería igual a:

$$\varepsilon_{elast} = \begin{cases} \frac{\pi\delta}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta D}{w^2}, & \delta \leq \delta_{cr} \\ \frac{\pi\delta_{cr}}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta_{cr} D}{w^2}, & \delta > \delta_{cr} \end{cases} \quad \textbf{(5-12)}$$

La estructura en la que se presentó el modelo de Liu y O'Rourke en el presente subcapítulo fue basada en la memoria de Marcelo Mella, ingeniero civil de la Universidad de Chile, quien estudio modelos numéricos que predijeran el comportamiento de tuberías enterradas en solicitaciones sísmicas [referencia 14].

Cabe destacar que las expresiones obtenidas son aplicables para DPS en dirección transversal al eje de la tubería, los cuales son los que producen la mayor cantidad de daños en tuberías durante los sismos. Sin embargo, puede que los DPS se presenten acompañados del mecanismo de onda pudiendo incrementar el daño causado a las redes de conducción.

Si se desea estudiar el comportamiento de la tubería ante ondas sísmicas, se puede revisar el trabajo de Newmark (1967) quien propuso un modelo simple de elementos finitos considerando la excitación sísmica como una onda viajera. Posteriormente, O'Rourke y El Hmadi (1988) utilizaron un enfoque diferente al de Newmark para estimar la deformación axial máxima inducida en las tuberías debido a la propagación de la onda.

5.1.1.4. Comparación con casos históricos

El terremoto de 1971 en San Fernando, EEUU, fue utilizado por Liu y O'Rourke para comprobar la efectividad de las aproximaciones descritas anteriormente. Se analizó una tubería de acero Grado-C de 1370 mm de diámetro y 7.9 mm de espesor que fue sometida a un desplazamiento permanente del suelo de 0.7 metros con un ancho de falla W de 400 metros. De la ecuación (5-3) se obtiene una deformación unitaria por flexión de $6.0\text{x}10^{-5}$ mientras que la deformación unitaria por tensión es de $7.60\text{x}10^{-6}$ y el desplazamiento critico es de 10 metros. Para el desplazamiento critico calculado se espera una deformación máxima de $6.8\text{x}10^{-5}$, puesto que este valor está por debajo de la deformación de rotura tanto para flexión como tensión axial, la tubería no debiese sufrir daños debido al DPS. El comportamiento que fue observado coincidió con el esperado ya que la tubería no sufrió daños. Sin embargo, la misma tubería presento daños cerca de las uniones a las válvulas donde el análisis de DPS como tubería continua ya no es aplicable. Liu y O'Rourke concluyeron que

el mecanismo de onda fue el que produjo la falla en el sector de la válvula debido a que durante un sismo es probable que ocurra más de un mecanismo.

Por otro lado, observaron que los resultados de las expresiones analíticas son muy próximos a los reales para valores del ancho de falla "W" mayores a 30 metros. Aplicar estas ecuaciones suponiendo fallas mayores a 30 metros es bastante realista, un estudio que lo demuestra fue el realizado por Suzuki y Masuda (1991) al terremoto de Niigata Japón (1964), el cual arrojo que para 40 sitios distintos sometidos a DPS los anchos de fallas "W" se encontraban en un rango de 100 a 600 metros.

Suzuki y Masuda al aplicar las expresiones analíticas descritas anteriormente a las fallas del terremoto en Japón, obtuvieron que éstas sobrestiman en algún grado el peak de deformación por tensión y subestiman el peak de deformación por compresión. Esto sugiere que la deformación axial estimada es algo mayor a la real. Sin embargo, las diferencias son pequeñas particularmente a la luz de la exactitud de las predicciones geotécnicas para el valor esperado de la extensión espacial y el movimiento de tierra de la zona de DPS.

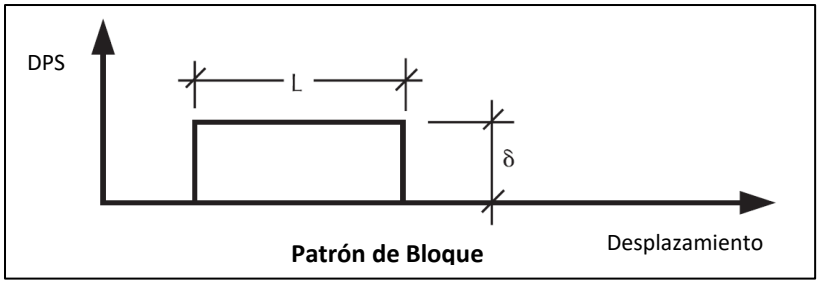
5.1.2. DPS longitudinal en tuberías continuas

En éste capítulo se discutirá sobre la respuesta de tuberías ante deslizamiento permanentes del terreno paralelo al eje de la tubería. Utilizando como base teórica el trabajo de O'Rourke y Nordberg sobre tuberías elásticas sometidas a DPS longitudinales.

Si bien no es frecuente observar daños en tuberías provocadas únicamente por este mecanismo, es importante asegurar que los valores esperados de esfuerzo y deformación axial en un terreno particular no sobrepasen los valores de pandeo local del material que se utilizará para la red.

O´Rourke y Nordberg (1992) idealizaron los movimientos del suelo observados durante un DPS longitudinal con un patrón de bloque como se muestra en la Figura 5-13. Donde "L" es el largo de la zona de falla del DPS y δ el desplazamiento del suelo.

Las Figuras 5-14 y 5-15, muestran dos formas distintas en que afecta el desplazamiento a la tubería que dependen de la relación entre L y δ.



(O´Rourke y Nordberg,1992, referencia [16])

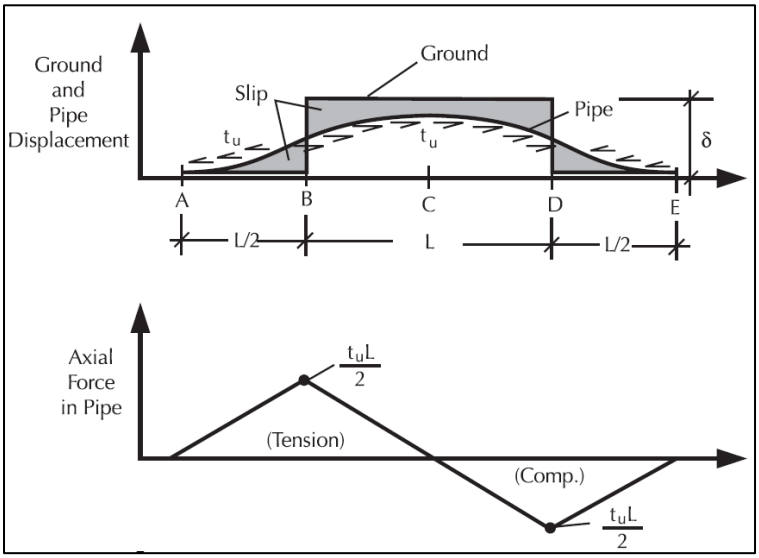
Figura 5-13: Idealización del desplazamiento del suelo.

Si "δ" tiene un tamaño considerable (ver Figura 5-14) será "L" quien controle el comportamiento de la deformación en la tubería. En este caso la deformación unitaria de a una distancia "x" está dada por la ecuación (5-13).

$$\varepsilon_{(x)} = \frac{t_u x}{EA} \tag{5-13}$$

Alcanzando su máximo en los bordes de la falla del suelo (X=L/2).

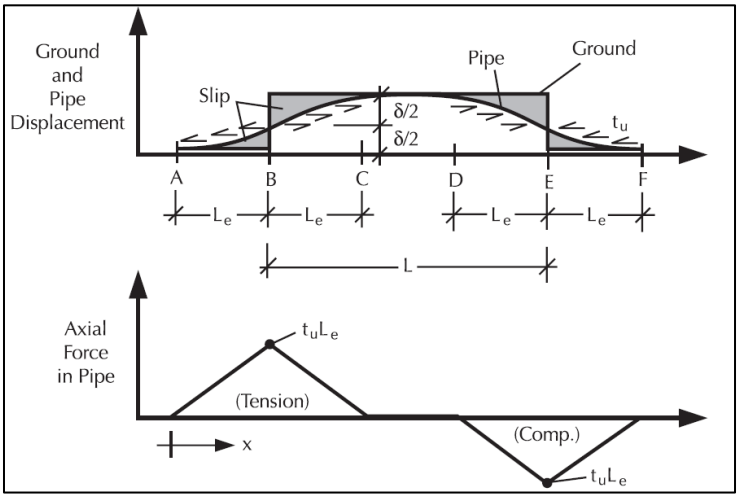
$$\varepsilon_{max} = \frac{t_u L}{2EA} \tag{5-14}$$



(O´Rourke y Nordberg,1992, referencia [16])

Figura 5-14: Modelo de tubería elástica sometida a un DPS de gran desplazamiento.

Por el contrario, si "L" es demasiado grande (ver Figura 5-15) será "δ" quien controle la deformación de la tubería.



(O´Rourke y Nordberg,1992, referencia [16])

Figura 5-15: Modelo de tubería elástica sometida a un DPS de gran longitud de falla.

Se observa que t_u solo está presente en un tramo igual a 2Le, suponiendo que en estos tramos el desplazamiento será δ/2 se obtiene la ecuación (5-15).

$$\delta/2 = \int_0^{L_e} \varepsilon_{(x)} dx \tag{5-15}$$

De (5-14) y (5-15) se obtiene:

$$\delta/2 = \frac{t_u {L_e}^2}{2EA} \tag{5-16}$$

Así,

$$L_e = \sqrt{\frac{\delta EA}{t_u}} \tag{5-17}$$

Por lo tanto, ε_{max} es igual a:

$$\varepsilon_{max} = \frac{t_u L_e}{EA} \tag{5-18}$$

Reemplazando (5-17) en (5-18) se obtiene:

$$\varepsilon_{max} = \sqrt{\frac{\delta t_u}{EA}} \tag{5-19}$$

El límite para distinguir entre ambos casos es cuando L_e es menor que L/2.

La variable L_{em} presentada en (5-20), fue definida por O´Rourke y Nordberg como "longitud de empotramiento", y se refiere al largo sobre el cual la fuerza t_u debe actuar para inducir una deformación unitaria en la tubería igual a la deformación equivalente del suelo.

$$L_{em} = \frac{\delta EA}{L t_u} \tag{5-20}$$

Con esto es posible plantear una sola expresión que modele la deformación en la tubería debido a un DPS longitudinal a su eje, y es la ecuación (5-22).

$$\varepsilon_{max} = \begin{cases} \dfrac{\delta}{2L_{em}}, & L < 4L_{em} \\ \dfrac{\delta}{\sqrt{LL_{em}}}, & L \geq 4L_{em} \end{cases} \tag{5-21}$$

Al igual que en el capítulo 5.1.1.3, en el presente subcapítulo se tomó como referencia la memoria de Marcelo Mella para presentar las expresiones deducidas del modelo de O´Rourke y Nordberg [referencia 14].

La expresión (5-21) se aplica a tuberías que se encuentran en el rango elástico, lo cual satisface el propósito perseguido en este trabajo ya que las tuberías de conducción son diseñadas para un esfuerzo máximo menor al de fluencia.

Sin embargo, si es de interés evaluar el rango inelástico se puede utilizar el modelo propuesto por O'Rourke (1995) basado en el comportamiento no lineal de la tubería propuesto por Ramberg y Osgood (1943).

La deducción de las expresiones del presente capítulo toma como hipótesis que la tubería y el suelo circundante tienen una adhesión perfecta lo que es difícil que ocurra en la práctica, pues la lisura del material busca disminuir el roce suelo-tubería. Sin embargo, contra menor sea la adhesión entre ambos, mayor serán los desplazamientos de suelo que logre soportar la tubería, siendo la hipótesis planteada un factor de seguridad para el problema.

5.2. Tuberías Segmentadas

Hay redes de conducción de agua, de cierta clase de materiales, que no cumplen con las condiciones de una tubería continua por el sistema de juntas que utilizan. Este es el caso del PVC y el Hierro Dúctil cuyas uniones no se consideran fijas ya que los tubos necesitan de accesorios externos o algún tipo de anclaje en sus extremos para poder ser ensamblados.

Las tuberías segmentadas sometidas a DPS sufren fallas en sus uniones antes de que el cuerpo del material alcance la fluencia o deformación máxima. Estas fallas pueden ser: rotura o separación de las juntas espiga-campana, rotación o extracción de las juntas y aplastamiento.

Como ya se discutió anteriormente, los DPS se pueden descomponer en movimientos longitudinales y transversales, estas dos direcciones de desplazamiento tendrán una influencia distinta sobre las uniones de las tuberías segmentadas que se verá a continuación.

5.2.1. DPS longitudinal en tuberías segmentadas

En una tubería segmentada, el desplazamiento de las uniones ante un DPS dependerá de su material, flexibilidad, tipo de junta, etc. Si se asume juntas rígidas que se desplazan junto con el terreno la deformación por unidad de largo es la presentada en la ecuación (5-22).

$$\varepsilon_u = \frac{2\delta}{L} \tag{5-22}$$

Es decir, un desplazamiento de suelo δ normalizado por el ancho de falla (L/2).

Luego, la separación de las uniones será:

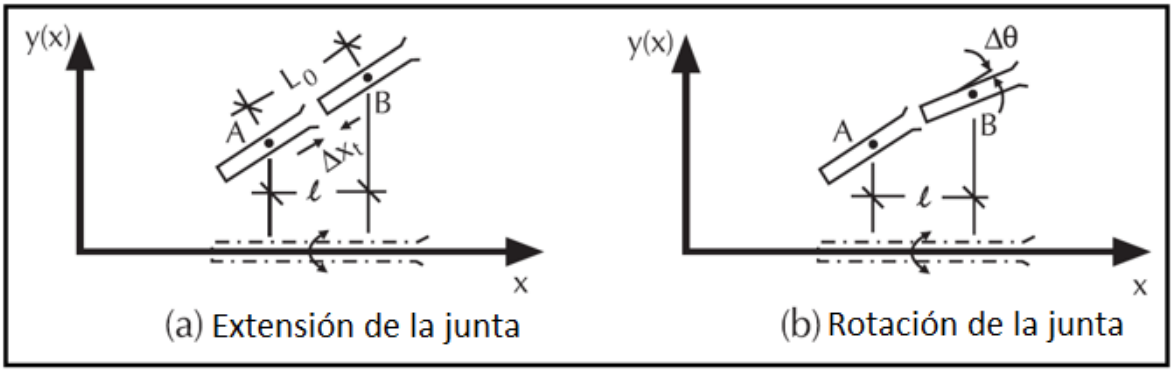
$$\Delta_u = \frac{2\delta L_o}{L} \tag{5-23}$$

Donde:

L_o: longitud del segmento de tubería.

5.2.2. DPS transversal en tuberías segmentadas

O'Rourke y Nordberg (1991) estudiaron la máxima apertura de juntas debido a la rotación y extensión axial de las juntas (ver Figura 5-16) en un DPS transversal al eje de la tubería en función del largo del segmento de tubería, el desplazamiento de la tubería y el ancho de falla del terreno.



(O'Rourke y Nordberg, 1991, referencia [15])

Figura 5-16: Rotación y extensión de juntas sometidas a DPS.

Asumiendo que la tubería segmentada es rígida y que el desplazamiento lateral en el punto medio del segmento de tubería coincide exactamente con el DPS, el desplazamiento axial de la junta es el presentado en la ecuación (5-24).

$$\Delta_{x_t} = \frac{L_o}{2}\left(\frac{\pi\delta}{W}\sin\frac{2\pi x}{W}\right)^2 \qquad \textbf{(5-24)}$$

Donde:

x: distancia desde los márgenes de la zona de DPS

L_o: largo del segmento de tubería.

Los desplazamientos máximos se darán a una distancia $x = W/4$ y $x = 3W/4$, por lo tanto, es probable que ocurra una separación en juntas que se ubiquen a ésta distancia del centro de la zona de falla. El desplazamiento máximo es:

$$\Delta_{x_t}(x) = \frac{L_o}{2}\left(\frac{\pi\delta}{W}\right)^2 \qquad \textbf{(5-25)}$$

Ahora, asumiendo que la pendiente de la tubería segmentada coincide con la pendiente del suelo en el punto medio del segmento de tubería la apertura de la junta debido a la rotación es la siguiente:

$$\Delta_{x_r}(x) = \begin{cases} \frac{\pi^2 \delta D L_o}{W^2} \cos\frac{2\pi x}{W}, & \Delta_{x_t} > \Delta\theta D/2 \\ \frac{2\pi^2 \delta D L_o}{W^2} \cos\frac{2\pi x}{W}, & \Delta_{x_t} \leq \Delta\theta D/2 \end{cases} \quad \textbf{(5-26)}$$

Donde:

D: diámetro de la tubería.

Esta función tiene sus máximos en x = 0, x = W/2 y x =W. Por lo tanto, una falla por rotación de las juntas es más probable en los extremos y punto medio de la zona de falla. El detalle de estas expresiones puede ser revisado en el Anexo F.

La máxima apertura total de una junta, bajo un DPS transversal, es la suma de la separación producida por la extensión axial y la rotación. Sin embargo, los efectos de una y otra son máximos en distintos puntos como se mencionó anteriormente. Combinando ambas, resulta una apertura máxima de juntas de:

$$\Delta_x(x) = \begin{cases} \frac{\pi^2 \delta^2 L_o}{W^2}\left[\frac{2D}{\delta}\right], & 0.268 \leq D/\delta < 3.73 \\ \frac{\pi^2 \delta^2 L_o}{2W^2}\left[1 + (D/\delta)^2\right], & \text{otro caso} \end{cases} \quad \textbf{(5-27)}$$

La apertura máxima en las juntas presentada en (5-27), debe ser evaluada con criterio según el tipo de juntas que se está analizando. Los distintos tipos de juntas y las aperturas que soportan se estudiarán en el capítulo 7.

6. Tipos de suelos

Los suelos en Chile son extraordinariamente diversos, debido a la gran extensión del territorio nacional y los diferentes climas que presentan cada una de las regiones, todos los suelos proceden de distintos orígenes y proceso de formación. Esta variedad de suelos se ve incrementada dentro de las mismas regiones al hacer un recorrido transversal desde las altas cordilleras hasta desembocar en el mar.

Debido a la experiencia nacional y estudios geotécnicos es de amplio conocimiento que los suelos arenosos y los suelos tipo limo de baja plasticidad son susceptibles a sufrir deformaciones. Estos suelos se pueden encontrar en las zonas costeras, sector que además es el que presenta los mayores daños en los terremotos ya que es la zona sísmica 3 de Chile, lugar donde los sismos afectan con mayor intensidad por estar más cerca de las fallas tectónicas.

6.1. Tipos de suelos a modelar

En el siguiente subcapítulo se presentan las ecuaciones necesarias para determinar la resistencia transversal "p_u" y longitudinal "t_u" de diferentes tipos de suelos en función de su ángulo de fricción y cohesión, el que a su vez depende de su mineralogía, distribución granulométrica, etc.

La Tabla 6-1 muestra los valores del ángulo de fricción y cohesión para suelos Granulares y Cohesivos.

Tabla 6-1: Angulo de Fricción y cohesión de suelos.

Tipos de suelos		Angulo de Fricción interna (ϕ)[°]	Cohesión (C) [kg/cm2]
Granulares o no Cohesivos	Arena Fina	25	-
	Arena Gruesa	35	-
	Arena Densa	35	-
	Arena Gruesa o con Grava	35	-
Suelos Cohesivos	Arcilla Arenosa Firme	24,5	0,05
	Arcilla Arenosa Blanda	23,5	0
	Limo de Baja plasticidad	24,5	0,02
	Arcilla limosa	15	0
	Arcilla blanda	0.1	0

(Civilgeeks.com Ingeniería y construcción)

Con el propósito de analizar y obtener conclusiones del comportamiento de tuberías enterradas en suelos susceptibles a sufrir deformaciones, se utilizará el modelo implementado para estudiar el comportamiento en los suelos de la Tabla 6-2:

Tabla 6-2: Tipos de suelos susceptibles a deformarse en un sismo.

Tipo de suelo	Características del suelo	Angulo de fricción ϕ[°]	Cohesión C [kg/cm2]
1	Arena Fina o suelta	25	-
2	Arena Gruesa o compactada media	35	-
3	Limo de Baja Plasticidad	25	0.02

6.2. Modelación

Las tuberías enterradas se dañan en los terremotos debido a las fuerzas y la deformación impuesta sobre ellas a través de interacciones en la interfaz suelo-tubería, el suelo se mueve y de ese modo hace que el tubo se desplace y deforme. Para efectos de análisis, cualquier deformación arbitraria del suelo se puede descomponer en una componente longitudinal (movimiento de suelo paralelo al eje del tubo) y un componente transversal (movimiento de suelo perpendicular al eje de la tubería).

El Consejo Técnico de Vida de Líneas en Ingeniería Sísmica (TCLEE) desarrollado por la Asociación Americana de Ingeniería Civil (ASCE), para propósitos de análisis, proponen un modelo elastoplástico basado en los parámetros detallados en el siguiente capítulo que simulan la tubería enterrada en un suelo formado por resortes como se muestra en la Figura 6-1.

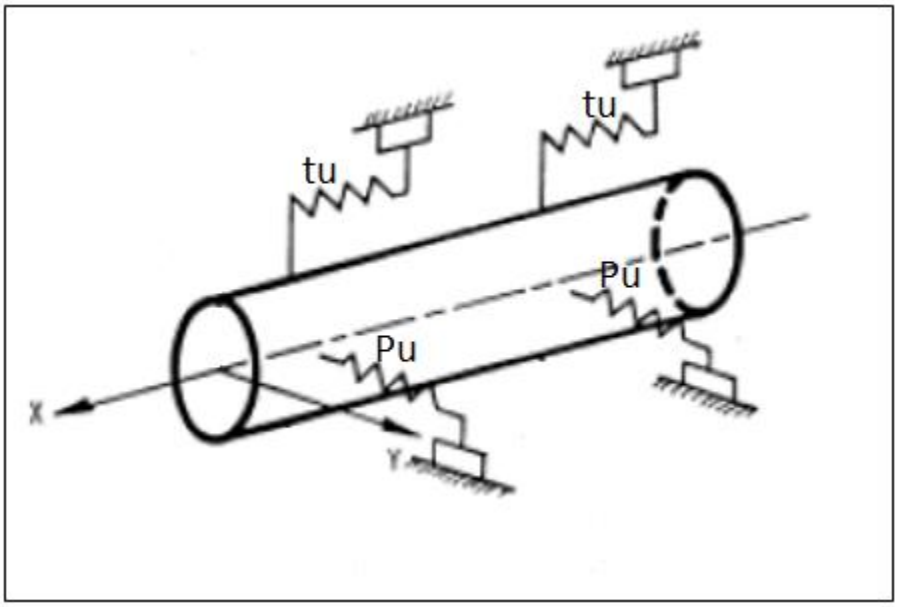
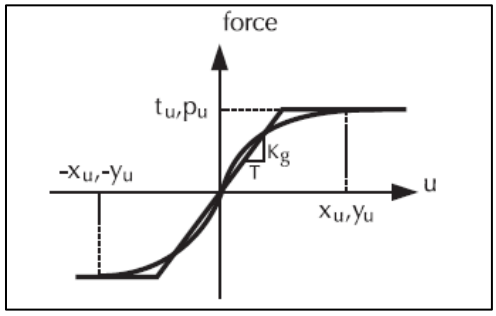


Figura 6-1: Representación idealizada del modelo elastoplástico del suelo.

Las expresiones que permiten obtener la fuerza que ejerce el suelo sobre la tubería se basan en datos experimentales de laboratorio y de campo, así como también en enfoques geotécnicos generales sobre estructuras enterradas. Varias de las expresiones utilizadas se intentan ajustar a las

curvas publicas procedente en estudios empíricos debido a que las ecuaciones facilitan el uso de hojas de cálculos u otras aplicaciones.

La ASCE idealizó el modelo elastoplástico mostrado en la Figura 6-2, el cual está caracterizado por dos parámetros: la fuerza por unidad de longitud que ejerce el suelo sobre la tubería, t_u y P_u, correspondientes a la máxima resistencia axial y transversal respectivamente, y la deformación en unidad de longitud a la que se producen esas fuerzas, x_u e y_u.



(ASCE,1984)

Figura 6-2: Relación idealizada de carga-deformación para la interacción suelo-tubería.

Se observa de la figura anterior que luego de sobrepasar las deformaciones, x_u e y_u, la fuerza que ejerce el suelo sobre la tubería es constante.

Los siguientes subcapítulos detallan las expresiones necesarias para calcular la fuerza longitudinal y transversal ejercida por el suelo sobre la tubería presentadas en la "Guía para el diseño de tubos de acero enterrados" de la ASCE [referencia 5].

6.2.1. Movimiento longitudinal

El movimiento relativo paralelo al eje de tubería produce fuerzas longitudinales en la interfase suelo-tubería, para la cual el ASCE propone expresiones para suelos cohesivos y granulares.

En suelos cohesivos la fuerza longitudinal se obtiene multiplicando la cohesión del suelo por el área exterior del tubo por unidad de largo y por un coeficiente de adhesión empírico "α" como se indica en la ecuación (6-1). La expresión (6-2) corresponde a la deformación mínima donde la fuerza se vuelve constante.

$$t_u = \pi D \alpha C \tag{6-1}$$

$$x_u = 2.54 \sim 5.08\ [mm] \tag{6-2}$$

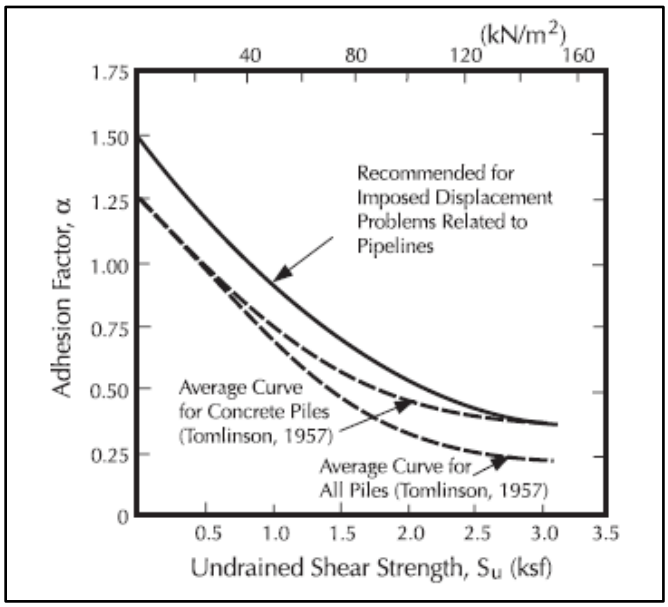
Donde:

D: diámetro de tubería.
C: cohesión representativa de los rellenos de suelo
α: coeficiente de adhesión empírico que varía con C.

La ASCE propone la ecuación (6-5) para calcular "α" en función de la cohesión del suelo "C" en [Kpa/100].

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

También existen curvas experimentales que permiten obtener "α" en función de la resistencia no drenada al corte "S_u" del suelo que rodea la tubería. La Figura 6-3 muestra algunas de estas curvas.



(ASCE,1984, referencia [15])

Figura 6-3: Factor de adhesión vs resistencia no drenada al corte.

En suelos granulares la fuerza longitudinal se obtiene de forma empírica como una aproximación del empuje del suelo en reposo sobre el área por unidad de longitud de la tubería. La expresión propuesta por la ASCE se presenta en la ecuación (6-4). La expresión (6-5) corresponde a la deformación mínima donde la fuerza se vuelve constante.

$$t_u = \pi D \gamma H \frac{(1+k_o)}{2} \tan k\phi \quad \textbf{(6-4)}$$

$$x_u = 5.08 \sim 10.16\ [mm] \quad \textbf{(6-5)}$$

Donde:

γ: peso unitario efectivo del suelo

k_o: coeficiente de presión lateral en reposo (estimado de forma conservativa por O'Rourke como $k_o = 1$)

H: profundidad a la clave de la tubería

Φ: ángulo de fricción del suelo

K: factor de reducción que depende del material de la tubería que está en contacto con el suelo. Los valores de "k" se pueden obtener de la

Tabla 6-3.

Para suelos que tienen una componente tanto granular como cohesiva la fuerza longitudinal del suelo sobre la tubería se obtiene de la ecuación (6-6) que corresponde a la suma de las ecuaciones (6-1) y (6-4).

$$t_u = \pi D \alpha C + \pi D \gamma H \frac{(1 + k_o)}{2} \tan k\phi \quad \textbf{(6-6)}$$

Tabla 6-3: Factor "k" para distintos revestimientos de tubería.

Material de la tubería o revestimiento en contacto con el suelo	K
Cemento	1.0
Hierro Fundido o Dúctil*	0.9
Acero Bruto	0.8
Acero Liso	0.7
Pintura Epoxica*	0.7
HDPE	0.6
PVC*	0.5

(ASCE,1984)

**Adaptación para el presente trabajo.*

6.2.2. Movimiento transversal

El movimiento relativo al eje de la tubería en el plano horizontal produce una fuerza transversal en la interfase suelo-tubería, para la cual el ASCE propone expresiones para suelos cohesivos y granulares.

En suelos cohesivos la fuerza transversal se obtiene multiplicando la cohesión del suelo por el área exterior del tubo por unidad de largo y por un factor de capacidad "$\mathrm{N_{ch}}$" del suelo cohesivo, como se muestra en la ecuación (6-7). La expresión (6-8) corresponde a la deformación mínima donde la fuerza se vuelve constante.

$$\mathrm{p_u = N_{ch} CD} \quad \textbf{(6-7)}$$

$$y_u = (0.03 \sim 0.05)\left(H + \frac{D}{2}\right) \quad \textbf{(6-8)}$$

En suelos granulares la fuerza transversal se obtiene de forma empírica, como una aproximación del empuje del suelo en reposo sobre el área por unidad de longitud de la tubería. La expresión propuesta por la ASCE se presenta en la ecuación (6-9). La expresión (6-10) corresponde a la deformación mínima donde la fuerza se vuelve constante.

$$\mathrm{p_u = N_{qh} \gamma HD} \quad \textbf{(6-9)}$$

Donde:

$\mathrm{N_{qh}}$: factor de capacidad para suelos granulares.

$$y_u = \begin{cases} (0.07\sim0.1)(H + D/2)\ Para\ arenas\ sueltas \\ (0.03\sim0.05)(H + D/2)\ Para\ arenas\ medias \\ (0.02\sim0.03)(H + D/2)\ Para\ arenas\ densas \end{cases} \quad \textbf{(6-10)}$$

Para suelos que tienen una componente tanto granular como cohesiva la fuerza transversal del suelo sobre la tubería se obtiene de la ecuación (6-11) que corresponde a la suma de las ecuaciones(6-7) y (6-9).

$$p_u = N_{ch}CD + N_{qh}\gamma HD \quad \textbf{(6-11)}$$

La ASCE propone las siguientes expresiones para determinar los parámetros N_{ch} y N_{qh}:

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9 \qquad (0\ \text{para}\ C = 0) \quad \textbf{(6-12)}$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \qquad (0\ \text{para}\ \phi{=}0°) \quad \textbf{(6-13)}$$

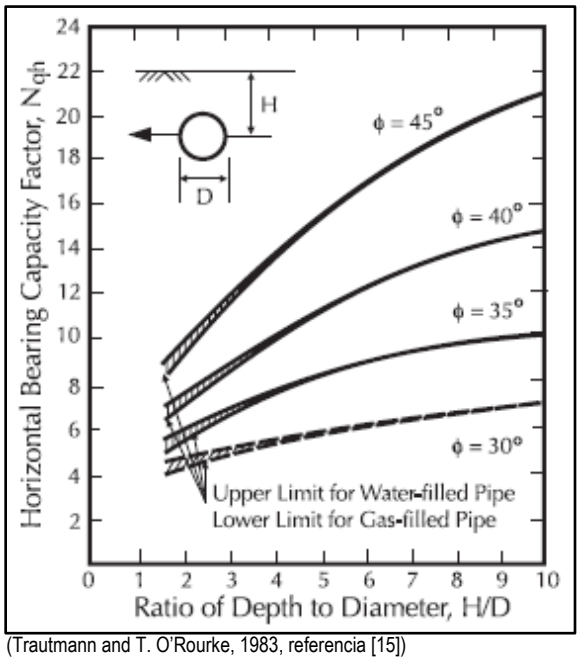
Los valores de las contantes a, b, c, d y e pueden ser obtenidos desde la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Valores de las constantes utilizadas en las ecuaciones 6-5 y 6-6.

Factor	ϕ	X	A	b	c	d	e
Nch	0°	H/D	6.752	0.065	-11.063	7.119	0
Nqh	20°	H/D	2.399	0.439	-0.03	0.001059	-0.00001754
Nqh	25°	H/D	3.332	0.839	-0.09	0.005606	-0.0001349
Nqh	30°	H/D	4.565	1.234	-0.089	0.004275	-0.00009159
Nqh	35°	H/D	6.816	2.019	-0.146	0.007651	-0.0001683
Nqh	40°	H/D	10.959	1.783	0.045	-0.005425	-0.0001153
Nqh	45°	H/D	17.658	3.309	0.048	-0.006443	-0.0001299

(ASCE,1984)

La Figura 6-4 muestras curvas obtenidas de forma empírica para determinar los factores N_{qh} y N_{ch} en tuberías que conducen agua o gas, en función de la profundidad a la que encuentra la tubería y de su diámetro. N_{ch} es equivalente a N_{qh} para ϕ=30°.



(Trautmann and T. O'Rourke, 1983, referencia [15])

Figura 6-4: Factor de soporte horizontal vs profundidad/diámetro

6.3. Suelos Licuables

Antes del terremoto del 2010 algunos profesionales creían que en Chile no se producía el fenómeno de licuefacción debido a que supuestamente la elevada cantidad de sismos que han azotado al país produjeron una densificación de los suelos. No obstante, revisando los antecedentes históricos disponibles, no cabe duda que los grandes terremotos de Chile han generado licuefacción, pero que no fue asociada a este fenómeno por su desconocimiento hasta antes de 1964. El terremoto del 27F dejó en evidencia un gran número de sitios donde ocurrió el fenómeno de licuefacción de suelos, evidenciándose más de 180 sitios entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos. Los principales patrones de daños incluyen la formación de grietas, asentamientos, desplazamiento lateral del suelo y formación de volcanes de arenas [referencia 30].

La licuefacción o asentamientos producen inestabilidad en el terreno ocasionando que éste se desplace en forma permanente y ejerza esfuerzos de importancia sobre las tuberías que están enterradas en él.

Para los suelos licuables, O'Rourke propuso en 1994 un factor de reducción "R_f" para una tubería sometida a un desplazamiento de suelo transversal, dado por (6-14):

$$R_f = \frac{N_{qh}}{K_c} \cdot \frac{1}{0.005(N_1)_{60}} \qquad \textbf{(6-14)}$$

Donde K_c es el factor de capacidad de carga para el suelo no drenado y $(N_1)_{60}$ es el valor del SPT (Ensayo de Penetración Estándar o Standard Penetration Test) corregido.

La reducción de rigidez en la interfase suelo-tubería es dada entonces por la rigidez de un suelo no licuable dividida por el factor de reducción R_f. Los resultados sugieren que la rigidez equivalente oscila en el rango 1/100 a 5/100 del suelo no licuable. Por lo tanto, la rigidez tanto longitudinal como transversal de una tubería en un suelo licuable puede ser tomada como el 3% de la rigidez de la tubería en el mismo suelo en condiciones óptimas.

Para un desplazamiento de suelo "δ" determinado, debido a la mayor rigidez, los esfuerzos y deformaciones serán mayores en el suelo no licuable que en uno licuable. Entonces, para el mismo tipo de suelo, la falla será más probable en el suelo licuable, pero por otro lado la tubería resistirá un mayor desplazamiento.

Como el propósito principal del documento es calcular el máximo desplazamiento permitido a la tubería en un suelo determinado antes de fallar, se supondrá que el suelo no ha sufrido licuefacción. Por lo tanto, se obtendrá un valor de desplazamiento menor al de un suelo licuable por la mayor resistencia que se opone al movimiento.

El criterio de falla para una tubería será cuando ésta fluya o se pandeé, para el caso de las tuberías continuas, o cuando sus uniones se separen y comiencen a filtrar agua, para el caso de las tuberías segmentadas. Estos criterios son analizados con mayor detalle en el siguiente capítulo.

7. Criterios de falla de tubería

En este capítulo se describen los criterios que indican cuando se considera que una tubería ha fallado. Se descarta el caso de fallas por corrosión debido que el propósito de este documento es el diseño de redes nuevas las que no presentan este problema. Cabe mencionar que se analizan tuberías que conforman largos tramos de conducción sin presencia de conexiones adicionales como: válvulas, tees, codos, etc.

Para el análisis de los criterios de falla se debe distinguir entre tuberías continuas y segmentadas. Las primeras son las tuberías que se encuentran unidas de forma fija, como las tuberías de acero soldadas o las tuberías de HDPE termofusionadas. Las tuberías segmentadas son aquellas que sus uniones no son fijas, como las conexiones espiga-campana; acerrojadas (que a pesar de tener un punto de fijación no es comparable con la resistencia del material de la tubería); etc. Este tipo de uniones están presentes en las tuberías de PVC y hierro dúctil.

En las tuberías continuas son comunes las roturas por tensión, las fallas por pandeo local debido a compresión axial y las fallas por flexión. Un caso poco común es la falla producida por un pandeo global de la tubería, este caso no se analizará debido que la profundidad típica a la cual se entierran las redes de tuberías “H” este tipo de falla no se produce.

En las tuberías segmentadas la falla más común es la separación o rotación de la unión lo que puede producir una separación total o filtraciones en la conducción.

En los siguientes subcapítulos se detallan los criterios de fallas para tuberías continuas y segmentadas.

7.1. Tuberías Continuas

Se analizarán las fallas más comunes que son rotura por tensión y pandeo local por compresión.

7.1.1. Falla por tensión

Una tubería continua libre de corrosión, cuyas juntas estén soldadas o termofusionada como en el caso de las tuberías de Acero o HDPE respectivamente, es capaz de resistir grandes deformaciones antes de la rotura debido a su gran ductilidad.

Si bien es frecuente que estas tuberías resistan grandes deformaciones incluso más allá de la fluencia, en el diseño de redes de agua potable se considera que la presión interna máxima admisible no debe ser mayor al 50-60% de la fluencia del material, es decir, con un factor de seguridad cercano a 2(dos) tanto para tuberías de Acero como HDPE.

Si se desea analizar el rango post fluencia, para el caso del acero, uno de los modelos más utilizados es el propuesto por Ramberg y Osgood (1943), el cual corresponde a la ecuación (7-1).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}\left[1 + \frac{n}{1+r}\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^r\right] \quad \textbf{(7-1)}$$

Donde:

ε: deformación post fluencia
σ: esfuerzo al que se somete la tubería
E: módulo de elasticidad del acero
σ_y: esfuerzo de fluencia
n y r: parámetros de Ramberg and Osgood.

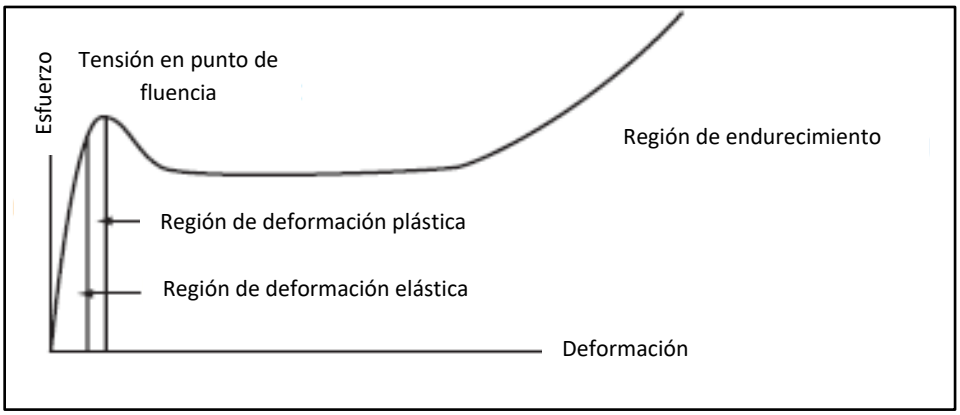
Los parámetros n y r se presentan en la Tabla 7-1 para distintas resistencias del acero.

Tabla 7-1: Parámetros de Ramberg y Osgood para acero en fluencia.

Esfuerzo de fluencia en (kgf/cm2)	2315	3161	3651	4211	5272
N	10	15	9	10	5.5
r	100	32	10	12	16.6

Ramberg and Osgood (1943)

Para el caso del HDPE, el nivel de incursión que presenta en el rango no lineal es bastante grande, llegando incluso a 400 a 800% en la relación fluencia y ruptura última. La Figura 7-1 muestra la curva esfuerzo versus deformación del polietileno de alta densidad. La región de deformación elástica en el Gráfico puede llegar a una deformación del 30%.



(AWWA M55, first edition, referencia [2])

Figura 7-1: Gráfico esfuerzo versus deformación del polietileno.

Como el propósito principal del tema tratado es ayudar en el diseño de futuras redes, se tomará como criterio para la falla en tensión, para tuberías sometidas a DPS, un esfuerzo igual a la fluencia del material.

7.1.2. Pandeo local

El pandeo se refiere a una estructura que al ser sometida a esfuerzos de flexión y compresión pasa de un estado estable a un estado inestable. El pandeo local, en este caso en particular, es el que provoca una deformación local en la pared de la tubería. Muchas veces la presión interna de la tubería y la altura de suelo sobre ella impiden que este tipo de falla ocurra.

El valor teórico para la deformación de pandeo está dado por la siguiente expresión, propuesta por Southwell en 1914:

$$\varepsilon_{cr} \leq 0.6 * \frac{t}{R} \tag{7-2}$$

Hall y Newmark (1977), basados en pruebas experimentales en paredes cilíndricas, obtuvieron que la falla se inicia generalmente cuando la deformación unitaria alcanza entre un 25% y un 33% de esta deformación teórica, es decir:

$$0.15 * \frac{t}{R} \leq \varepsilon_{cr} \leq 0.2 * \frac{t}{R} \tag{7-3}$$

Donde:

t: espesor de la pared de la tubería

R: radio de la tubería.

Estos límites son utilizados en tuberías que transportan sustancias como gas, en las cuales no puede existir ningún riego de fisuras en la tubería. Para tuberías de transporte de agua, como una filtración tiene consecuencias menos catastróficas, se pueden aceptar deformaciones criticas menos restrictivas. Aceptándose por distintos autores una deformación critica de:

$$\varepsilon_{cr} \leq 0.88 * \frac{t}{R} \tag{7-4}$$

Sin embargo, existen líneas de conducción vitales que son de gran diámetro y las presiones en su interior son elevadas, en caso de colapsar un de estas tuberías vitales puede ocasionar una catástrofe si se encuentra en zonas urbanas donde existan estructura o tránsito cercano de personas. La Tabla 7-2 propone límite de deformación critica según el diámetro de la tubería.

Tabla 7-2: Deformación crítica permitida antes de fallar por pandeo local según diámetro de la tubería.

Diámetro tubería	$\varepsilon_{cr} \leq$
D < 400 [mm]	$0.88 * \frac{t}{R}$
D ≥ 400 [mm]	$0.6 * \frac{t}{R}$

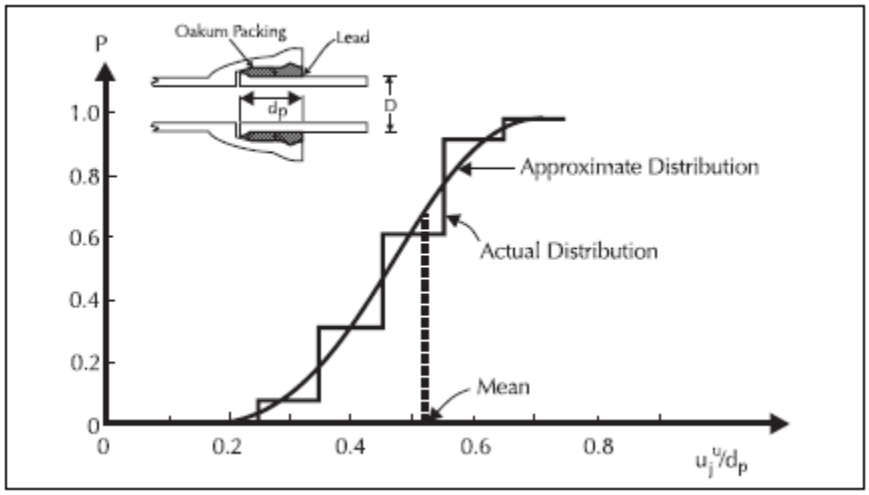
7.2. Tuberías Segmentadas

En el caso de tubería segmentadas, los criterios de fallas no han sido tan ampliamente estudiado como en tuberías continuas, la falla en las uniones de los segmentos de tubería tiene gran relación con el tipo de junta y esta debe ser evaluada en cada caso.

En el capítulo 5 se estudió la máxima apertura de las juntas. Sin embargo, las uniones pueden comenzar a filtrar mucho antes que las tuberías se separen. El Hmadi y O'Rourke, se basaron en pruebas de laboratorio para estimar una distribución acumulada para las fugas en las juntas como una función normalizada de la apertura, u_j, por la profundidad de la unión, d_p.

Como se muestra en la Figura 7-2, el valor medio de la apertura correspondiente a la distribución acumulada de fuga es de $0.52d_p$. Por lo tanto, El Hmadi y O'Rourke al igual que varios autores están de acuerdo con establecer como criterio de falla para separación de juntas, es decir cuando la tubería comenzará a filtrar, una apertura correspondiente al 50% de la profundidad de la junta.

Independiente del tipo de unión utilizada, debe ser estudiada la tolerancia de desplazamiento de la unión antes de fallar. Esta tolerancia generalmente es dada por el fabricante, la cual se comparará con las deformaciones máximas esperadas debido al DPS del suelo.



(El Hmadi y O'Rourke, referencia [8])

Figura 7-2: Función de distribución acumulada de fuga en las juntas de tuberías segmentadas.

8. Materiales de tuberías utilizados en redes de conducción

El siguiente capítulo tiene por objetivo realizar un barrido de las tuberías y uniones más utilizadas en el mercado nacional en conducción de agua potable.

Los materiales analizados serán el: Acero, HDPE, Hierro Dúctil y PVC. Los dos primero, se consideran tramos continuos ya que la unión entre tuberías es posible realizarla por medio de soldadura y termofusión respectivamente, sin la necesidad de contar con accesorios externos o mecanismos de unión en los extremos de los tubos (las tuberías de acero no soldadas, que utilicen juntas universales o similares, deberán ser analizadas como tuberías segmentadas). Los dos últimos, sí necesitan algún mecanismo o pieza de ensamblaje entre las tuberías, por lo tanto, serán considerados como tramos segmentados.

8.1. Tuberías de Acero

La norma AWWA C200 entrega información respecto a la resistencia ultima a tracción del acero y la mínima resistencia a la fluencia de todos los tipos de aceros utilizados en conducción de agua. Donde los límites de fluencia varían desde los 21.1 a los 38.7 [kg/mm2]. La Tabla 8-1 muestra las propiedades del Acero A-36, uno de los más utilizados en conducciones de agua potable. Otra norma referenciada en el país para conducciones con tuberías de acero es la API-5L.

Tabla 8-1: Parámetros del Acero A-36.

Parámetro	Valor
Fluencia	25.3 $[\mathrm{kg/mm^2}]$
Deformación de fluencia	0.12 [%]

En el Anexo G se presenta un catálogo de Tubexa con los diámetros y espesores disponibles en Acero A-36, variando desde los 48 a los 2032 [mm] en el caso de los diámetros y de los 1.5 a 20 [mm] para los espesores. El catálogo indica la presión de prueba del acero según las dimensiones de tubería, esta presión de prueba se determina según (8-1).

$$P = \frac{200 \cdot S \cdot e}{D} \left[\frac{kg}{mm^2}\right] \quad \textbf{(8-1)}$$

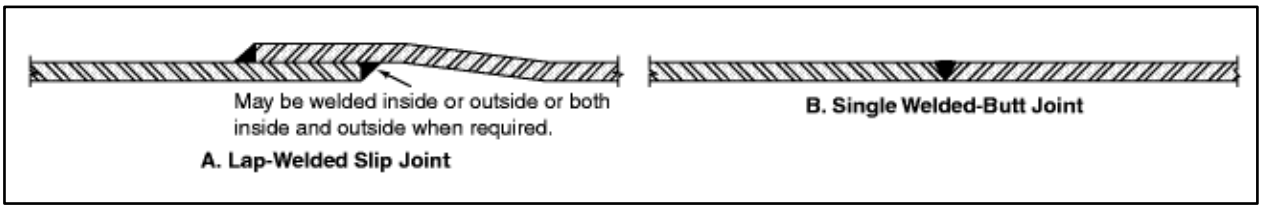
$$S = 0.75 \cdot E \quad \textbf{(8-2)}$$

Donde:

E: límite de fluencia en [kg/cm2]
e: espesor del tubo en [mm]
D: diámetro exterior del tubo en [mm]

8.1.1. Junta soldada

A pesar de haber distintos tipos de juntas disponibles para tuberías de acero, el tipo de junta a considerar entre las tuberías será la soldada, ya que es la mas común en los tramos de largas conducción por su gran resistencia. La soldadura debe soportar esfuerzos superiores a los que resisten las paredes del tubo, por lo que no debe fallar esta antes que la tubería. La Figura 8-1 muestra las formas en que se pueden soldar los tubos.



(Manual AWWA, M11, referencia [1])

Figura 8-1: Juntas soldadas en tuberías de acero.

La soldadura de la Figura 8-1 (A) esta restringida para grandes diámetros, ya que es necesario que un operador ingrese al tubo a realizar la unión.

8.2. Tuberías de HDPE

Las tuberías de polietileno son ampliamente utilizadas para la conducción de agua potable, con el paso del tiempo y el avance en la tecnología, se han ido fabricando tuberías cada vez más resistentes a las altas presiones a las cuales serán sometidas.

Tabla 8-2: Propiedades tuberías de HDPE PN200.

Propiedades	Valor	Unidad	Norma
Densidad	1060	Kg/m3	ISO 1183/ASTM D792
Módulo de elasticidad	2300	MPa	ISO 527-4/ASTM D638
Límite de fluencia	66,8	MPa	ISO 6259/ASTM D638
Deformación de fluencia	2.9	%	
MRS	20	MPa	ISO 9080

Tabla 8-3: Propiedades tuberías de HDPE PN100.

Propiedades	Valor	Unidad	Norma
Densidad	959	Kg/m3	ISO 1183/ASTM D792
Módulo de elasticidad	1400	MPa	ISO 527-4/ASTM D638
Límite de fluencia	25	MPa	ISO 6259/ASTM D638
Deformación de fluencia	1.79	%	
MRS	10	MPa	ISO 9080

Tabla 8-4: Propiedades tuberías de HDPE PN80.

Propiedades	Valor	Unidad	Norma
Densidad	955	Kg/m3	ISO 1183/ASTM D792
Módulo de elasticidad	1000	MPa	ISO 527-4/ASTM D638
Límite de fluencia	21	MPa	ISO 6259/ASTM D638
Deformación de fluencia	2.1	%	
MRS	8	MPa	ISO 9080

La tubería de HDPE de PE100 es actualmente la más utilizada en desmedro de la PE80, que se sigue utilizando, pero en menor medida. Más aún, actualmente se está incorporando al mercado tuberías de PE200 especialmente para conducciones de grandes diámetros. La Tabla 8-2, Tabla 8-3 y Tabla 8-4 muestra un resumen de las propiedades de éstos tres tipos de HDPE.

El Anexo H, muestra un catálogo de Krah con los diámetros y espesores disponibles para éstos tres tipos de HDPE, donde se indica la resistencia nominal a la que puede ser sometida la tubería y el espesor mínimo que debe tener la tubería para poder soportar esa presión de trabajo según el diámetro de la misma. El espesor mínimo de acuerdo al criterio ISO 4477, esto es:

$$\sigma = \frac{PN(D-e)}{2e} \qquad \textbf{(8-3)}$$

Donde:

σ= Tensión de diseño del material= MRS/C en [MPa]; C=1.25 para PE80 y PE100; C=1.7 para PE200.
D= Diámetro de tubería en [mm].
e= Espesor mínimo de la pared del tubo en [mm].
PN= Presión nominal de la tubería [bar].

8.2.1. Juntas Fijas

Para considerar una tubería de HDPE como continua debe ser unida mediante termofusión, que consiste básicamente en someter las tuberías a una determinada temperatura y tiempo tal que el material entre en fusión. Luego se unen las superficies fundidas bajo cierta presión y al enfriar forman un cuerpo único que mantiene las mismas propiedades y características que los materiales originales, resultando una junta que es incluso más resistente que el mismo material. Los métodos de termofusión más utilizados para grandes diámetros son la Soldadura a Tope (butt fusión) y Soldadura por Electrofusión.

8.3. Tuberías de Hierro Dúctil

Las Hierro Dúctil no son tan ampliamente utilizado en Chile como el Acero o HDPE, pero de igual forma se estudiará su comportamiento prestando especial atención a los tipos de uniones utilizadas en grandes conducciones, para verificar si es en estos puntos donde ocurrirá primero la falla. La Tabla 8-5 muestra las propiedades de las tuberías de Hierro Dúctil.

En el anexo I, se muestra un catálogo con los diámetros disponibles de HD indicando las presiones admisibles según clase y tipo de junta. Se observa que las tuberías se clasifican con un coeficiente k, este coeficiente es utilizado para designar la clase del espesor según (8-4).

Tabla 8-5: Propiedades tuberías de Hierro Dúctil.

Propiedad	Valor	Unidad
Resistencia Ultima a la tracción	420	MPa
Limite elástico	300	MPa
Alargamiento mínimo a la rotura	7-10	%
Módulo de elasticidad	170000	MPa
Deformación de fluencia	0.176	%

$$e = k(0{,}5 + 0.001DN) \tag{8-4}$$

Donde:

DN: diámetro nominal de la tubería

e: espesor en [mm].

Nota: Las excepciones para la fórmula general son:

- Para tuberías DN 80 clase k7: e= 4.3+0.008DN
- Para tuberías DN 100 hasta DN 300 clase k7: e= 4.75+0.003DN
- Para tuberías DN 80 hasta DN 200 clase k9: e= 5.8+0.003DN

El valor mínimo de espesor para tuberías son 6 [mm].

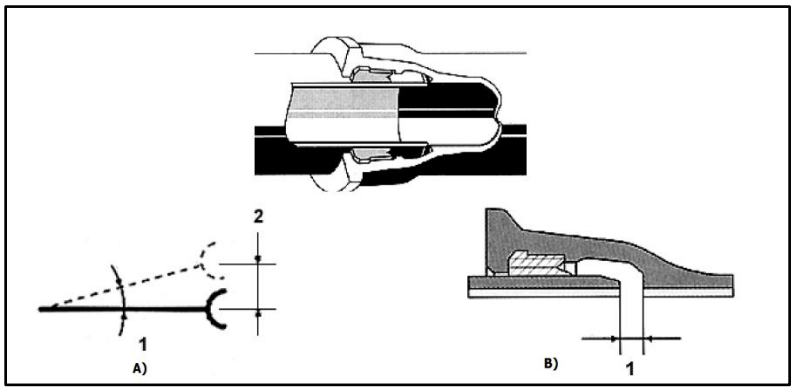
Los tipos de tuberías ampliamente utilizadas y fabricadas en HD son las k7 y k9, cada una tiene asociado un tipo de unión. Los tipos de uniones utilizadas en grandes conducciones son detallados a continuación.

8.3.1. Junta elástica (JGS)

La junta elástica, es una junta automática compatible con tuberías clase k7 y k9. La unión se logra durante el montaje por compresión radial de un aro de goma introduciendo la espiga de un tubo en el enchufe del otro. Sus características principales son:

- Facilidad y rapidez de instalación
- Resistencia a altas presiones
- Movilidad axial y desviación angular
- Resistencia a la presión externa de 0.3 MPa.

La Figura 8-2, muestra la junta y rango de desplazamiento. La Figura 8-2 A) muestra el desplazamiento y desviación angular permitido, transversal al eje de la tubería. La Figura 8-2 B) muestra el desplazamiento longitudinal permitido en la junta.



(Saint-Gobain Canalizacao, LCA 2003, referencia [28])

Figura 8-2: Junta elastica y desplazamientos admisibles.
(A): 1- Desviación 2- Desplazamiento, B): 1-Desplazamiento)

Tabla 8-6: Rango de desplazamiento permito en dirección transversal.

DN	Desviación admitida durante la instalación	Desplazamiento
	grados	cm
80 a 150	5°	52
200 a 300	4°	42
350 a 600	3°	32
700 a 800	2°	25
900 a 1200	1° 30'	19
1400 a 2000	1° 30'	21

(Saint-Gobain Canalizacao, LCA 2003)

Tabla 8-7: Rango de desplazamiento permitido en dirección longitudinal.

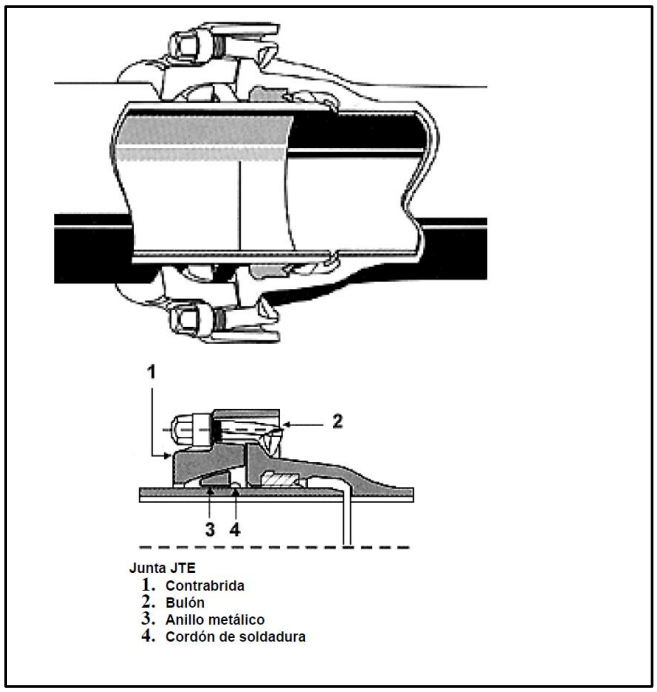
DN	Juelga axial	
	Alineado	Desviado
	mm	mm
80	30	22
100	30	18
150	30	18
200	30	20
250	30	15
300	30	10
350	38	15
400	38	15
450	38	12
500	38	10
600	30	0
700	30	15
800	30	8
900	30	8
1000	38	12
1200	38	7
1400	90	52
1500	100	52
1800	80	48
2000	80	25

(Saint-Gobain Canalizacao, LCA 2003)

8.3.2. Junta Acerrojada Externa (JTE)

El principio de la junta consiste en trasferir los esfuerzos axiales de un elemento de la red hacia el siguiente lo que impide el desmontaje del conjunto. Esta junta está disponible solo para tuberías clase k9.

La junta permite repartir en uno o varios tubos los empujes axiales que aparecen en determinado punto (ver Figura 8-3), el traslado de esfuerzo se hace mediante un dispositivo mecánico incluido en la junta.



(Saint-Gobain Canalizacao, LCA 2003, referencia [28])

Figura 8-3: Junta Acerrojada Externa.

Esta unión está disponible para tuberías clase k9 con DN desde 300 a 1200. La Tabla 8-8 indica los desplazamientos admisibles de la junta.

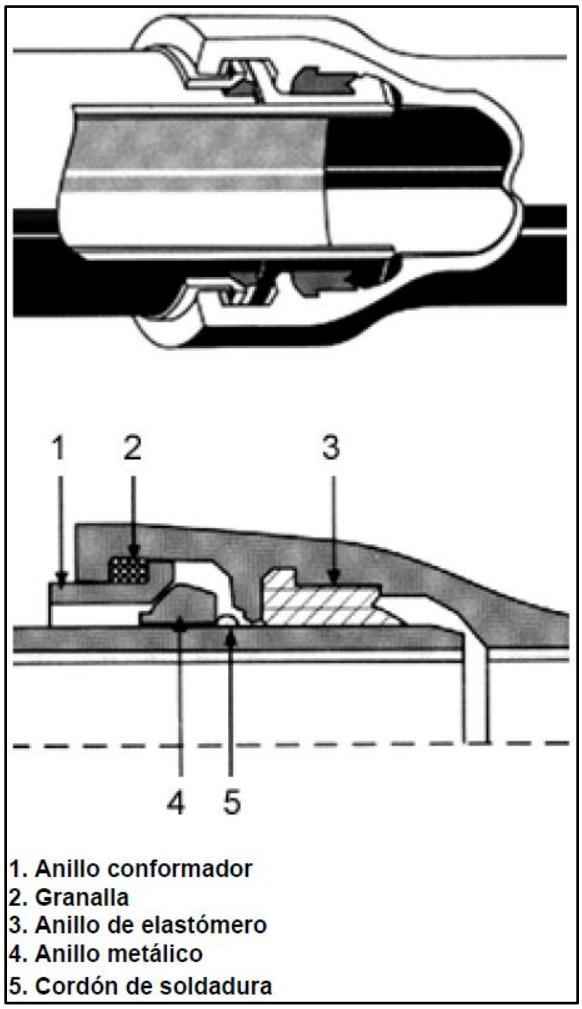
Tabla 8-8: Desplazamiento admisible junta Externa (JTE)

DN	Desviación admitida durante la instalación	Desplazamiento
	grados	cm
300	4°	42
350 a 600	3°	32
700 y 800	2°	25
900 a 1200	1° 30'	19

8.3.3. Junta Pamlock (JPK)

La junta Pamlock es especialmente diseñada para grandes diámetros, desde DN 1400 a 2000, la junta se basa en el principio de distribución de esfuerzos axiales a lo largo de la tubería.

El conjunto transmite los esfuerzos axiales a través de la granalla (ver Figura 8-4) situada entre el anillo conformador y el enchufe de los tubos. La granalla (trozos pequeños de metal) es introducida ahí por un sistema de vibración, asegurando la distribución uniforme de los esfuerzos axiales en toda la superficie interna de la junta.



(Saint-Gobain Canalizacao, LCA 2003, referencia [28])

Figura 8-4: Junta Pamlock.

Esta junta permite una desviación angular de 14 cm para DN entre 1400 y 1600, y 7 cm para DN entre 1800 y 2000.

8.4. Tuberías de PVC

Las tuberías de PVC desde su aparición a fines de la década de los 30 han representado un importante aporte como elementos para la conducción. Esto último, producto de sus extraordinarias propiedades que las convierten en la alternativa más económica dentro de las redes de agua potable.

Sin embargo, los diámetros y presiones de trabajos en grandes conducciones no son cubiertas por este material, ya que su diámetro máximo de fabricación es de 400 mm. La Tabla 8-9 indica las principales propiedades del PVC.

Tabla 8-9: Propiedades PVC.

Parámetros	Valores
Limite elástico en tracción	200 kg/cm2
Deformación de fluencia	0.667 %
Resistencia a la tracción	450 a 550 kgf/cm2
Resistencia a la compresión	610 kgf/cm2
Módulo de elasticidad	30000 kgf/cm2
Resistencia al aplastamiento	Hasta 0,4 diámetros sin grietas o ruptura
Elongación hasta la ruptura	15%
Resistencia al impacto	6 kgf/m

El anexo J, muestra un catálogo con los diámetros y espesores disponibles en PVC según su clase, el que se calcula según (8-5).

$$C = 20\sigma \frac{e}{D-e} \tag{8-5}$$

Donde:

C= Clase Hidráulica (kg/cm2)
σ= Tensión de diseño (kg/cm2)
e= Espesor de pared mínimo (mm)
D= Diámetro externo (mm)

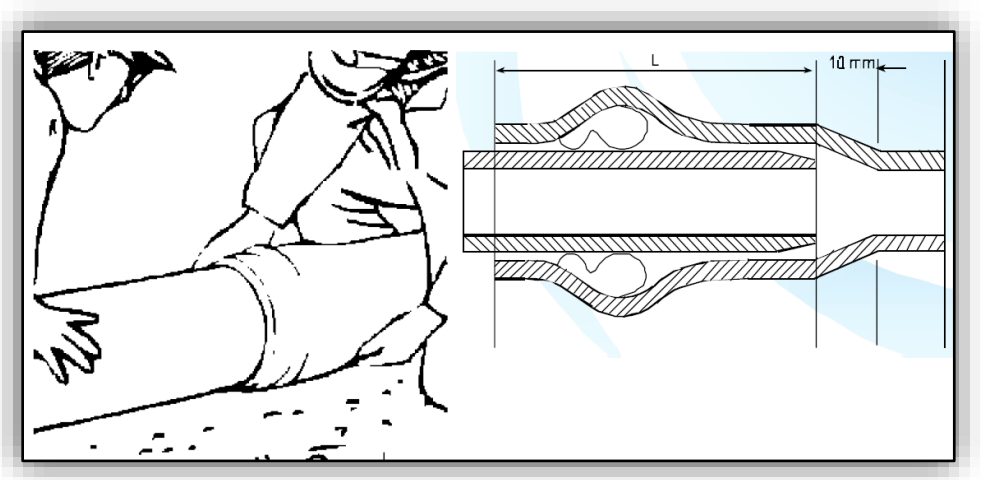
Las tuberías de PVC se pueden montar con dos tipos de uniones, éstas son: Unión a cementar (diámetros hasta 200 mm) y uniones Anger (desde 63 mm).

La Unión Anger ofrece una estanqueidad bajo un amplio rango de temperatura o presión. Además de proveer la más fácil, simple y rápida instalación disponible.

8.4.1. Unión Anger o Anillo de Goma

En la actualidad y después de larga experiencia en todo el mundo, se ha demostrado como eficiente y seguro el uso de los anillos de goma. Dentro de los diferentes tipos, la Thyssen Plastik Anger de Alemania desarrolló un sistema que se utiliza desde hace varios años en todo el mundo conocido como unión Anger, el cual se ha adoptado para los diámetros entre 63 y 400 mm.

Los tubos se ensamblan por presión manual o mecánica con algún sistema de ayuda como lubricantes, la Figura 8-5 muestra éste tipo de unión.



(Boletín técnico Vinilit, LP, referencia [29])

Figura 8-5: Unión Anger para tubos de PVC.

La Tabla 8-10 muestra los largos mínimos de la unión según su diámetro

Tabla 8-10: Largo mínimo, L, de la unión Anger.

Diám. mm.	63	75	90	110	125	140	160	200	250	315	355	400
Largo mm	94	98	107	114	125	126	139	150	174	183	215	235

(Boletín técnico Vinilit, LP, referencia [29])

9. Implementación del modelo predictivo de la deformación en tuberías debido a desplazamientos del suelo transversales y/o longitudinales a su eje.

Con la información presentada en los capítulos previos se implementó un modelo en un archivo Excel, el cual entrega la deformación en una tubería de cualquier material, diámetro y espesor ante desplazamientos del terreno transversales o longitudinales a su eje, indicando si ésta fluye o se pandea frente a tal evento. Los desplazamientos pueden ser de diferentes magnitudes según el tamaño de falla introducida al modelo. El análisis se puede realizar en cualquier tipo de suelo especificado mediante su densidad y parámetros típicos de cohesión y ángulo de fricción.

Para el análisis de las tuberías se solicitan los siguientes datos de entrada: módulo de elasticidad del material, esfuerzo de fluencia, diámetro y espesor de la tubería. También se requieren datos referentes a la magnitud del evento sísmico mediante los siguientes parámetros: dimensiones de la zona de falla del terreno y desplazamiento del suelo. Por último, se requieren valores típicos o representativos de este tipo de obras como: factor de fricción entre el material y el suelo, coeficiente de presión lateral del suelo en reposo y profundidad de entierro hasta la clave de la tubería.

9.1. Descripción y operación del modelo implementado

A continuación, se detalla las pestañas del archivo Excel y como se utiliza cada una:

1) La primera pestaña se llama “Datos de Entrada”, donde los datos que deben ser ingresados están marcados en color rojo. Lo primero que se solicita es la densidad típica del suelo que se quiere analizar “γ” en $[N/m^3]$ y la profundidad típica a la clave de la tubería “H” en [m].

   Luego se observa un cuadro de color celeste con las formulas, parámetros y correlaciones que serán utilizadas de forma interna para calcular la resistencia transversal y longitudinal del suelo tal como se estudió en el capítulo 6.

   Más abajo hay un cuadro donde se ingresan los parámetros del suelo que se requiere estudiar, en el cual se da la opción de trabajar con suelos granulares, cohesivos o una combinación de ambos. Se puede ingresar hasta 24 tipos diferentes de suelos y se hace referencia a ellos mediante un número “TS”. Este número “TS” será solicitado más adelante para entregar los valores de deformación de la tubería enterrada en el suelo especificado. La Figura 9-1, muestra la primera parte de la pestaña “Datos de entrada” con lo descrito hasta este punto.

Resistencia lateral transversal y longitudinal última del suelo

Parámetros de suelo	
$\gamma[N/m^3]$	19000
Parámetros tubería	
H[m]	1.2

Ko[-]	1

Rev.	k
Cemento	1
H.D.	0.9
Pint. Epox.	0.8
Acero liso	0.7
HDPE	0.6
PVC	0.5

Cálculos de "tu"

$$t_u = \pi Dac + \frac{\pi}{2} D\gamma H(1+k_o)\tan k\emptyset$$

$$a = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2+1} + \frac{0.695}{c^3+1}$$

Cálculo de "pu"

$$p_u = N_{ch} cD + N_{qh}\gamma HD$$

$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9$$

$$N_{qh} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$$

Deformación crítica

$$\varepsilon_{cr} \geq f \cdot \frac{2D}{t}$$

D [m]		f
D≥	0.4	0.6
D<	0.4	0.88

Factor	ϕ	x	a	b	c	d	e
Nch	0	H/D	6.752	0.065	-11.063	7.119	0
Nqh	0	H/D	0	0	0	0	0
Nqh	5	H/D	0.6	0.11	-0.008	0.000265	-4.4E-06
Nqh	15	H/D	1.0799	0.329	-0.023	0.000795	-1.3E-05
Nqh	20	H/D	2.399	0.439	-0.03	0.001059	-1.8E-05
Nqh	25	H/D	3.332	0.839	-0.09	0.005606	-0.00013
Nqh	30	H/D	4.565	1.234	-0.089	0.004275	-9.2E-05
Nqh	35	H/D	6.816	2.019	-0.146	0.007651	-0.00017
Nqh	40	H/D	10.959	1.783	0.045	-0.00543	-0.00012
Nqh	45	H/D	17.658	3.309	0.048	-0.00644	-0.00013

Tipos de suelos (TS) considerados

	TS	ϕ[°] (c=0)		TS	c [kg/cm2] (ϕ=0)		TS	ϕ[°]	c [kg/cm2]
GRANULARES	1	5	COHESIVOS	9	0.02	GRANULAR-COHESIVOS	17	15	0.02
	2	15		10	0.05		18	25	0.02
	3	20		11	0.1		19	15	0.05
	4	25		12	0.2		20	25	0.05
	5	30		13	0.25		21	15	0.1
	6	35		14	0.35		22	25	0.1
	7	40		15	0.4		23	15	0.25
	8	45		16	0.5		24	25	0.25

Figura 9-1: Pestaña "Datos de entrada", primera parte.

La última parte de la pestaña, está compuesta por tablas en las que se ingresaron la mayor parte de los diámetros disponibles en Chile para los distintos materiales de tuberías que son comercializados. Estos materiales son: Acero, HDPE, Hierro Dúctil y PVC. Además, esta tabla muestra la resistencia transversal "pu" y longitudinal "tu" que oponen a la tubería cada uno de los 24 tipos de suelo "TS" ingresados previamente. Conjuntamente, se puede observar el valor de H/D, Nqh y Nch, parámetros necesarios para ingresar en las correlaciones que calculan la resistencia del suelo.

A modo de ilustración, la Figura 9-2 muestra una tabla con lo descrito anteriormente donde se calculan los parámetros correspondientes para una tubería de hierro dúctil. En la figura se muestran los cálculos para una tubería fundada en los tres primeros tipos de suelo ingresados (TS).

TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL

TIPO DE SUELO			1				2				3			
DN	D [m]	x= H/D	Nqh	Nch	Pu [N/m]	tu [N/m]	Nqh	Nch	Pu [N/m]	tu [N/m]	Nqh	Nch	Pu [N/m]	tu [N/m]
80	0.08	15.0000	1.1226	0	2.048E+03	4.510E+02	2.8598	0	5.216E+03	1.376E+03	4.9202	0	8.974E+03	1.862E+03
100	0.1	12.0000	1.1351	0	2.588E+03	5.637E+02	2.8180	0	6.425E+03	1.720E+03	4.8132	0	1.097E+04	2.327E+03
150	0.15	8.0000	1.0857	0	3.713E+03	8.456E+02	2.5933	0	8.869E+03	2.579E+03	4.4614	0	1.526E+04	3.491E+03
200	0.2	6.0000	1.0236	0	4.667E+03	1.127E+03	2.3806	0	1.086E+04	3.439E+03	4.1590	0	1.897E+04	4.655E+03
250	0.25	4.8000	0.9707	0	5.533E+03	1.409E+03	2.2101	0	1.260E+04	4.299E+03	3.9228	0	2.236E+04	5.818E+03
300	0.3	4.0000	0.9278	0	6.346E+03	1.691E+03	2.0754	0	1.420E+04	5.159E+03	3.7383	0	2.557E+04	6.982E+03
350	0.35	3.4286	0.8932	0	7.128E+03	1.973E+03	1.9678	0	1.570E+04	6.019E+03	3.5917	0	2.866E+04	8.146E+03
400	0.4	3.0000	0.8648	0	7.887E+03	2.255E+03	1.8803	0	1.715E+04	6.879E+03	3.4732	0	3.168E+04	9.309E+03
450	0.45	2.6667	0.8412	0	8.631E+03	2.537E+03	1.8081	0	1.855E+04	7.738E+03	3.3755	0	3.463E+04	1.047E+04
500	0.5	2.4000	0.8214	0	9.364E+03	2.819E+03	1.7476	0	1.992E+04	8.598E+03	3.2939	0	3.755E+04	1.164E+04
600	0.6	2.0000	0.7900	0	1.081E+04	3.382E+03	1.6521	0	2.260E+04	1.032E+04	3.1652	0	4.330E+04	1.396E+04
700	0.7	1.7143	0.7664	0	1.223E+04	3.946E+03	1.5802	0	2.522E+04	1.204E+04	3.0686	0	4.897E+04	1.629E+04
800	0.8	1.5000	0.7479	0	1.364E+04	4.510E+03	1.5243	0	2.780E+04	1.376E+04	2.9935	0	5.460E+04	1.862E+04
900	0.9	1.3333	0.7331	0	1.504E+04	5.074E+03	1.4795	0	3.036E+04	1.548E+04	2.9335	0	6.019E+04	2.095E+04
1000	1	1.2000	0.7209	0	1.644E+04	5.637E+03	1.4429	0	3.290E+04	1.720E+04	2.8844	0	6.576E+04	2.327E+04
1200	1.2	1.0000	0.7023	0	1.921E+04	6.765E+03	1.3867	0	3.794E+04	2.064E+04	2.8090	0	7.686E+04	2.793E+04
1400	1.4	0.8571	0.6886	0	2.198E+04	7.892E+03	1.3455	0	4.295E+04	2.408E+04	2.7539	0	8.790E+04	3.258E+04
1500	1.5	0.8000	0.6830	0	2.336E+04	8.456E+03	1.3288	0	4.544E+04	2.579E+04	2.7315	0	9.342E+04	3.491E+04
1600	1.6	0.7500	0.6781	0	2.474E+04	9.020E+03	1.3140	0	4.794E+04	2.751E+04	2.7118	0	9.893E+04	3.724E+04
1800	1.8	0.6667	0.6699	0	2.749E+04	1.015E+04	1.2892	0	5.291E+04	3.095E+04	2.6786	0	1.099E+05	4.189E+04
2000	2	0.6000	0.6632	0	3.024E+04	1.127E+04	1.2692	0	5.788E+04	3.439E+04	2.6518	0	1.209E+05	4.655E+04

Figura 9-2: Parámetros correspondientes a los tres primeros tipos de suelo, en tuberías de Hierro Dúctil.

2) Luego de la pestaña “Datos de entrada” continúan cuatro pestañas que se trabajan de forma idéntica, cada una lleva el nombre del material que se analiza, estas son: “HDPE”, “ACERO”, “Hierro Dúctil” y “PVC”.

   Lo primero que se solicita al ingresar en alguna de ellas son el esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad del material analizado. En el caso del HDPE hay tres tablas diferentes, una para cada tensión mínima exigida (PE80, PE100 y PE200), ya que cada una tiene diferente fluencia y elasticidad. Luego se debe ingresar el número “TS” del suelo que se quiere estudiar, el que tiene un rango de 1 a 24 correspondientes a los 24 tipos de suelos ingresados previamente. También se piden parámetros referentes a la magnitud del sismo mediante el ancho transversal de la falla “W”, si se quiere analizar un DPS transversal al eje de la tubería, o el largo longitudinal de la falla “L” y su desplazamiento “δ”, si se analiza un DPS longitudinal al eje de la tubería.

   La Tabla 9-1 ejemplifica lo descrito, en lo particular, se muestra la tabla correspondiente a la pestaña “HDPE” para tuberías de tensión mínima PE80.

Tabla 9-1: Parámetros de entrada en la pestaña "HDPE" para una tensión mínima PE80.

Propiedades PE80	
fy[kg/cm2]	2.10E+02
Es[N/m2]	1.00E+09
TS	18
W [m]	50
L [m]	10
δ [m]	0.5

Luego de ingresado estos datos, inmediatamente bajo la Tabla 9-1, viene otra de mayor tamaño donde se muestran todos los parámetros de la tubería, estos son: diámetro externo e interno, espesor, inercia, área, tipo de suelo en el que está enterrada y la resistencia transversal y

longitudinal que opone el suelo a la tubería según sus dimensiones. El único valor que se ingresa aquí son los espesores disponibles para los diferentes diámetros de tuberías o los mínimos espesores requeridos para cumplir con la presión máxima nominal especificada al comercializar el material.

Tabla 9-2: Fragmento de la tabla correspondiente a la pestaña "ACERO" donde se muestran todas las propiedades de la tubería en estudio.

ECUACIONES UTILIZADAS								
TUBERIAS CONTINUAS								
TS	Dext [pulg]	Dext [m]	e [mm]	Dint [m]	Pu [N/m]	tu [N/m]	Inercia [m4]	Área [m2]
23	2	0.048	1.5	0.045	12478.780	3855.786	6.514E-08	2.191E-04
		0.048	2	0.044			8.686E-08	2.890E-04
23	3	0.076	1.5	0.073	19655.637	6104.995	2.586E-07	3.511E-04
		0.076	2	0.072			3.448E-07	4.650E-04
23	4	0.102	2	0.098	25539.678	8193.545	8.335E-07	6.283E-04
		0.102	3	0.096			1.250E-06	9.331E-04
		0.102	4	0.094			1.667E-06	1.232E-03
23	4	0.1143	2	0.1103	28209.933	9181.591	1.173E-06	7.056E-04
		0.1143	3	0.1083			1.759E-06	1.049E-03
		0.1143	4	0.1063			2.346E-06	1.386E-03
23	5	0.133	2	0.129	32163.570	10683.741	1.848E-06	8.231E-04
		0.133	3	0.127			2.772E-06	1.225E-03
		0.133	4	0.125			3.696E-06	1.621E-03
		0.133	5	0.123			4.619E-06	2.011E-03
		0.133	6	0.121			5.543E-06	2.394E-03
23	5	0.1413	2	0.1373	33882.669	11350.470	2.216E-06	8.752E-04
		0.1413	3	0.1353			3.324E-06	1.303E-03
		0.1413	4	0.1333			4.431E-06	1.725E-03
		0.1413	5	0.1313			5.539E-06	2.141E-03
		0.1413	6	0.1293			6.647E-06	2.550E-03
23	6	0.152	2	0.148	36069.946	12209.989	2.758E-06	9.425E-04
		0.152	3	0.146			4.137E-06	1.404E-03
		0.152	4	0.144			5.516E-06	1.860E-03
		0.152	5	0.142			6.895E-06	2.309E-03
		0.152	6	0.14			8.275E-06	2.752E-03
23	6	0.1683	2	0.1643	39344.879	13519.350	3.744E-06	1.045E-03
		0.1683	3	0.1623			5.616E-06	1.558E-03
		0.1683	4	0.1603			7.488E-06	2.065E-03
		0.1683	5	0.1583			9.360E-06	2.565E-03
		0.1683	6	0.1563			1.123E-05	3.059E-03

La Tabla 9-2 muestra un fragmento de la tabla presente en la pestaña “ACERO” para ilustrar lo descrito anteriormente. Solo se muestra un rango de todos los diámetros disponibles en acero, los que se pueden ver en su totalidad en el archivo Excel. Los valores de las fuerzas

resistentes del suelo “pu” y “tu” son las correspondientes al suelo 23 ingresado, el que se puede revisar en la Figura 9-1.

La tabla continúa hacia su derecha y se encuentra dividida en el análisis de desplazamientos del suelo transversales y longitudinales al eje de tubería, donde se muestran todos los valores provenientes de las ecuaciones analizadas en el capítulo 5 y 13 haciendo referencia a ellas en la parte superior de la tabla. Algunos de los valores más destacados que se muestras en el caso del desplazamiento transversal son: el ancho de la falla “W”, el desplazamiento debido a esfuerzos de tensión y flexión, el desplazamiento crítico de la tubería como una combinación en paralelo de los dos anteriores, la deformación en tensión y en compresión de la tubería y los esfuerzos provocados en ella. Como se muestra en la Tabla 9-3.

Tabla 9-3: Fragmento de tabla de la pestaña “ACERO” donde se muestran los valores correspondientes a una deslizamiento de terreno transversal al eje de la tubería.

-	ec. (13-38)		ec. (13-39)	ec. (5-2)	ec. (5-10)	ec. (5-12)			
DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL									
W [m]	d	E	δaxial [m]	δflexión [m]	δcr[m]	εcr+[%]	εcr-[%]	σa[kg/cm2]	σf[kg/cm2]
10	-0.067	-0.135	0.646	23.755	0.629	0.584	-0.298	6008.435	6260.121
10	-0.050	-0.101	0.599	17.816	0.579	0.504	-0.274	4814.935	5761.473
10	-0.066	-0.133	0.645	9.426	0.604	0.725	-0.453	5728.681	9506.350
10	-0.050	-0.100	0.597	7.070	0.551	0.629	-0.413	4541.581	8673.079
10	-0.048	-0.094	0.588	3.800	0.509	0.712	-0.513	4185.777	10765.143
10	-0.032	-0.062	0.528	2.533	0.437	0.580	-0.440	2946.872	9235.666
10	-0.024	-0.047	0.489	1.900	0.389	0.500	-0.392	2284.188	8224.386
10	-0.047	-0.091	0.584	2.983	0.488	0.742	-0.551	4010.249	11569.854
10	-0.032	-0.061	0.524	1.989	0.415	0.601	-0.468	2794.119	9828.899
10	-0.024	-0.045	0.486	1.491	0.366	0.516	-0.413	2146.927	8681.339
10	-0.046	-0.087	0.578	2.159	0.456	0.777	-0.599	3741.016	12574.612
10	-0.031	-0.058	0.519	1.439	0.382	0.623	-0.501	2564.706	10517.785
10	-0.023	-0.044	0.481	1.079	0.333	0.529	-0.437	1944.646	9173.179
10	-0.019	-0.035	0.454	0.863	0.297	0.465	-0.390	1560.346	8197.197
10	-0.015	-0.029	0.432	0.720	0.270	0.416	-0.354	1298.654	7444.326
10	-0.046	-0.086	0.576	1.896	0.442	0.789	-0.616	3621.994	12940.112
10	-0.031	-0.057	0.517	1.264	0.367	0.629	-0.512	2465.238	10748.064
10	-0.023	-0.043	0.479	0.948	0.318	0.532	-0.444	1858.406	9321.923
10	-0.018	-0.034	0.452	0.759	0.283	0.466	-0.395	1483.911	8291.640
10	-0.015	-0.029	0.431	0.632	0.256	0.416	-0.357	1229.874	7500.409
10	-0.046	-0.084	0.573	1.622	0.424	0.801	-0.635	3470.061	13342.836

Para el caso desplazamiento longitudinal, la tabla muestra el largo de la falla "L" y el deslizamiento longitudinal, al igual que la deformación y esfuerzos producidos en la tubería, como se puede ver en la Tabla 9-4.

Tabla 9-4: Fragmento de tabla de la pestaña "ACERO" donde se muestran los valores correspondientes a una deslizamiento de terreno transversal al eje de la tubería.

-	-	ec. (5-21)		ec. (5-22)	Es*(5-22)
DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL					
L [m]	δ [m]	Lem [m]	L<4Lem	εmax[%]	σmax[kg/cm2]
100	0.500	59.672	Si	0.419	8798.099
100	0.500	78.707	Si	0.318	6670.298
100	0.500	60.381	Si	0.414	8694.766
100	0.500	79.968	Si	0.313	6565.136
100	0.500	80.519	Si	0.310	6520.216
100	0.500	119.570	Si	0.209	4390.718
100	0.500	157.817	Si	0.158	3326.641
100	0.500	80.692	Si	0.310	6506.213
100	0.500	119.960	Si	0.208	4376.447
100	0.500	158.510	Si	0.158	3312.093
100	0.500	80.894	Si	0.309	6489.962
100	0.500	120.415	Si	0.208	4359.923
100	0.500	159.318	Si	0.157	3295.291
100	0.500	197.604	Si	0.127	2656.828
100	0.500	235.272	Si	0.106	2231.457
100	0.500	80.967	Si	0.309	6484.147
100	0.500	120.578	Si	0.207	4354.021
100	0.500	159.608	Si	0.157	3289.300
100	0.500	198.057	Si	0.126	2650.746
100	0.500	235.925	Si	0.106	2225.281
100	0.500	81.049	Si	0.308	6477.600
100	0.500	120.762	Si	0.207	4347.383
100	0.500	159.936	Si	0.156	3282.568
100	0.500	198.569	Si	0.126	2643.919
100	0.500	236.662	Si	0.106	2218.356
100	0.500	81.153	Si	0.308	6469.246
100	0.500	120.998	Si	0.207	4338.922
100	0.500	160.354	Si	0.156	3273.998
100	0.500	199.223	Si	0.125	2635.237
100	0.500	237.604	Si	0.105	2209.562

La última parte de la tabla indica si la tubería se encuentra en fluencia o si pandea con los niveles de falla y tipo de suelo ingresados, coloreando la casilla de color rojo si la tubería presenta alguna falla o en verde si ésta soporta los desplazamientos. La primera parte hace referencia a los desplazamientos transversales y luego a los longitudinales como se muestra en la Tabla 9-5.

Tabla 9-5: Fragmento de la tabla que analiza las tuberías de "ACERO", donde se indica si la tubería sufre fluencia o pandeo local.

FALLA DE LA TUBERIA			
Desp. Transversal		Desp. Longitudinal	
εcr>εy	ε> εcr	εcr>εy	ε> εcr
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
FLUYE	NO PANDEA	FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA
NO FLUYE	NO PANDEA	NO FLUYE	NO PANDEA

Tal como se mencionó anteriormente las pestañas “ACERO”, “HDPE”, “HD” y “PVC” trabajan de forma idéntica hasta este punto. Sin embargo, a las pestañas “HD” y “PVC” se les incorporo una sección referente a su calidad de tuberías segmentadas donde se indica la separación que sufren las juntas debido a los desplazamientos transversales y longitudinales al eje de la tubería. Esta sección adicional se presenta en la Tabla 9-6, la cual muestra la separación de las juntas en una tubería de Hierro Dúctil debido a desplazamientos ya sean transversales o longitudinales al eje de la tubería.

Tabla 9-6: Segmento de la tabla presente en la pestaña "HD" que hace referencia a la separación sufrida por las juntas ante los desplazamientos de terreno tanto transversal como longitudinal al eje de la tubería.

Ecuaciones				(5-24)	(5-28)
Tubería segmentada				Desp. Longitudinal	Desp. Trasnversal
Lo[m]	L[m]	δ[m]	δcr[m]	Δu[cm]	Δx[cm]
6	100	80.000	3.420	480.00	13.8758
6	100	80.000	3.275	480.00	12.7465
6	100	80.000	3.147	480.00	11.8003
6	100	80.000	3.026	480.00	10.9547
6	100	80.000	2.911	480.00	10.1804
6	100	80.000	2.753	480.00	9.1665
6	100	80.000	2.592	480.00	8.1975
6	100	80.000	2.435	480.00	7.3181
6	100	80.000	2.133	480.00	6.0622
7	100	80.000	1.850	560.00	7.1576
7	100	80.000	1.592	560.00	7.0384
7	100	80.000	1.362	560.00	6.7729
7	100	80.000	1.161	560.00	6.4144
7	100	80.000	0.841	560.00	5.5798

3) Por último, el archivo Excel tiene cuatro pestañas con los nombres “GrafHDPE”, “GrafAcero”, “GrafHD” y “GrafPVC”. Estas pestañas fueron creadas con el fin de analizar de manera más simple el comportamiento de la tubería al variar diversos factores. En esta sección se pueden realizar gráficos de cualquier tipo según los que se deseé estudiar.

   Con el fin de facilitar el diseño de redes de conducción en los distintos materiales ante un sismo (principal propósito del documento), se realizaron gráficos que relacionan el diámetro de la tubería con la deformación que sufre ante eventos sísmicos de diversas magnitudes variando el espesor, presión máxima nominal de la tubería y el tipo de suelo. Estos gráficos serán explicados de mejor forma en el siguiente subcapítulo.

9.2. Presentación de la información

A modo de facilitar la lectura de la gran cantidad de información que entrega el modelo y colaborar con el diseño de redes de conducción de agua potable enterradas en terrenos inestables, se han realizado gráficos que comparan la deformación de la tubería sufrida ante desplazamientos del terreno de diversas magnitudes, tanto transversales como longitudinales al eje de la tubería. Dentro del mismo gráfico se puede ver el nivel de deformación sufrido por los distintos diámetros disponibles en tuberías de cierto material ante un mismo evento sísmico. Los gráficos son realizados

para un tipo de suelo determinado y para tuberías a las cuales se les exige la misma presión máxima nominal de operación.

Todos los gráficos que fueron realizados se hicieron para tres tipos de suelos diferentes, los que se consideran que son susceptibles a fallar durante un evento sísmico, estos tres tipos de suelos y sus parámetros típicos se muestran en la Tabla 6-2.

9.2.1. Gráficos de desplazamientos transversales al eje de la tubería

Los gráficos realizados para comparar la deformación de la tubería ante estos desplazamientos tienen dos etapas. La primera es un gráfico "Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería", el cual muestra el desplazamiento transversal critico sufrido para anchos de fallas de distintas magnitudes versus el rango de diámetros disponibles para una tubería de cierto material y de cierta presión máxima nominal permitida (la que tiene relación directa con el espesor de la tubería). El Gráfico 9-1, muestra lo descrito anteriormente para una tubería de HDPE de tensión mínima PE80 con una presión máxima nominal de PN16 (16[bar]) enterrada en un suelo limoso de baja plasticidad.

Se observa del Gráfico 9-1 que el rango de diámetros disponibles para una tubería de HDPE de tensión mínima PE80 y presión máxima nominal PN16 va desde 0.06 hasta 0.5 metros. Por otro lado, los anchos de falla graficados van desde los 2 hasta los 40 metros. El rango de los valores de "W" fue escogido de forma tal que bajo el "W" más pequeño la tubería no presentara problemas de fluencia en ninguno de sus diámetros, en cambio sobre el "W" más grande todos ellos estuvieran en fluencia. Este criterio se utilizó para todos los gráficos realizados.

Para determinar el grado de deformación de la tubería se debe ver la segunda parte, la cual es un gráfico que relaciona el "Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería" mostrando la deformación porcentual de la tubería versus el rango de desplazamientos críticos indicados en la primera parte.

En el Gráfico 9-2 se observa la deformación de la tubería para el mismo rango de desplazamiento críticos y valores de anchos de fallas que el Gráfico 9-1, es decir, para condiciones idénticas. Estos dos gráficos se deben leer en forma simultánea para extraer la información relevante frente a un desplazamiento transversal del terreno durante un sismo.

Los gráficos de desplazamiento transversal fueron realizados para los distintos materiales, diámetros y espesores de tuberías comercializados en Chile, variando el ancho de falla según la magnitud del sismo que soportaba la tubería antes de fluir. Además, se realizaron los mismos gráficos para cada uno de los tres tipos de suelos mencionados anteriormente. Los gráficos descritos están disponibles en el Anexo K.

Debido a que los gráficos del anexo K fueron realizados para tuberías de tramos continuos, al trabajar con tuberías segmentadas se debe consultar el anexo M. Este anexo se compone de gráficos

que indican la separación de las uniones en tuberías segmentadas ante desplazamientos transversales.

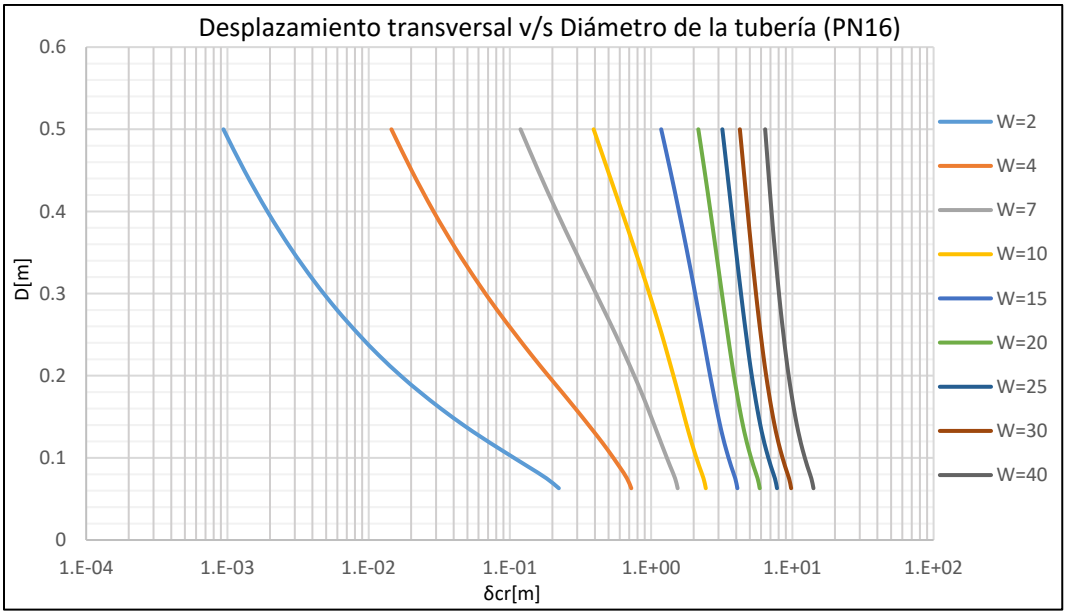


Gráfico 9-1: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

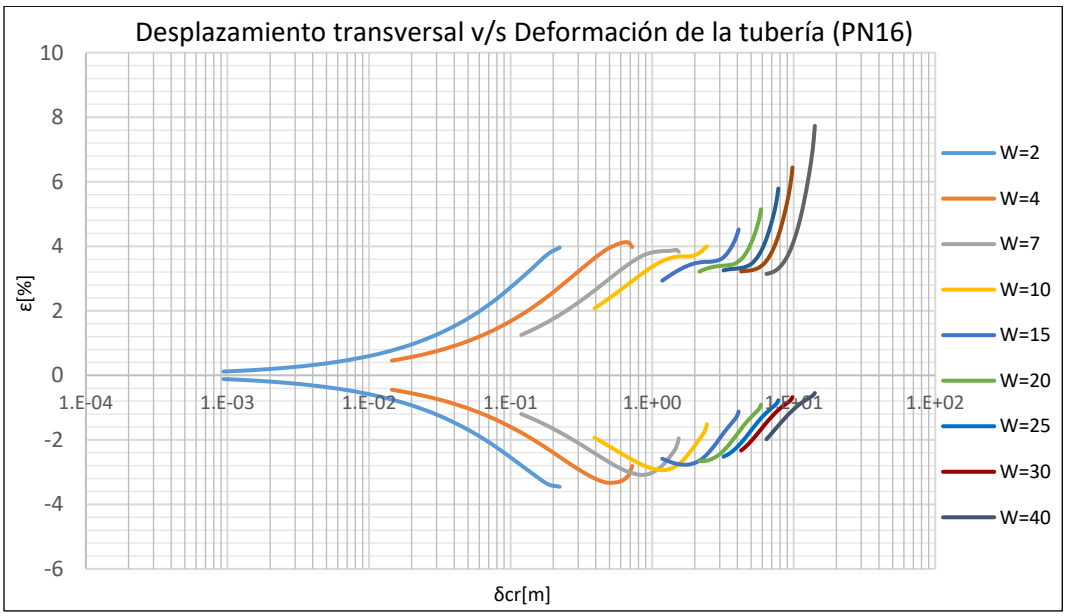


Gráfico 9-2: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

Las tuberías consideradas segmentadas en este documento son las de Hierro Dúctil y PVC. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que las tuberías de PVC soportan anchos de falla máximos de 5 metros antes de fluir, es decir, menor al largo de un segmento de tubería. Por lo tanto, solo se incluirán los gráficos de tubería continua para el PVC.

9.2.2. Gráficos de desplazamientos longitudinales al eje de la tubería

Los gráficos longitudinales muestras la relación "Diámetro v/s Deformación de la tubería" y se realizaron, al igual que en el caso anterior, para condiciones fijas de: tipo de suelo, material de la tubería y presión máxima nominal, variando el largo de falla del terreno "L" y el desplazamiento longitudinal "δ".

Como se estudió en el capítulo 5, la deformación de la tubería depende tanto de "L" como de "δ" y es contralada por uno u otro dependiendo de los valores que toman para una tubería de material y condiciones determinadas.

En los gráficos realizados se fijó un rango de valores para "δ", y se varía "L" hasta que la deformación de la tubería ya no depende del largo de falla o hasta que la tubería alcance la fluencia, pasando al siguiente rango de valores de "δ" solo si la tubería aún no entra en fluencia para la totalidad de sus diámetros disponibles.

Los Gráficos 9-3 y 9-4 muestran la deformación de una tubería de HDPE de tensión mínima PE100 y presión máxima nominal PN12.5 enterrada en un suelo de arena fina sometida a un desplazamiento longitudinal al eje de la tubería. En el Gráfico 9-3 el rango de desplazamiento longitudinal va de 0.5 a 2 metros y el largo de la falla desde los 80 a los 200 metros. En los 200 [m] la deformación se vuelve constante y no cambiará aunque se siga aumentando el valor de "L", por consiguiente, se pasa al segundo rango de valores de "δ" en el Gráfico 9-4. En el cual se observa que la deformación se vuelve contante cuando se llega a un largo de falla de 400 [m], valor donde todo el rango de diámetros de la tubería a alcanzado la fluencia y por lo tanto se grafica hasta este rango. Aunque se continué aumentado el valor de "δ" no variara la deformación si el largo de falla no sube de los 400 [m], por lo tanto, hasta dicho valor de "L" la deformación es constante para cualquier "δ" mayor a 2[m].

Los gráficos de desplazamiento longitudinal fueron realizados para los distintos materiales, diámetros y espesores de tuberías comercializados en Chile, variando el largo de falla y el rango de desplazamiento según la magnitud del sismo que soportaba la tubería de condiciones especificadas antes de fluir. Además, se realizó para cada uno de los tres tipos de suelos mencionados anteriormente. Los gráficos están disponibles en el Anexo L.

Al igual que para los DPS transversales, los gráficos del anexo L, fueron realizando considerando tramos continuos de tubería. Ain embargo, las tuberías de Hierro Dúctil y PVC no cumplen esta condición por lo que se debe verificar si existe una separación de sus uniones previa a llegar a la falla. Los gráficos que presentan la separación de uniones debido a DPS longitudinales se encuentra en el Anexo N.

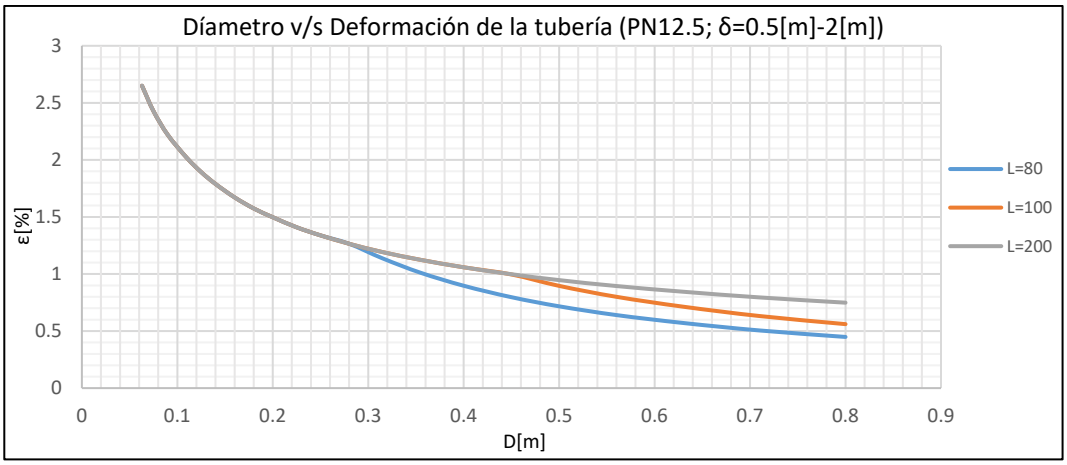


Gráfico 9-3: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100, Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

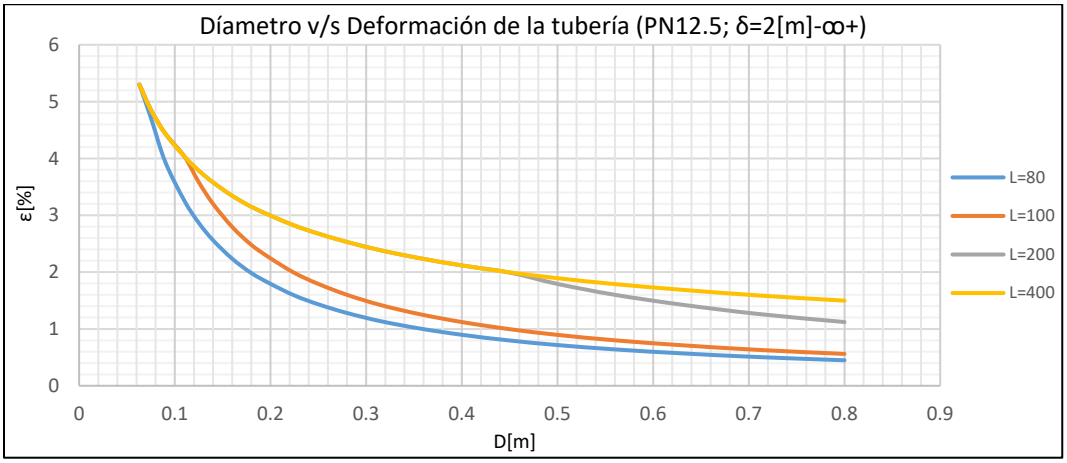


Gráfico 9-4: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

9.2.3. Ejemplo de lectura de los gráficos

Para comprender de mejor manera la forma en que se deben leer los gráficos presentados en los Anexos K y L, se realizará un ejemplo práctico que puede ser utilizado como referencia para diseñar una red de conducción.

Se supondrá que se está realizando el diseño de una tubería de conducción agua potable en la ciudad de Concepción que va desde la planta de tratamiento hasta un estanque que abastecerá a cierta población de la ciudad.

Los resultados del diseño arrojan que es necesario utilizar una tubería de HDPE de resistencia mínima a la tensión PE200 y presión nominal de uso PN6 para soportar el caudal y las presiones internas a la cual será sometida la tubería durante su vida útil. El diámetro calculado para la tubería es de 1.6 [m].

El ingeniero mecánico de suelos encargado de estudiar el terreno, indica que hay un sector que abarca una distancia de aproximadamente 60 metros donde el suelo se compone principalmente de arena fina, la cual presenta condiciones que la hacen susceptible a compactarse en un movimiento telúrico, por lo que es muy probable que ese terreno se deslice.

Para comprobar si la tubería fallará en un movimiento del terreno transversal a su eje, es necesario (según las condiciones descritas) revisar los gráficos 13-139 y 13-140 del anexo K y ver si la tubería entra en fluencia ante un deslizamiento del terreno de W= 60[m] (para realizar el ejemplo se han copiado estos gráficos más abajo, gráficos 9-5 y 9-6 respectivamente).

Se puede apreciar que para un diámetro de tubería 1.6 [m] y un ancho de falla W= 60[m] (Flecha negra) el desplazamiento crítico transversal, según el Gráfico 9-5, es de 6[m]. Ingresando con este valor al Gráfico 9-6 se obtiene una deformación en tensión de 3.6%. Sin embargo, las tuberías de PE200 entran en fluencia cuando alcanzan una deformación de 2.9%.

Para solucionar el problema hay dos posibles soluciones. La primera es aumentar el diámetro de la tubería, lo que reduce el desplazamiento transversal y por ende la deformación. Se observa (ver flecha azul) que para alcanzar una deformación que esté bajo el límite de fluencia es necesario aumentar el diámetro hasta un mínimo de 2.6 [m]. La segunda opción es aumentar el espesor de la tubería, lo que va de la mano con aumentar la máxima presión nominal de la tubería. Si se aumenta la presión nominal desde PN6 a PN10 se puede observar de los gráficos 13-141 y 13-142 (gráficos 9-7 y 9-8 en este ejemplo) que no habría problema con utilizar el diámetro de 1.6 [m] arrojado por el diseño inicial, debido que la tubería queda justo bajo el límite de fluencia. Siendo la segunda opción mucho más recomendable.

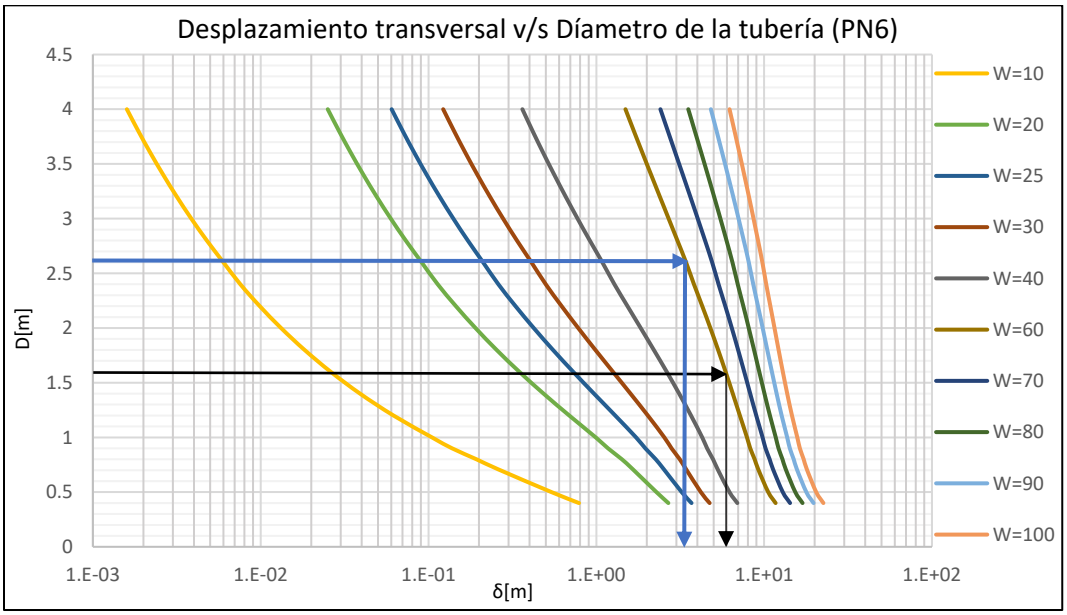


Gráfico 9-5: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Arena Fina.

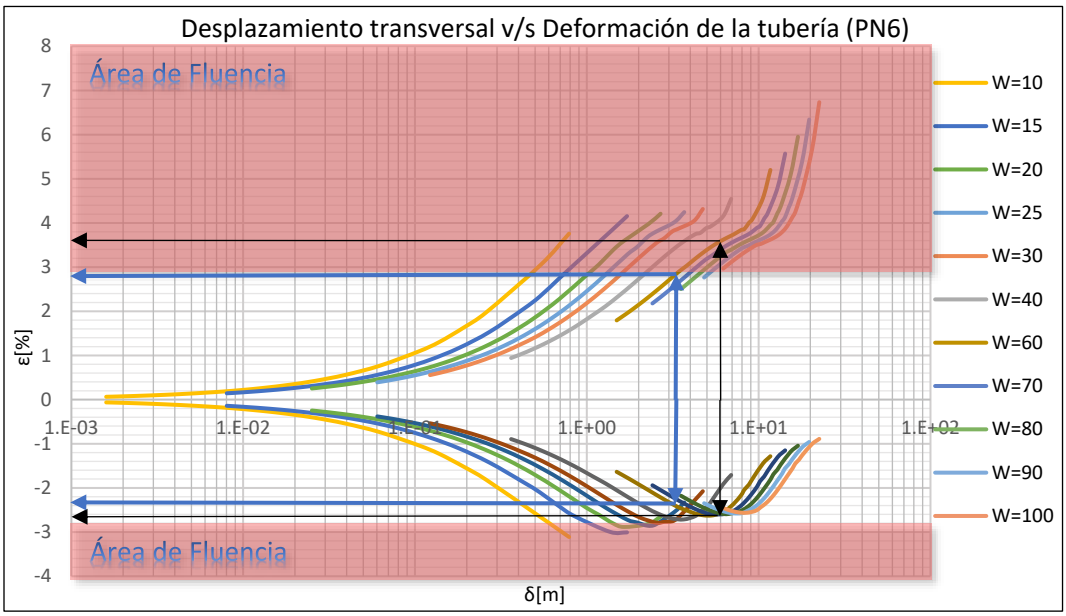


Gráfico 9-6: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Arena Fina.

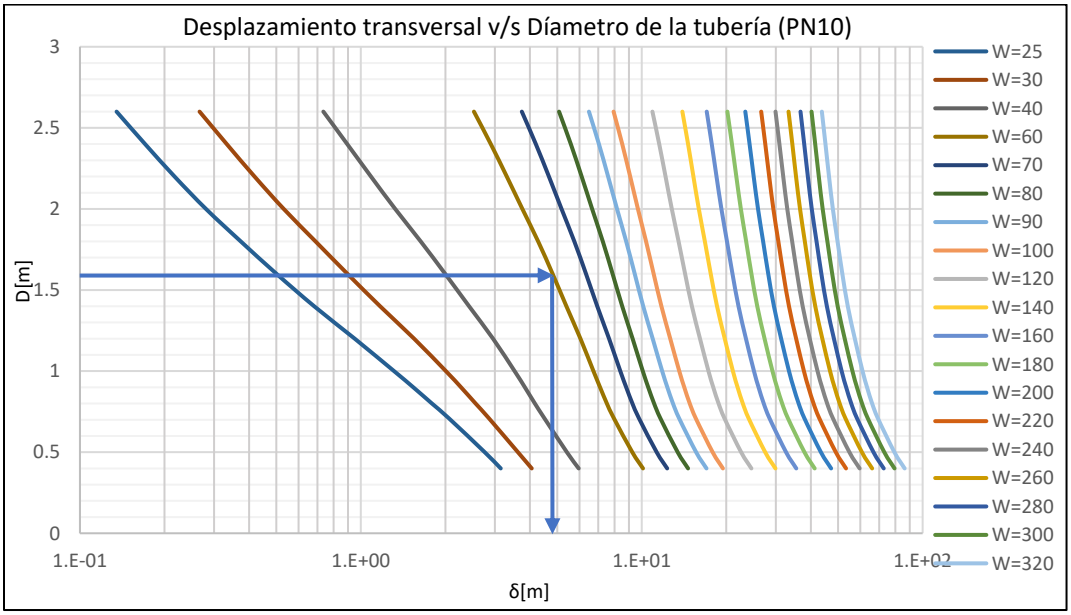


Gráfico 9-7: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Arena Fina.

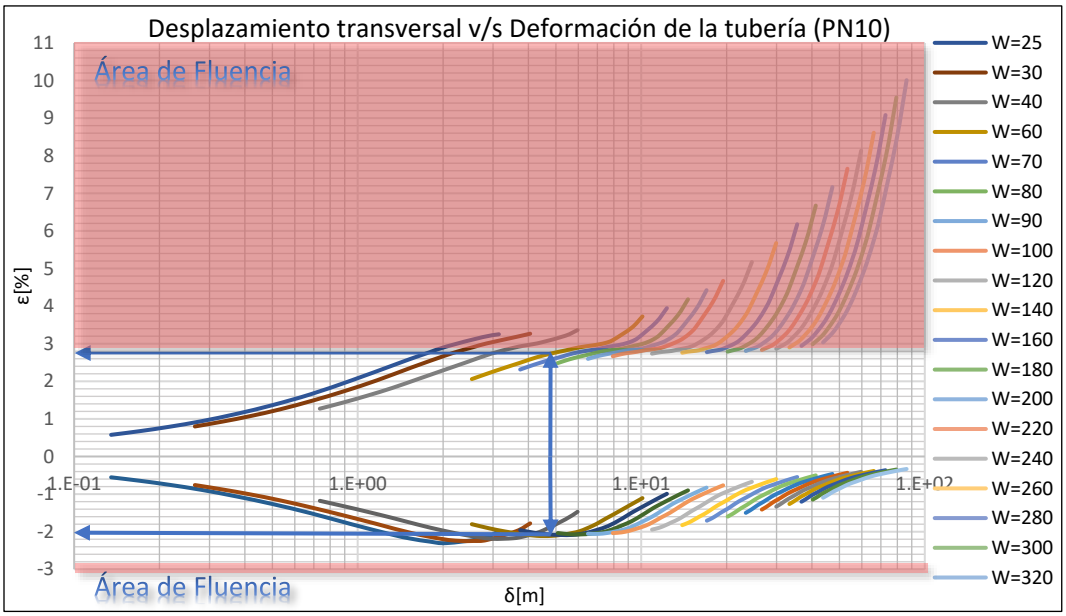


Gráfico 9-8: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Arena Fina.

En el caso de la deformación por compresión no presenta problemas de fluencia ya que alcanza un valor de 2%. Pero además, se debe verificar que no existan problemas de pandeo local, para ello se utiliza la expresión correspondiente de la Tabla 7-2 presentada a continuación:

$$\varepsilon_{cr} \leq 0.6 * \frac{t}{R}$$

Para determinar el espesor "t" de la tubería, se debe recordar que la presión máxima de operación requerida tiene relación directa con este parámetro por medio de la formula (8-3):

$$\sigma = \frac{PN(D-e)}{2e}$$

Donde:

σ= Tensión de diseño del material= MRS/C en [MPa]; C=1.25 para PE80 y PE100; C=1.7 para PE200.
D= Diámetro de tubería en [mm].
e= Espesor mínimo de la pared del tubo en [mm].
PN= Presión nominal de la tubería [bar].

Reemplazando se obtiene que el espesor mínimo requerido es de 40 [mm].

Al reemplazar el espesor de 40[mm] y el radio de 0.8[m] en la expresión de la Tabla 7-2, se obtiene una deformación crítica "ε_{cr}" de 3%, por lo tanto, la deformación en compresión de 2% sufrida por la tubería no presenta problemas de pandeo local.

Finalmente se debe verificar la deformación longitudinal de la tubería para las condiciones descritas. El Gráfico que presenta las deformaciones más desfavorables es el Gráfico 13-367 (Gráfico 9-9 en este ejemplo) ya que abarca el mayor rango de desplazamiento longitudinal que puede sufrir una tubería de las características de la tubería que arrojo el diseño.

Se observa que el menor desplazamiento graficado es para una falla de 80 metros, en la cual ningún diámetro entra en fluencia. Como la distancia posible de falla en el presente problema es de 60 [m], las deformaciones ante un eventual desplazamiento longitudinal serán incluso menores, por lo tanto, la tubería no presenta problemas en éste caso.

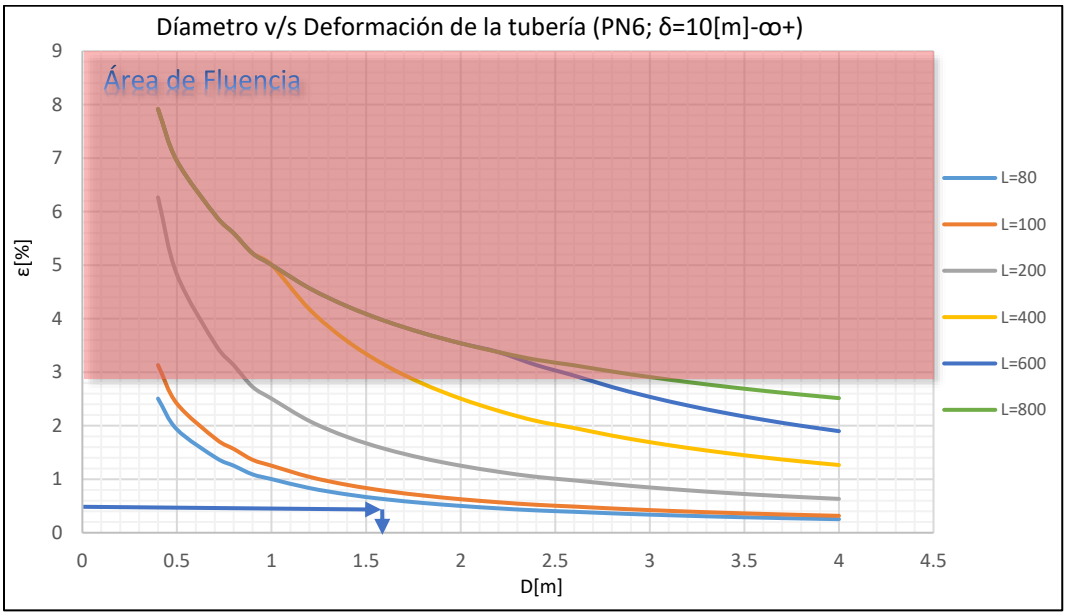


Gráfico 9-9: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena Fina.

9.3. Análisis de la información

En esta sección se realizará un análisis de la información recopilada del modelo para determinar el comportamiento de las tuberías al cambiar las distintas variables del problema. Para ello se analizarán los gráficos realizados y presentados en los anexos de este documento.

Primero se realizará un análisis de las tuberías sin variar su material y luego una comparación entre los distintos materiales utilizados en conducción de agua potable.

9.3.1. Comparación entre variables para un mismo material

9.3.1.1. DPS transversal al eje de la tubería

Las principales variables que influyen en la deformación de la tubería, independiente de su material, para un mismo ancho de falla son: el diámetro, el espesor y el tipo de suelo. Por lo tanto, se analizará el comportamiento de las tuberías ante éstas variables, viendo cómo cambia su deformación al variar alguna de ellas.

9.3.1.1.1. Tuberías de Acero

- *Variación del Espesor de la tubería*

El Gráfico 9-10 muestran el espesor de la tubería versus su deformación para anchos de falla de 10, 18 y 30 metros; diámetros de 1.067, 1.524 y 2.032 metros y suelos de arena fina, arena gruesa y limo de baja plasticidad.

Se puede observar del Gráfico 9-10 que la deformación en la tubería disminuye al aumentar su espesor y tiene un comportamiento idéntico independiente del ancho de falla, diámetro del tubo o tipo de suelo en el cual se encuentre enterrada. Es decir, el porcentaje de disminución en la deformación al aumentar el espesor de la tubería no tiene relación con otras variables.

El rango de espesores graficados fue de 12 a 20 [mm] y el porcentaje de disminución en la deformación entre ambos extremos es de 30% app. para todos los casos. Sin embargo, en los espesores pequeños la disminución de deformación es más rápida que en los espesores más grandes por lo que no se puede dar un porcentaje de disminución por cada milímetro de aumento. Esto deberá ser evaluado a la hora de diseñar.

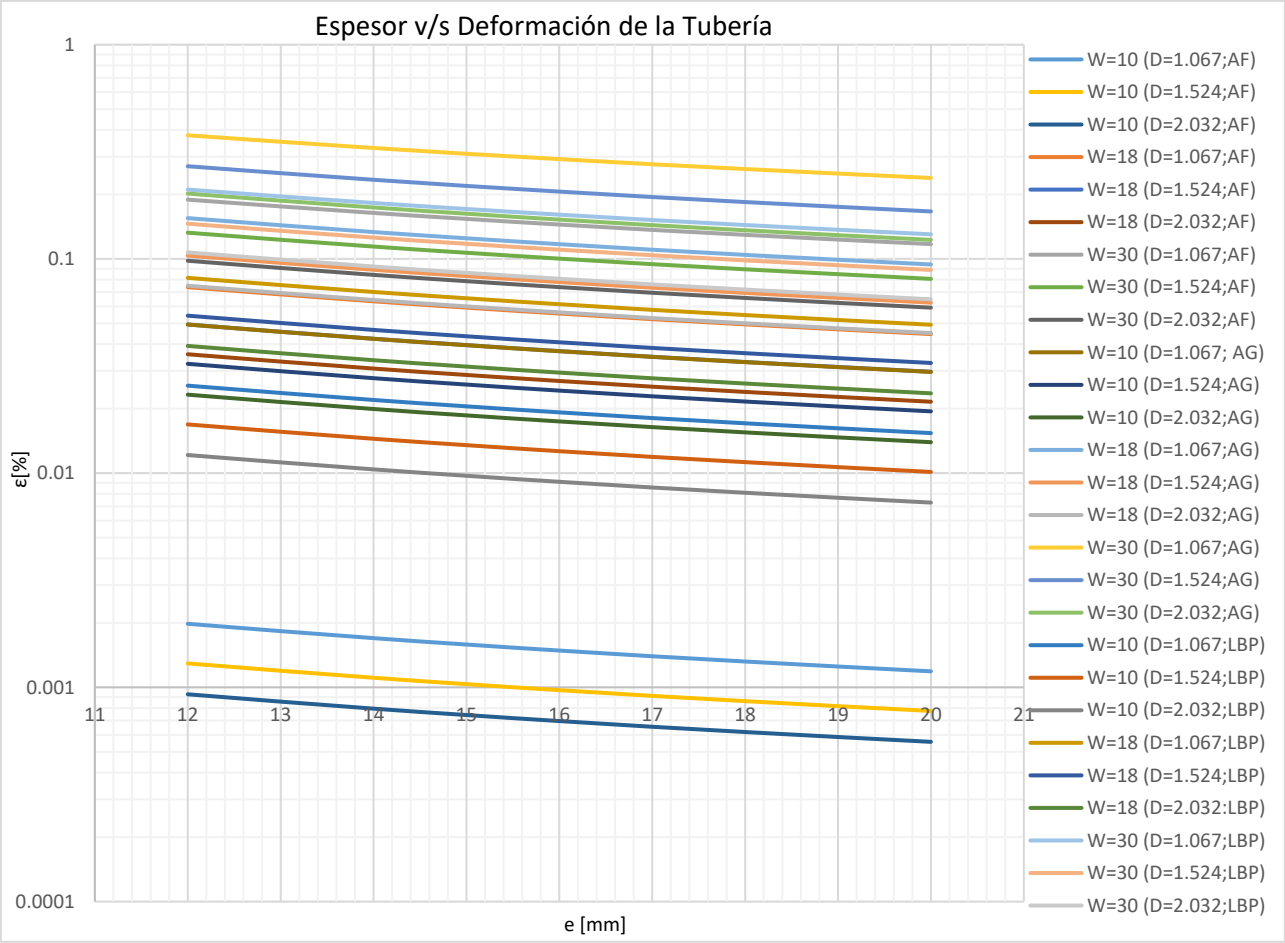


Gráfico 9-10: Espesor v/s Deformación de la tubería de Acero, variando ancho de falla, diámetro y tipo de suelo.

- *Variación del diámetro de la tubería*

El Gráfico 9-11 muestra la relación entre el diámetro versus la deformación de la tubería para anchos de falla de 10, 18 y 30 metros y tipos de suelo de arena fina, arena gruesa y limo de baja plasticidad, manteniendo un espesor constante de 12[mm].

Al igual que el caso anterior se observa que la deformación de la tubería disminuye a medida que aumenta el diámetro del tubo, el porcentaje de disminución entre un diámetro de 1.067 y 2.032 metros es de 53% para un ancho de falla W=10 [m], 51% para W=18[m] y 48% para W= 30 [m], resultando ser menos sensible la deformación al cambio de diámetros a medida que aumenta W, hasta llegar a un punto (como se verá más adelante) que esta situación se invierte.

Se debe recordar que el aumento del diámetro provoca un aumento en la resistencia del suelo, es decir, mayores son las fuerzas que se oponen al movimiento de la tubería, siendo más conveniente aumentar el espesor para disminuir las deformaciones en la tubería.

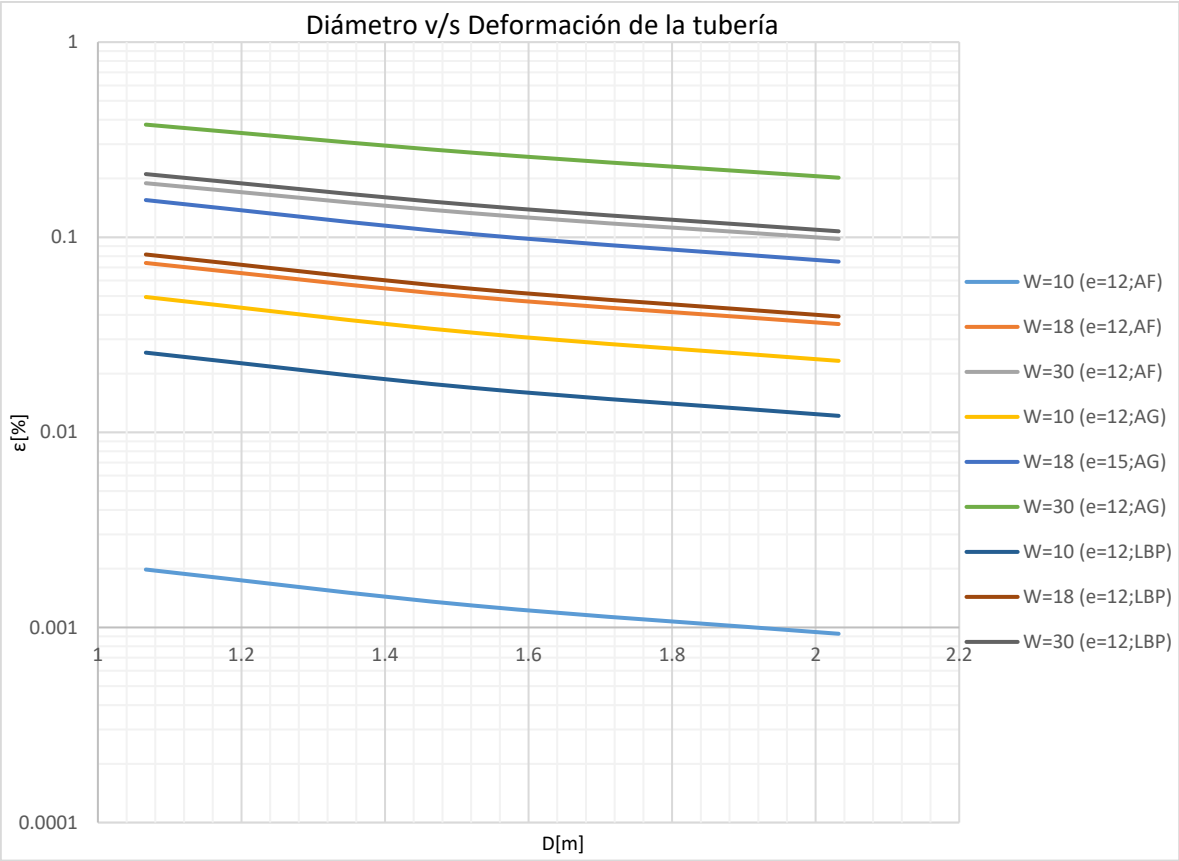


Gráfico 9-11: Diámetro v/s deformación de la tubería, variando ancho de falla y tipo de suelo.

- *Variación en el tipo de suelo*

El Gráfico 9-12 muestra la relación entre el tipo de suelo y la deformación de la tubería para anchos de fallas de 10, 18 y 30 metros; espesor constante de 12[mm] y diámetro constante de 1.067[m].

Del Gráfico 9-12 se observa que el tipo de suelo que produce los mayores nivel de deformación (independiente del ancho de falla) es el compuesto por arena gruesa, seguido por el limoso de baja plasticidad y finalmente el de arena fina. Esto se debe a que las partículas de mayor tamaño y más cohesionadas entre sí producen una mayor resistencia al desplazamiento de la tubería, por lo tanto, una vez que la tubería se desplaza los esfuerzos que inducen en ella son mayores.

Si bien el suelo compuesto por arena fina es el que presenta las menores deformación para un mismo ancho de falla, hay que tener en cuenta que no es el mejor terreno para instalar las tuberías ya que también es el tipo de suelo que fallará con mayor facilidad por tener menor cohesión y fricción entre sus partículas.

Es conveniente que antes de enterrar una red de tubería el terreno sea inspeccionado por un mecánico de suelos quien indique el tipo de suelo predominante, lugares posibles de sufrir fallas y cuales son aproximadamente los desplazamientos esperados ante un sismo.

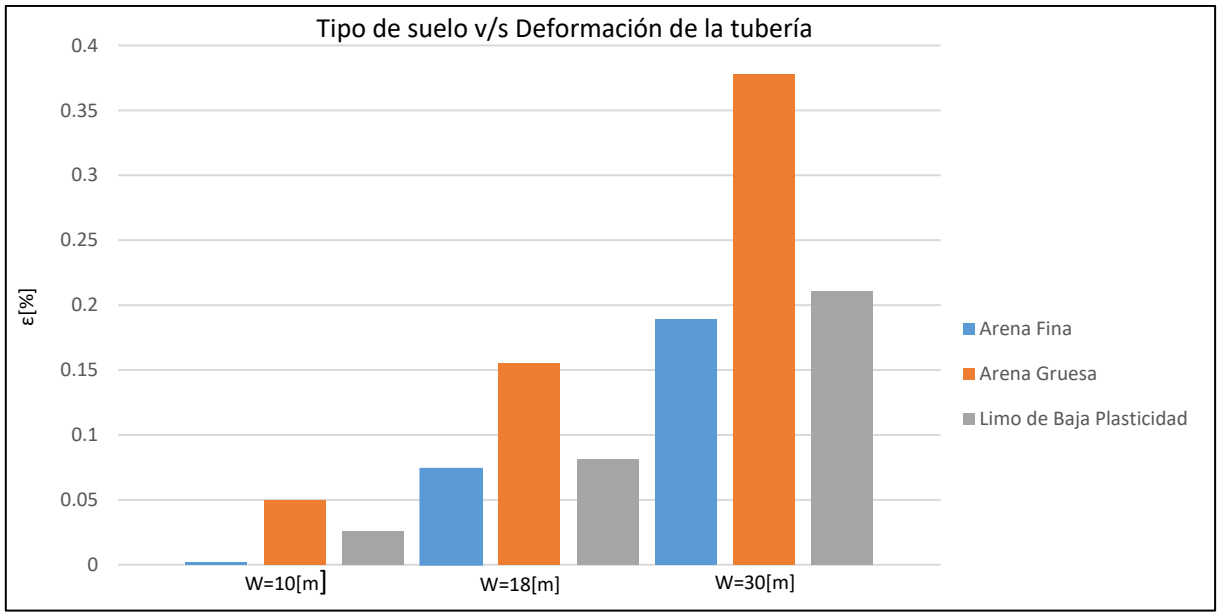


Gráfico 9-12: Tipo de suelo v/s Deformación de la tubería, variando el ancho de falla.

9.3.1.1.2. Tuberías de HDPE

- *Variación del Espesor de la tubería*

Debido a que los gráficos de las tuberías de HDPE fueron realizado para valores constantes de presión nominal (PN), la cual está directamente relacionado con el espesor de la tubería, se analizará como varía la deformación de la tubería al cambiar el PN del tubo.

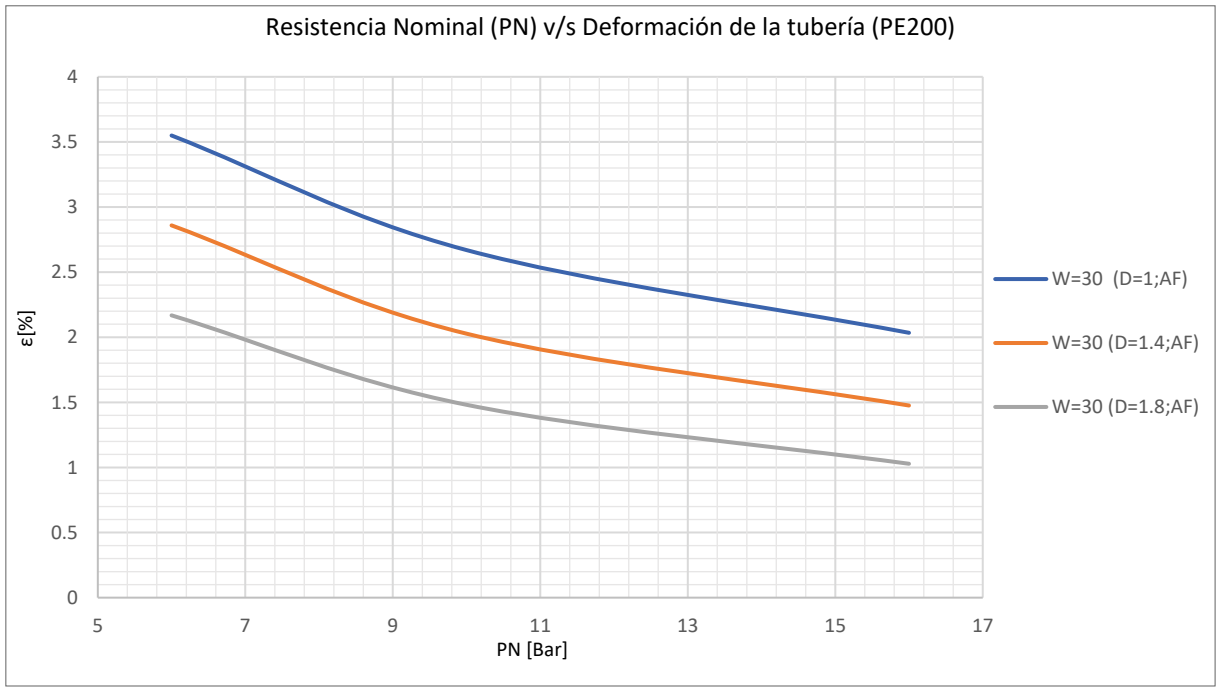


Gráfico 9-13: Resistencia nominal v/s Deformación de la tubería, Variando el diámetro del tubo.

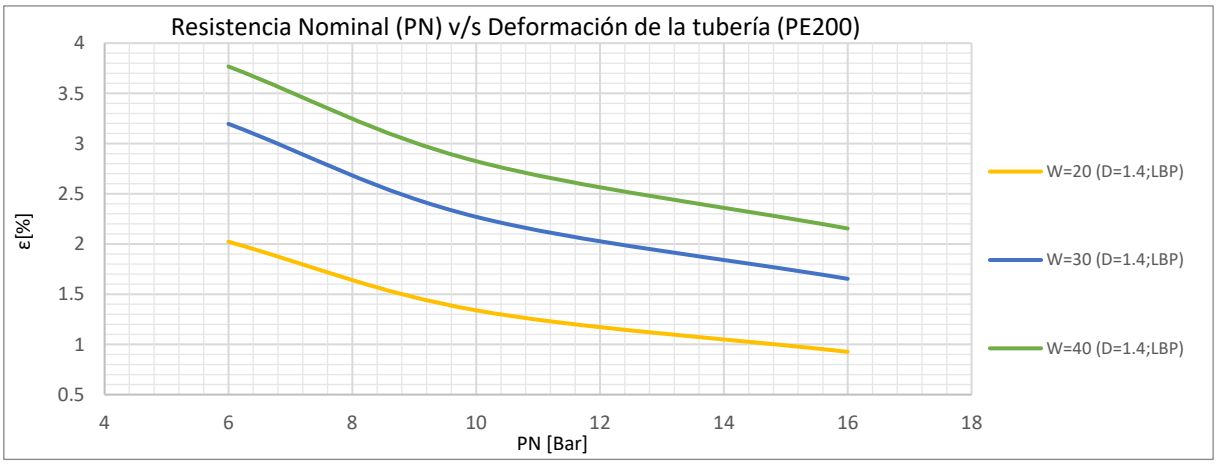


Gráfico 9-14: Resistencia nominal v/s Deformación de la tubería, Variando el ancho de falla.

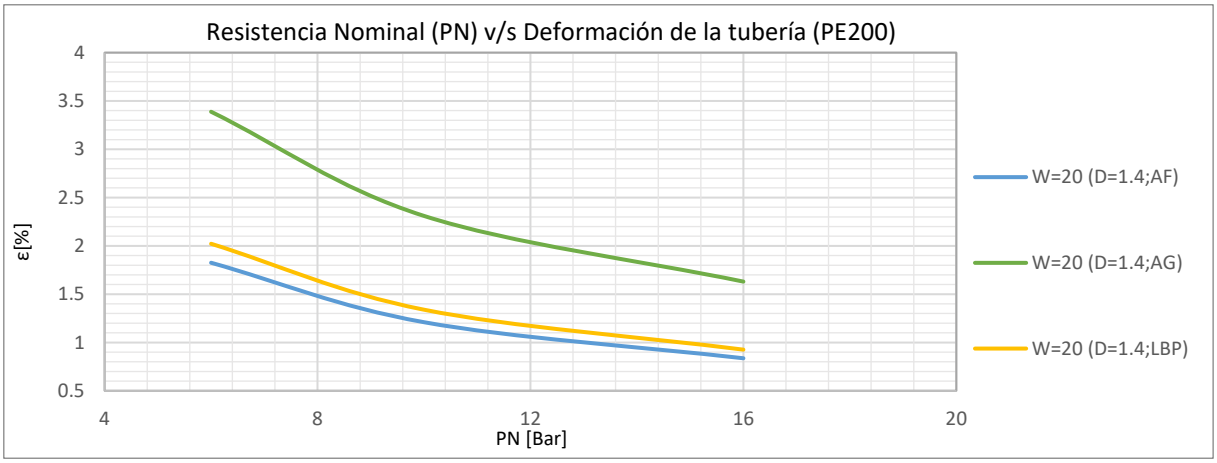


Gráfico 9-15: Resistencia nominal v/s Deformación de la tubería, Variando el tipo de suelo.

En los gráficos 9-13, 9-14 y 9-15, se graficó la resistencia nominal del tubo de HDPE versus la deformación de la tubería variando el diámetro, el ancho de falla y el tipo de suelo respectivamente. Al igual que los tubos de acero, se observa que en todos los casos al aumentar el PN (directamente relacionado con el espesor del tubo) la deformación disminuye. Sin embargo, el HDPE se presenta más sensible a la variación de otros factores como el diámetro, ya que al aumentar su tamaño de 1 a 1.8[m] el porcentaje de disminución de la deformación aumenta de un 24 a un 30%.

Por otro lado, el porcentaje disminuye de 31 a 24% al aumentar el ancho de falla de 20 a 40 metros. En cuanto a los tipos de suelo, la arena fina y el limo de baja plasticidad presentan un comportamiento idéntico, aumentando el porcentaje de disminución en la arena gruesa. La información de estos dos últimos parámetros se debe tener presente, aunque es difícil que pueda ser modificada por el ingeniero.

Resumiendo, las tuberías de HDPE siempre disminuirán su deformación al aumentar la resistencia nominal del tubo si se mantienen constantes los otros factores, acrecentando su porcentaje de diminución en los diámetros mayores.

- *Variación del diámetro del tubo*

Se puede observar de los gráficos 9-16 y 9-17 que la deformación del tubo siempre disminuye al aumentar el diámetro independiente de la variación de otros factores.

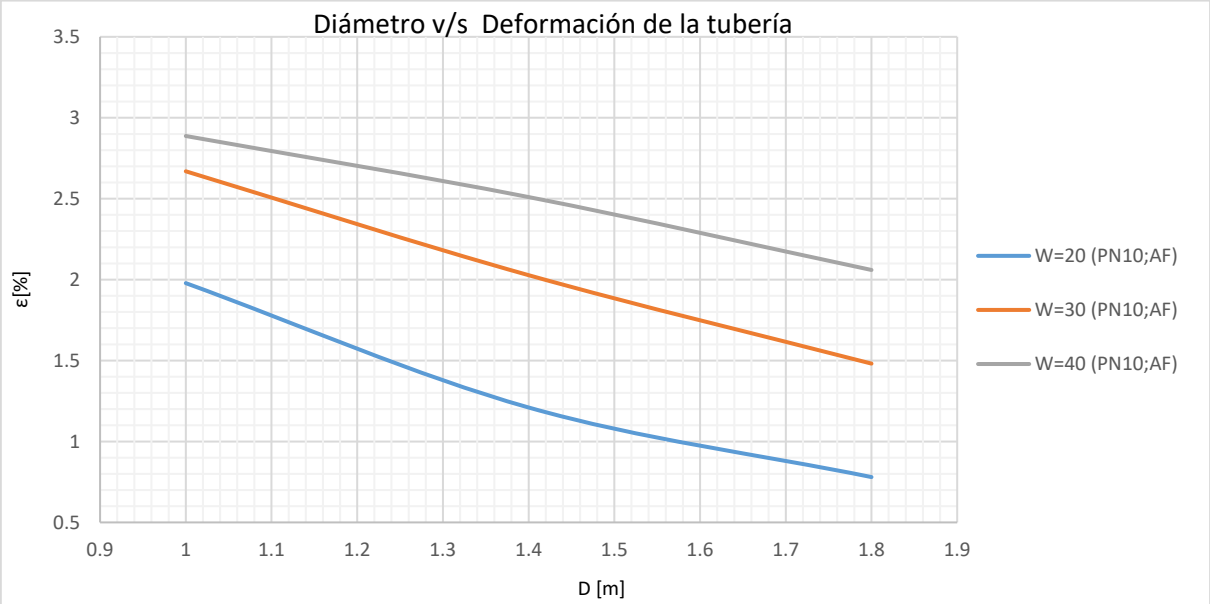


Gráfico 9-16 Diámetro v/s Deformación de la tubería, Variando el ancho de falla para tubo de PN10.

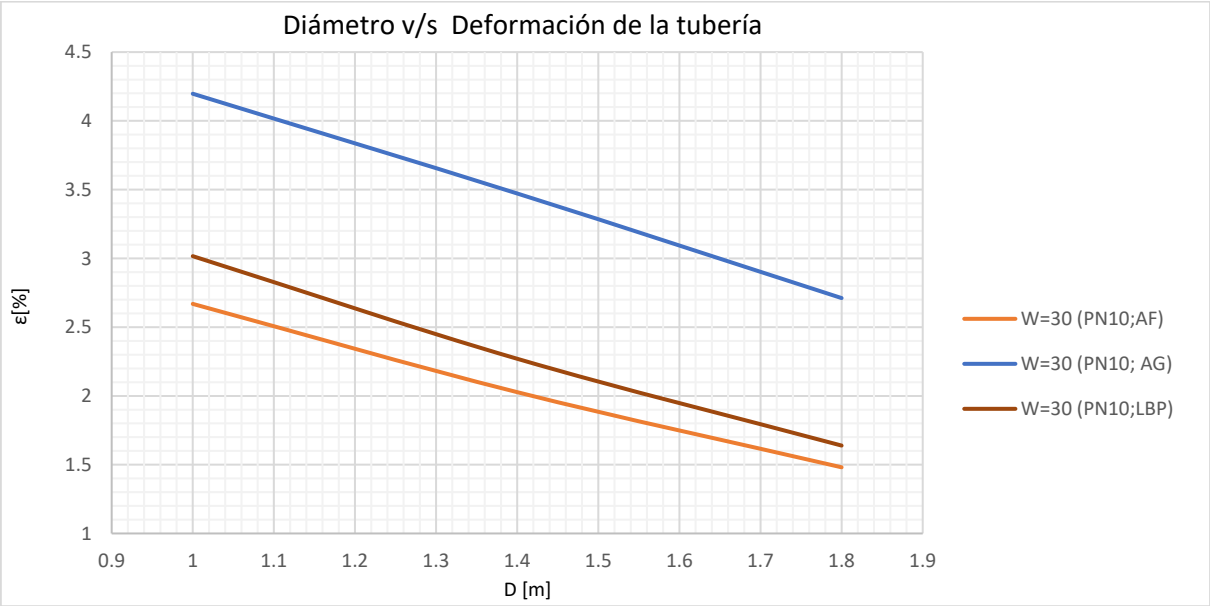


Gráfico 9-17: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Variando el tipo de suelo para tubo de PN10.

En el Gráfico 9-16 se observa que al aumentar el ancho de falla de 20 a 40 metros, el porcentaje de diminución de la deformación es menor. En cuanto al tipo de suelo, la disminución permanece constante independiente del cambio de suelo.

- *Variación del tipo de suelo*

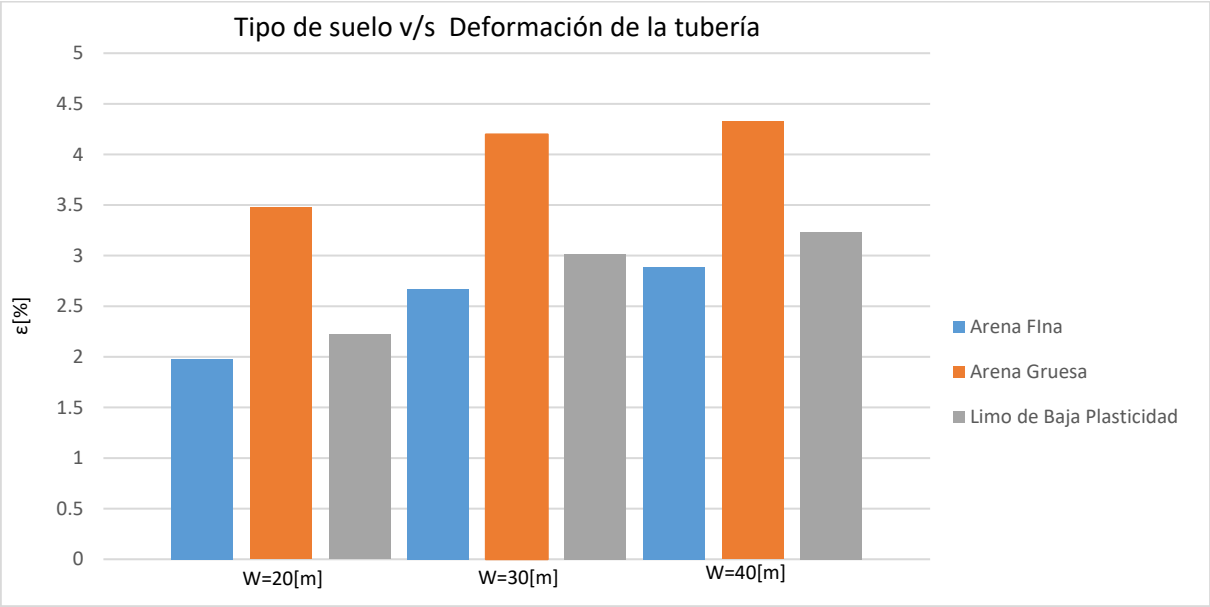


Gráfico 9-18: Tipo de suelo v/s Deformación de la tubería, variando el ancho de falla, para un diámetro de 1 [m] y PN10.

Se observa del Gráfico 9-18 que el tipo de suelo que produce las mayores deformaciones para un mismo ancho de falla es la arena gruesa, seguido por el limo de baja plasticidad y finalmente la arena fina.

9.3.1.1.3. Tuberías de Hierro Dúctil

Debido a las características de las tuberías de este material, donde espesor debe ir aumentando junto con el diámetro, no se puede realizar las mismas comparaciones que en los materiales anteriores. Sin embargo, de los gráficos del anexo K y L se puede apreciar claramente que se mantiene la tónica comentada anteriormente, es decir, que la deformación disminuye a medida que aumenta el espesor y/o el diámetro del tubo. De igual modo, el tipo de suelo que presenta los mayores niveles de deformación para un mismo ancho de falla es la arena gruesa, luego el limo de baja plasticidad y finalmente la arena fina.

9.3.1.1.4. Tuberías de PVC

- *Variación del Espesor de la tubería*

Debido a que los gráficos realizados para las tuberías de PVC fueron hechos para valores constantes de clase del tubo "C", la cual está directamente relacionada con el espesor de la tubería, se analizará como varía la deformación de la tubería al cambiar el "C" del tubo.

Se puede observar en el Gráfico 9-19 que la deformación del tubo siempre disminuye al aumentar su Clase y, al igual que en las tuberías de aceros, esta disminución es constante independiente de la variación de otros factores como el ancho de falla, diámetro o tipo de suelo.

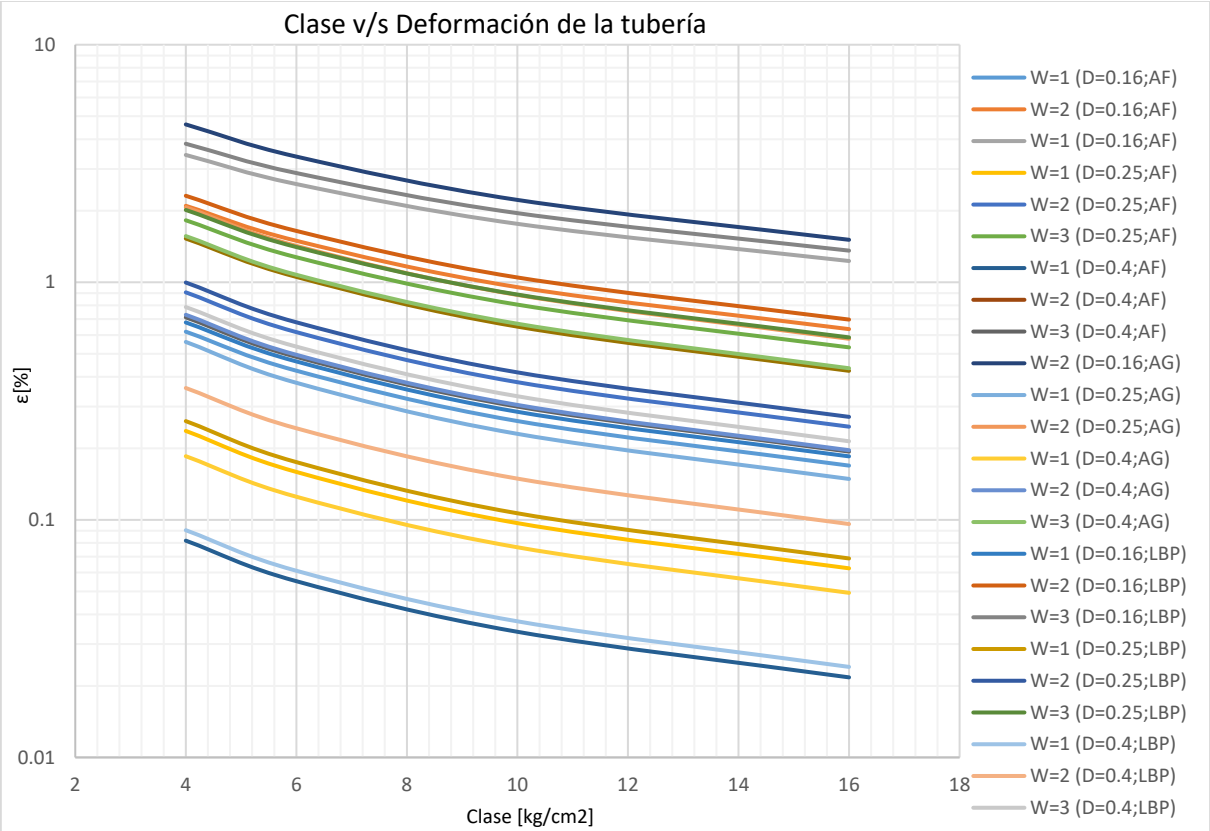


Gráfico 9-19: Clase v/s Deformación de la tubería, Variando ancho de falla, diámetro y tipo de suelo.

- *Variación del diámetro de la tubería*

En el Gráfico 9-20 se observa que la deformación disminuye al aumentar el diámetro independiente de la variación en el ancho de falla o el tipo de suelo. Sin embargo, esta disminución es un poco más rápida en los anchos de falla más bajos. En cuanto al tipo de suelo, la disminución no se ve afectada por este factor.

El Gráfico 9-21 muestra que el tipo de suelo que presenta los mayores niveles de deformación para un mismo ancho de falla es la arena gruesa, luego el limo de baja plasticidad y finalmente la arena fina manteniendo la tónica de todos los materiales.

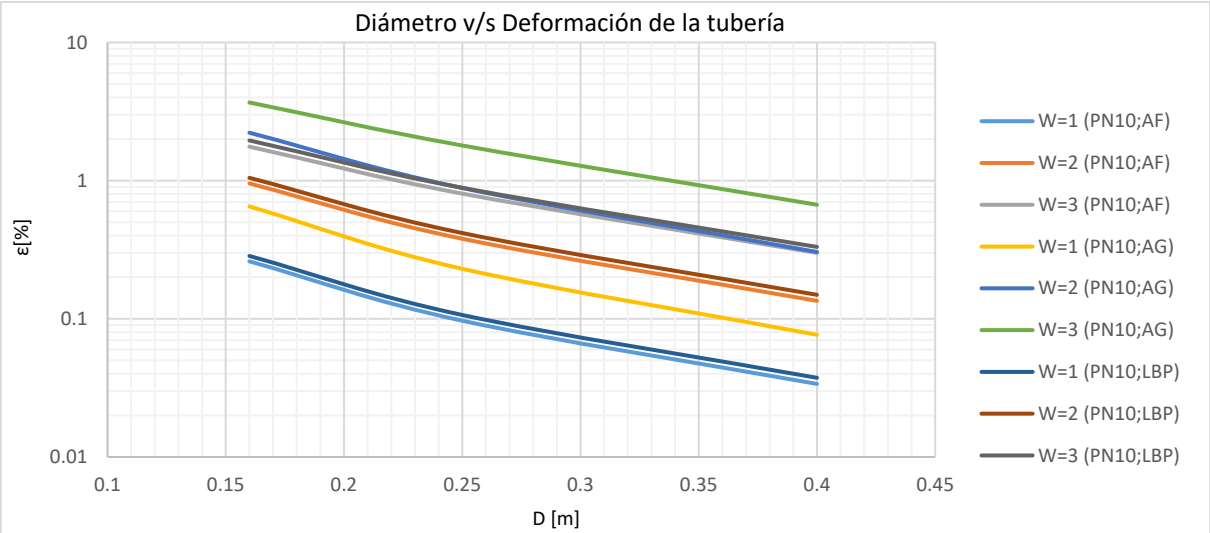


Gráfico 9-20: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Variando ancho de falla y tipo de suelo, para tubo de clase 10.

- *Variación del tipo de suelo*

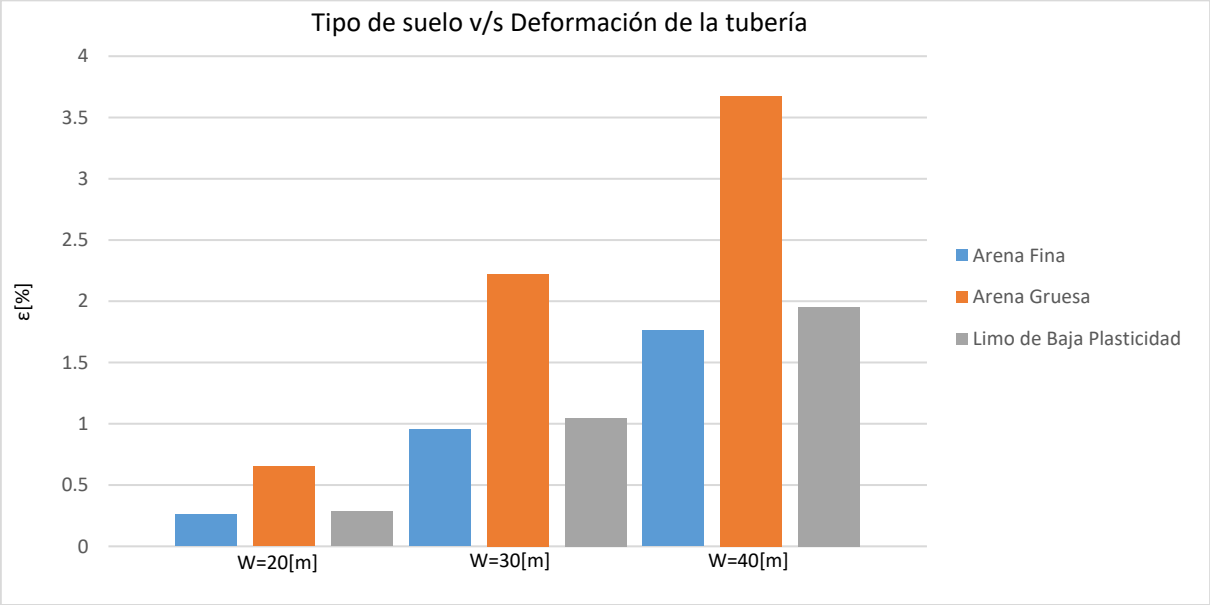


Gráfico 9-21: Tipo de Suelo v/s Deformación de la tubería, Variando ancho de falla, para tubo de clase 10 y diámetro 0.16 [m].

9.3.1.2. DPS longitudinal al eje de la tubería

El Anexo L muestra los gráficos de deformación de la tubería ante desplazamientos longitudinales a su eje, donde se observa que se cumplen las mismas condiciones que en los DPS transversales en cuanto a la variación de los parámetros de la tubería, es decir, la deformación disminuye al aumentar el espesor y/o el diámetro.

En cuanto al tipo de suelo, el que presenta las mayores deformaciones para un mismo largo de falla en orden decreciente son suelos de arena gruesa, arena fina y limo de baja plasticidad. Esto varia respecto al DPS transversal donde las menores deformaciones para un mismo ancho de falla las presentaba la arena fina, aunque la arena gruesa se mantiene como el tipo de suelo que presenta la mayor oposición al deslizamiento de la tubería.

Estos gráficos y el comportamiento al variar los distintos parámetros serán analizados en mayor profundidad en el siguiente subcapítulo.

9.3.2. Comparación entre tuberías de distintos materiales

9.3.2.1. Tuberías de tramo continuo

9.3.2.1.1. DPS transversal al eje de la tubería

Los gráficos que se encuentran en el Anexo K muestran el comportamiento de las tuberías hasta cierto punto cercano al límite de fluencia. Sin embargo, las tuberías experimentan una gran incursión en el rango plástico antes de colapsar, analizar este rango nos permitirá estudiar su comportamiento general y ver si se cumple la teoría planteada inicialmente, en la cual se espera un comportamiento rígido (como viga) de la tubería en los anchos de falla más pequeño y un comportamiento flexible al ir aumentando.

Los gráficos 9-22 al 9-25 muestran el comportamiento post-elástico en los distintos materiales de tuberías. En todos los materiales se observa que para DPS transversales pequeños, la deformación en tensión y compresión comienzas prácticamente simétricas (comportamiento de viga), pero a medida que aumenta el valor del DPS la deformación por tensión comienza a crecer exponencialmente. En cambio, la deformación en compresión comienza a ser cada vez más cercana a cero (comportamiento de cable), lo que confirma que todos los materiales cumplen con la hipótesis inicial de comportarse en forma rígida para anchos de fallas pequeños y de forma flexible a medida que éste aumenta.

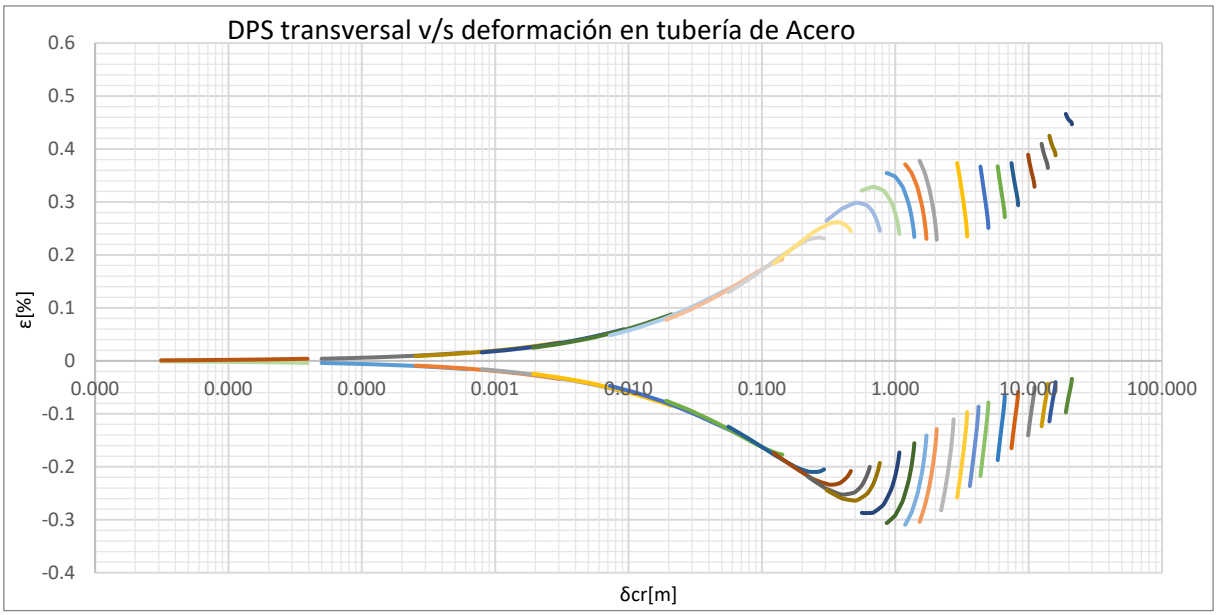


Gráfico 9-22: Comportamiento de las tuberías de Acero en el rango post-Elástico.

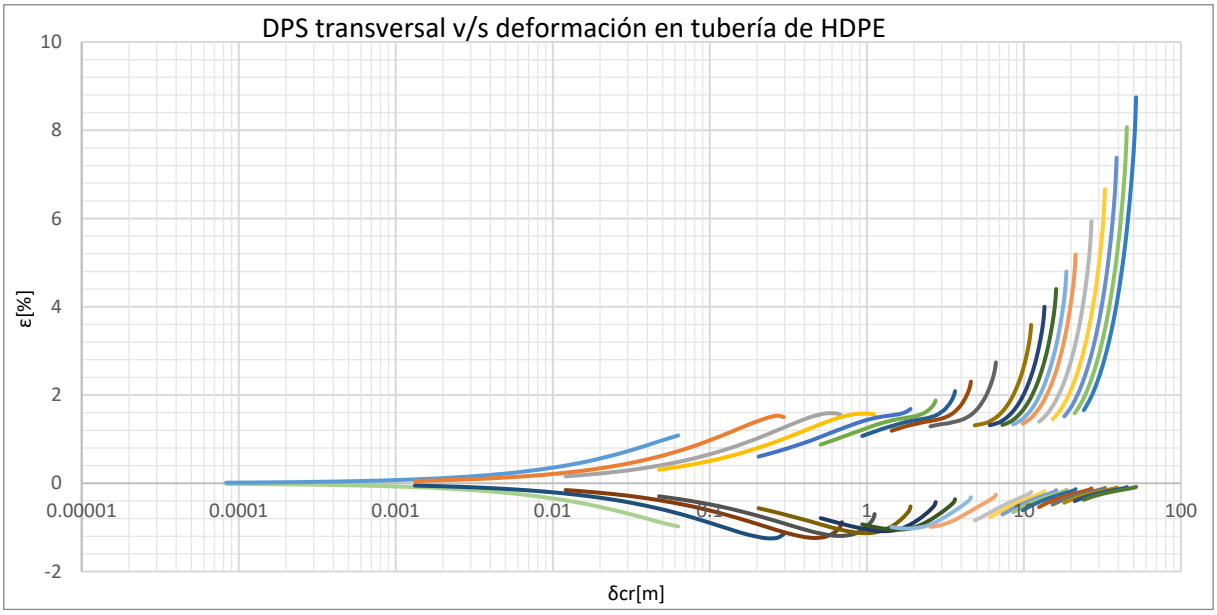


Gráfico 9-23: Comportamiento de las tuberías de HDPE en el rango post-Elástico.

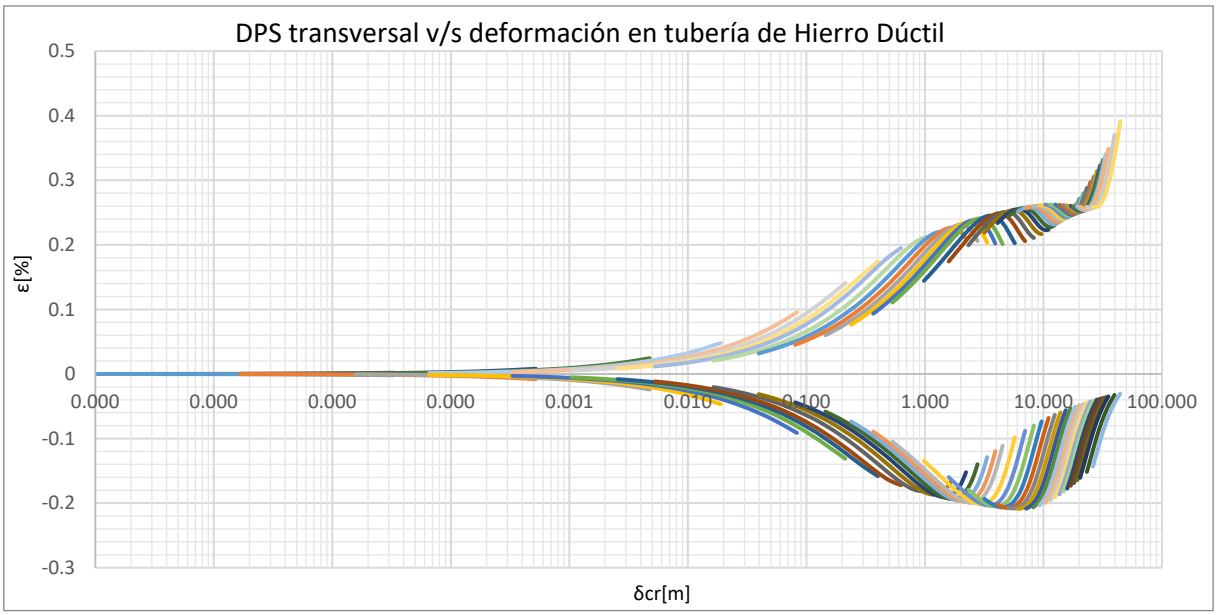


Gráfico 9-24: Comportamiento de las tuberías de Hierro Dúctil en el rango post-Elástico.

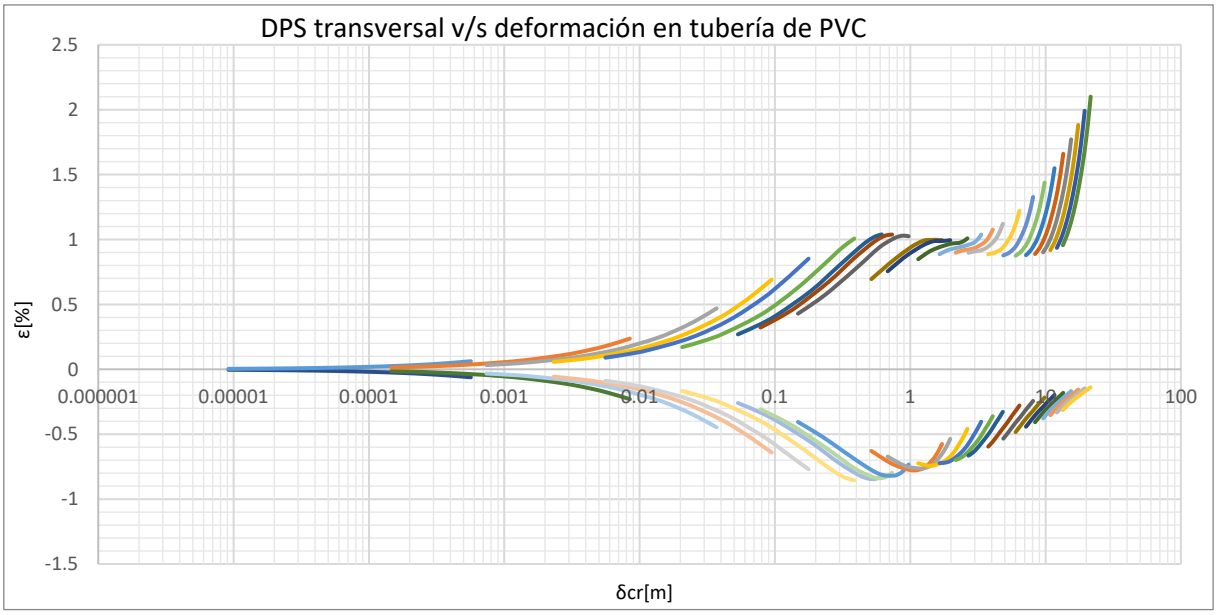


Gráfico 9-25: Comportamiento de las tuberías de PVC en el rango post-Elástico.

Se observa que todos los materiales comienzan a comportarse en forma flexible a distintos niveles de desplazamiento transversal. En el caso del acero, durante toda su incursión en el rango elástico se comporta en forma rígida, con una deformación simétrica en tensión y compresión. Además, se observa que tiene una transición de un comportamiento rígido a elástico en el ancho de falla W=30 [m] aproximadamente.

En cambio el HDPE, debido a su mayor flexibilidad, comienza en forma más temprana a comportarse como cable, notándose una transición en un ancho de falla aproximado de 20 metros con

deformaciones en tensión mucho mayores que en compresión, de hecho para el caso del HDPE de tensión PE200 la deformación en compresión no alcanza a llegar a la fluencia independiente de la magnitud del ancho de falla. Por lo mismo, ni siquiera fue graficada ya que no presentará problemas de este tipo.

El Hierro Dúctil muestra un comportamiento similar al acero con un comportamiento simétrico en su deformación en tensión y compresión hasta niveles superiores al rango en el cual el tubo fluye. Debido a su mayor rigidez la transición de comportamiento rígido-elástico se observa recién pasado un ancho de falla de 90 metros a diferencia del PVC, en el cual su comportamiento se asemeja a lo ocurrido en el HDPE mostrando su transición aproximadamente en W=12 [m].

Por último, se aprecia que en las tuberías de comportamiento más rígido (Acero y Hierro Dúctil) existe una zona, en la transición entre el comportamiento de viga a cable, en la cual un aumento de diámetro provoca deformaciones más grandes, teniendo mayor influencia la resistencia que opone el suelo a esos diámetros que la disminución en los desplazamientos que provocan. Situación que se vuelve a invertir, volviendo a la tónica de disminución de deformación con el aumento de diámetro.

Tabla 9-7: Máximo anchos de fallas permitidos en cada material para un DPS transversal.

W[m]		Acero	HDPE			Hierro Dúctil	PVC
Tipo de suelo	D[m]		PE80	PE100	PE200		
Arena Fina	[0.1-0.25]	[4-7]	[1-5]	[1-5]	-	-	[1-3]
	[0.25-0.4]	[7-12]	[5-9]	[5-9]	-	[8-13]	[3-5]
	[0.4-0.9]	[12-25]	[9-15]	[9-15]	[175-355]	[13-23]	-
	[0.9-1.6]	[25-33]	-	[15-20]	[355-375]	[23-45]	-
	[1.6-2]	[33-45]	-	-	[375-200]	[45-50]	-
	[2-4]	-	-	-	[200-95]	-	-
Arena Gruesa	[0.1-0.25]	[2-4]	[0-3]	[0-3]	-	-	[0-2]
	[0.25-0.4]	[4-8]	[3-5]	[3-5]	-	[5-8]	[2-3]
	[0.4-0.9]	[8-16]	[5-9]	[5-9]	[55-130]	[8-18]	-
	[0.9-1.6]	[16-27]	-	[9-14]	[130-45]	[18-28]	-
	[1.6-2]	[27-30]	-	-	[45-35]	[28-35]	-
	[2-4]	-	-	-	[35-55]	-	-
Limo de Baja Plasticidad	[0.1-0.25]	[3-6]	[1-5]	[1-5]	-	-	[1-3]
	[0.25-0.4]	[6-11]	[5-8]	[5-8]	-	[8-13]	[3-5]
	[0.4-0.9]	[11-23]	[8-13]	[8-13]	[220-460]	[13-23]	-
	[0.9-1.6]	[23-32]	-	[13-19]	[460-490]	[23-35]	-
	[1.6-2]	[32-42]	-	-	[490-70]	[35-45]	-
	[2-4]	-	-	-	[70-85]	-	-

La Tabla 9-7 muestra los máximos anchos de fallas soportados antes de fluir por cada material, dentro de cierto rango de diámetros y enterrado en los tres tipos de suelos que se han analizado. El ancho de falla se relaciona de manera directa con el desplazamiento transversal ya que a mayor ancho de falla "W" mayor será el "δcr".

Se pude ver que se cumplen las condiciones comentadas previamente, es decir, a medida que aumenta el diámetro los materiales soportan mayores anchos de falla y por ende un desplazamiento transversal mayor. Esta condición parece no cumplirse en el HDPE de tensión mínima PE200 (con números rojos se indica esta inversión), la explicación radica en que a los diámetros pequeños de las tuberías de HDPE se les exige una mayor presión nominal (PN), por lo tanto, pueden soportar grandes desplazamientos. Sin embargo, para una misma exigencia de presión nominal, un diámetro mayor soportará un mayor desplazamiento transversal.

Por otro lado se observa que en todos los materiales, para un mismo rango diámetros, el tipo de suelo en el cual la tubería soporta mayores deformaciones es la arena fina, luego el limo de baja plasticidad y finalmente la arena gruesa, situación comentada anteriormente. Sin embargo, esta situación parece invertirse en los diámetros pequeños donde el limo de baja plasticidad comienza a permitir mayores desplazamientos que la arena fina, situación que se puede apreciar en materiales como el HDPE (PE200) y el PVC, manteniendo a la arena gruesa como el suelo que resiste menor desplazamientos.

Por último, se observa que las tuberías de HDPE PE200 son las que presentan un mejor comportamiento ante DPS transversales, reflejados en los mayores anchos de falla requeridos para hacer fluir la tubería.

9.3.2.1.2. DPS longitudinal al eje de la tubería

Los gráficos 9-26 al 9-29 muestran como varía la deformación de la tubería ante un DPS longitudinal al variar su diámetro para distintos largos de falla del terreno.

Como ya se mencionó anteriormente la deformación de una tubería, independiente de su material, siempre disminuye al aumentar el espesor o diámetro de la tubería. Se observa de los gráficos que esta condición se cumple hasta cierto valor donde la deformación permanece constante. En el caso del acero, parece no haber un cambio en la deformación al variar el diámetro. Por lo tanto, la deformación longitudinal se verá influenciada por el espesor de la tubería, tipo de suelo, largo de falla y desplazamiento longitudinal del terreno.

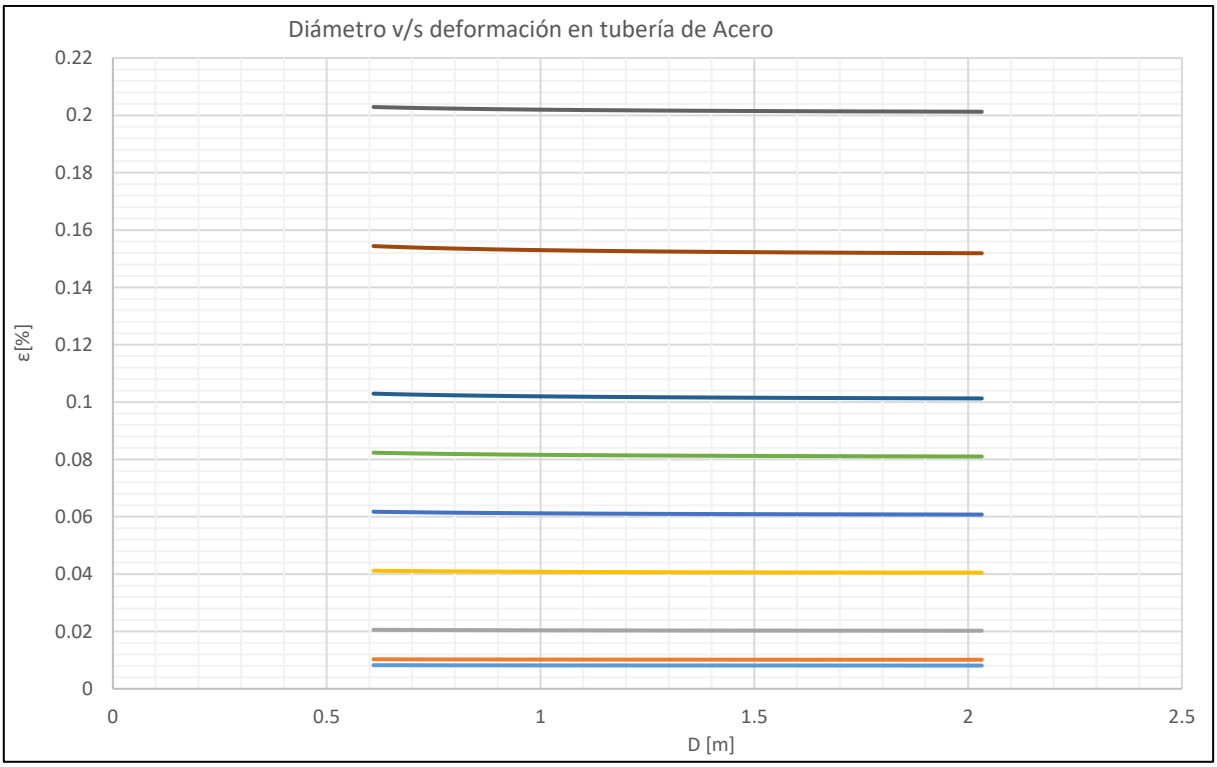


Gráfico 9-26: Comportamiento de las tuberías de Acero ante DPS longitudinales.

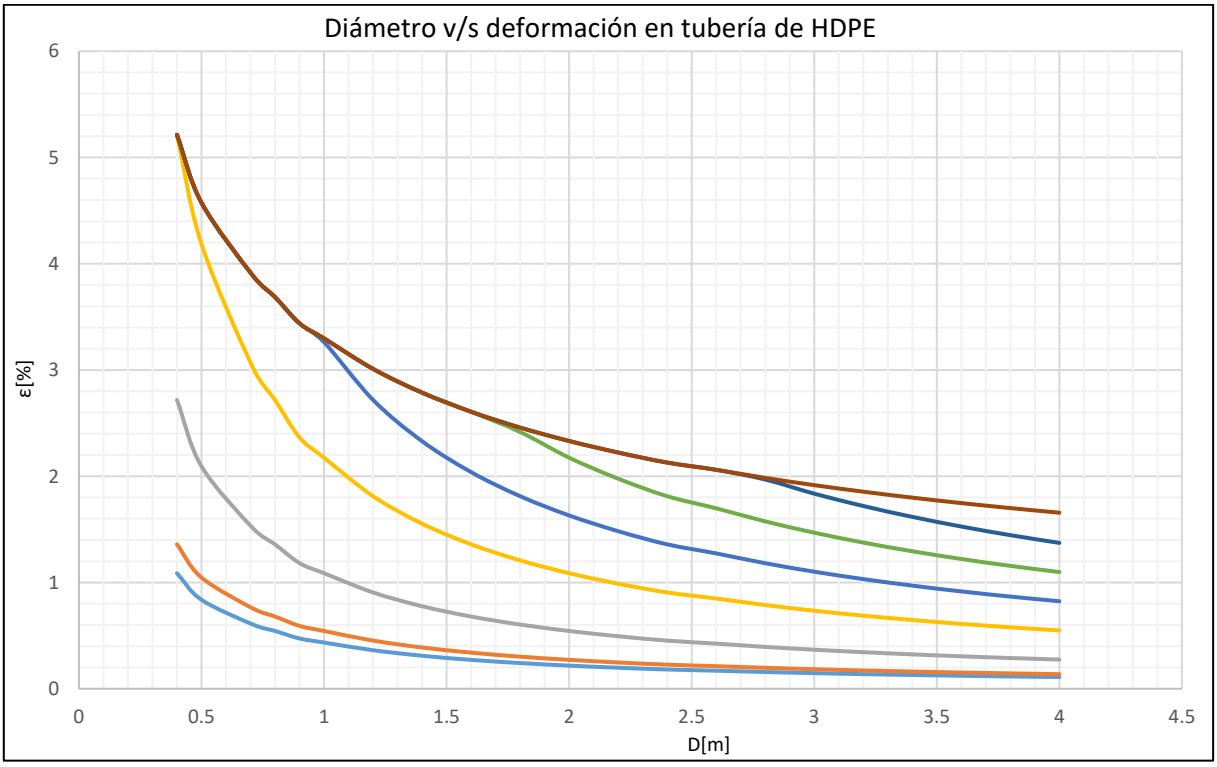


Gráfico 9-27: Comportamiento de las tuberías de HDPE ante DPS longitudinales.

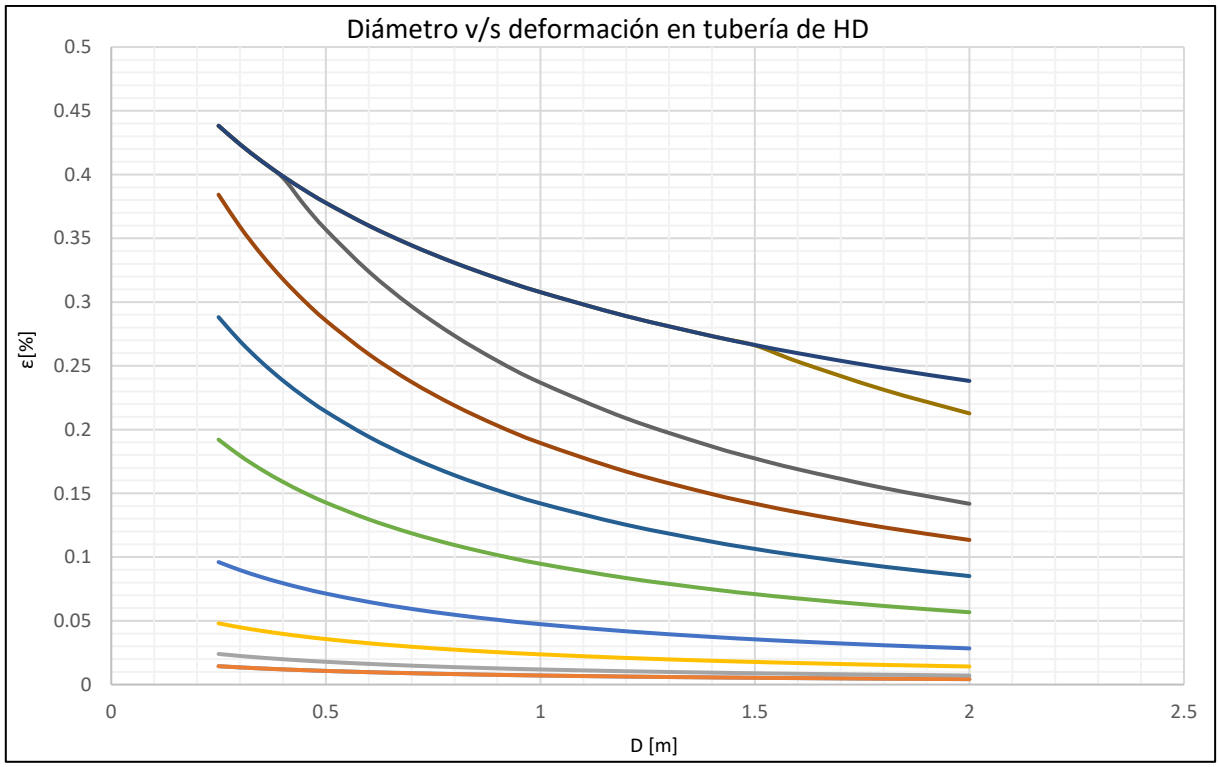


Gráfico 9-28: Comportamiento de las tuberías de Hierro Dúctil ante DPS longitudinales.

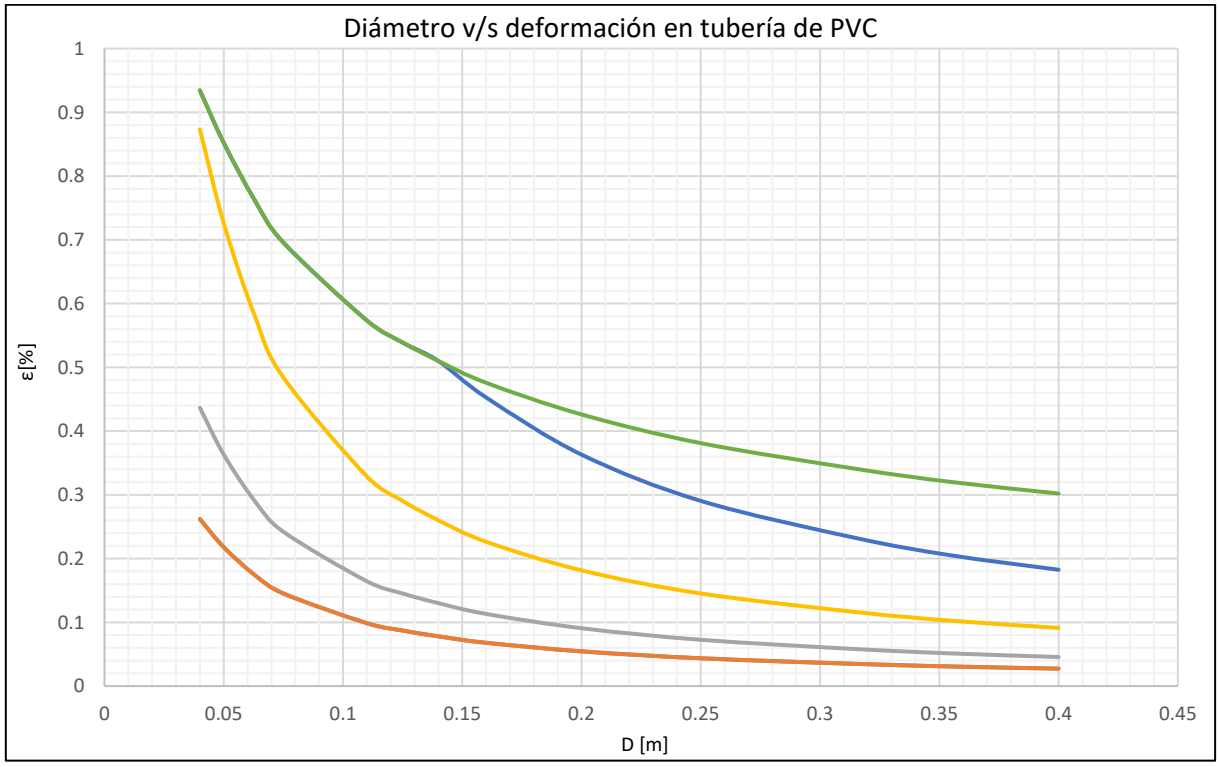


Gráfico 9-29: Comportamiento de las tuberías de PVC ante DPS longitudinales.

La Tabla 9-8 muestra los máximos largos de fallas (relacionado directamente con el desplazamiento longitudinal) que puede soportar cada material.

Tabla 9-8: Máximos largos de fallas permitidos en cada material para un DPS longitudinal.

L[m]		Acero	HDPE			Hierro Dúctil	PVC
Tipo de suelo	D[m]		PE80	PE100	PE200		
Arena Fina	[0.1-0.25]	[235-350]	[70-170]	[60-145]	-	-	[60-135]
	[0.25-0.4]	[350-600]	[170-270]	[145-233]	-	[415-505]	[135-215]
	[0.4-0.9]	[600-950]	[270-340]	[233-240]	[450-850]	[505-790]	-
	[0.9-1.6]	[950-1200]	-	[240-325]	[850-970]	[790-1150]	-
	[1.6-2]	[1200-1210]	-	-	[970-765]	[1150-1400]	-
	[2-4]	-	-	-	[765-915]	-	-
Arena Gruesa	[0.1-0.25]	[160-250]	[50-120]	[43-105]	-	-	[42-95]
	[0.25-0.4]	[250-410]	[120-190]	[105-160]	-	[280-340]	[95-155]
	[0.4-0.9]	[410-650]	[190-240]	[160-168]	[315-590]	[340-530]	-
	[0.9-1.6]	[650-820]	-	[168-225]	[590-680]	[530-800]	-
	[1.6-2]	[820-830]	-	-	[680-530]	[800-950]	-
	[2-4]	-	-	-	[530-640]	-	-
Limo de Baja Plasticidad	[0.1-0.25]	[680-1030]	[150-395]	[140-335]	-	-	[110-270]
	[0.25-0.4]	[1030-1700]	[395-630]	[335-530]	-	[1330-1600]	[270-430]
	[0.4-0.9]	[1700-2800]	[630-790]	[530-545]	[1035-1950]	[1600-2500]	-
	[0.9-1.6]	[2800-3450]	-	[545-750]	[1950-2200]	[2500-3800]	-
	[1.6-2]	[3450-3500]	-	-	[2200-1750]	[3800-4500]	-
	[2-4]	-	-	-	[1750-2100]	-	-

Cuando una tubería se somete a un DPS longitudinal, y se produce un largo de falla “L” determinado, la deformación irá aumentando a medida que aumenta el desplazamiento longitudinal “δ”, pero llega cierto valor de “δ” donde la deformación se independiza del él y solo depende del largo de la falla. Por este motivo, en la Tabla 9-8 se han supuesto un desplazamiento longitudinal tal que la deformación solo depende del largo de falla y se han anotado el rango de largo “L” en los cuales las tuberías de ciertos diámetros y materiales comienzan a fluir.

Se observa de la tabla que en todas las tuberías, independiente de cualquier condición extra, aumentan el largo de falla que pueden soportar a medida que crece el diámetro de ellas. Esta condición parece no cumplirse en algunos valores de la tubería de HDPE PE200 (ver números rojos). Sin embargo, como fue explicado en el caso de DPS transversales, esto se debe a que en el material de HDPE a los diámetros menores se le exige una presión nominal más alta, lo que provoca que se produzca esta mayor resistencia en algunos diámetros de menor tamaño.

Una diferencia clara, con respecto a los DPS transversales, es que el suelo limoso de baja plasticidad acepta mayores desplazamientos longitudinales que la arena suelta, manteniendo a la arena gruesa

como el suelo que admite los menores largos de falla. Esto no quiere decir que sea mejor enterrar tubería en arenas finas que en arenas gruesas, lo único que indica la tabla es que para un mismo largo de falla, la arena gruesa producirá mayores esfuerzos sobre la tubería debido a que es un terreno más firme y por ende más difícil que deslice ante un movimiento telúrico.

Por último, se observa que las tuberías de Acero son las que resisten de mejor forma los desplazamientos longitudinales, reflejado en los mayores largos de falla requeridos para hacerlas fluir, superada solamente por el Hierro dúctil en los diámetros superiores a los 1.6[m].

9.3.2.2. Tuberías de tramo segmentado

Como ya se comentado, las tuberías Hierro Dúctil y PVC no tienen métodos de unión como la soldadura de las de Acero o la termofusión de las de HDPE que logran una fusión tal entre tramos que permite ser considerada como una tubería continua. Por lo tanto, estos materiales se unen mediante acoplamientos, los cuales, se pueden separar ya sea por tensión o giro antes de lograr los anchos o largos de falla que han sido presentados anteriormente.

En las siguientes secciones se analizará, mediante los gráficos de los Anexos M y N, si las tuberías de Hierro Dúctil y PVC logran llegar a los valores dichos de “W” y “L” mostrado en las tablas anteriores.

9.3.2.2.1. DPS transversal al eje de la tubería

Si bien las tuberías de PVC son consideradas como segmentadas, los resultados obtenidos de su análisis como tubería continua indican que los máximos anchos de falla que puede soportar durante un DPS transversal es de 5 metros, lo que es menor al largo del tramo de tubería (6 metros). Por lo tanto, la tubería de PVC no cumple con la hipótesis para ser considerada como tubería continua, donde, el largo del tramo “Lo” era considerado pequeño en comparación al ancho de falla “W”. Debido a lo anterior, para el análisis de un DPS transversal, la tubería de PVC se considera como continua.

Por otro lado, la tubería de hierro dúctil puede resistir anchos de fallas hasta 50 metros, por lo que se analizará que ocurre con sus uniones y si es capaz de llegar mediante algún sistema de unión de segmento hasta éste valor.

Al analizar los gráficos que muestran la separación de las uniones ante un DPS transversal para tuberías de distintos diámetros (ver anexo M), se observa que los anchos de falla “W” de menor tamaño presentan mayores separaciones en los diámetros grandes, a medida que va aumentando el ancho de falla se empieza a invertir esta situación pasando a tener mayores separaciones los diámetros pequeños. Esto se debe a que cuando los anchos de falla son pequeños la apertura de la junta será dominada por el giro de la unión y los diámetros de mayor tamaño sufren separaciones más grandes ante un giro en sus uniones, en cambio, para ancho de falla mayores la separación axial es quien controla el problema, siendo los diámetros menores los más afectados.

En cuanto a los valores de separación, las tuberías enterradas en cualquiera de los tres tipos de suelos analizados presentarían problemas si el ancho de falla es menor a 20 metros, ya que el giro hace que los diámetros mayores a un metro tengan separaciones más grandes que las soportada por cualquiera de los tipos de juntas estudiadas en el capítulo 8.3. Sin embargo, para anchos de fallas mayores a este valor, la junta elástica o Acerrojada externa no tienen problemas en resistir las separaciones producidas en diámetros menores a 1.2 metros hasta llegar a los anchos de falla que producen la fluencia de la tubería según su análisis como tubería continua. Para diámetros mayores a 1.2 [m] se puede utilizar la junta elástica o junta Pamlock, aunque esta última tiene menor rango de tolerancia que la junta elástica por lo que no es recomendada.

9.3.2.2.2. DPS longitudinal al eje de la tubería

Para este caso, debido al tamaño de los largos de fallas soportados antes de fluir tanto por el Hierro como el PVC, ambos materiales (Hierro Dúctil y PVC) pueden ser analizados como tuberías segmentadas. Los gráficos del Anexo N muestran la separación en las uniones de una tubería al ser sometida a un DPS longitudinal para distintos largos de falla y desplazamientos del terreno. Los resultados muestran comportamientos similares en ambos materiales, en éstos, el valor de separación en las uniones va disminuyendo a medida que crece el largo de falla y aumenta para mayores valores de desplazamiento longitudinal “δ”.

En el caso del Hierro Dúctil, para desplazamientos de 0.5 [m], la separación de las uniones está en el rango de tolerancia de todos los tipos de juntas disponibles, pero a medida que aumenta la separación se requiere mayor largo de falla para poder soportar el desplazamiento sin fallar. Independiente del valor del desplazamiento, si el largo de la falla es mayor a 200[m] ninguna de las juntas utilizadas presentará problemas ante un DPS longitudinal al eje de la tubería.

Por otro lado, el PVC (de acuerdo a lo indicado en la Tabla 8-10 respecto a la separación admitida en sus uniones) parece no tener problemas en soportar los desplazamientos longitudinales cuando los largos de falla son mayores a 30 metros (según la experiencia es difícil que el terreno deslice si el largo de falla es menor a este valor).

10. Recomendaciones de diseño

Las recomendaciones de diseño se realizan de acuerdo con los resultados obtenidos con el modelo implementado, referente a la deformación sufrida por tuberías sometidas a un DPS transversal o longitudinal a su eje enterrada en cualquiera de los tres tipos de suelo estudiados. Estos suelos son: arena fina o suelta, arena gruesa o medianamente compactada y limo de baja plasticidad. De todos modos, el modelo tiene la capacidad de analizar cualquier tipo de suelo bajos las condiciones y supuestos descritos en este documento.

A continuación, se enumeran los datos a considerar a la hora de realizar el diseño de una tubería de conducción de agua potable que será enterrada en un suelo susceptible a sufrir desplazamientos:

1) Una vez que se tenga claridad del lugar geográfico por donde irá la tubería, es conveniente consultar a un mecánico de suelos sobre las características del terreno, quien indique cuales son los tipos de suelos predominante que rodearán a la tubería durante su trayecto. Datos como la densidad, cohesión y ángulo de fricción del suelo son esenciales para poder realizar un análisis, así como el coeficiente de fricción entre el suelo y el material de la tubería.

   Si bien este factor es difícil de controlar y depende de las condiciones del lugar físico donde se requiera el proyecto, es siempre deseable, esquivar los suelos arenosos o limosos de baja plasticidad ya que son los que tienen mayor probabilidad de desplazarse ante un evento telúrico, potenciados por su mayor facilidad de sufrir compactación o licuefacción. Aun así, se debe tener presente que lo suelos más firmes y con menor probabilidad de deslizar, si llegan a hacerlo los esfuerzos producidos en la tubería serán mayores y ésta fluirá ante desplazamientos menores del que lo haría, por ejemplo, en un suelo de arena fina.

2) Una vez que se tenga claridad de el o los suelos por donde pasará la tubería, se deben estudiar los lugares en los cuales puede ocurrir una falla, analizar si se encuentra en dirección transversal o longitudinal a la tubería y el ancho o largo de ella. En caso de estar en diagonal al eje de la tubería se debe analizar en ambos sentidos, estudiando de forma criteriosa al que pueda provocar mayores daños. Se debe tener en cuenta que según los resultados obtenidos, las tuberías son más sensibles a los desplazamientos transversales a su eje, tolerando desplazamientos menores que en los longitudinales antes de fluir.

3) Luego se debe realizar el diseño hidráulico de la tubería y verificar si el material, diámetro y espesor seleccionado tendrá problemas de fluir ante un evento sísmico. Esto se comprueba ingresando a los gráficos de los Anexos K, L, M y/o N con las dimensiones de la tubería y los parámetros obtenidos en el punto 1) y 2). De presentar posibles fallas de fluencia o pandeo local, se recomienda (dentro de los límites permitidos) aumentar el espesor o diámetro de la tubería y/o cambiar el material de ésta. Lo más recomendable es aumentar el espesor de la tubería, ya que si bien se demostró que el aumento del diámetro contribuye a la disminución de las deformaciones, también lleva consigo un aumento de las fuerzas de oposición al movimiento impuesto por el suelo pudiendo resultar contraproducente, ya que

como se mostró anteriormente existirá un rango de anchos de fallas en el Acero y Hierro Dúctil donde el aumento del diámetro acrecentará las deformaciones en la tubería. Por otro lado, cambiar el material de la tubería significa alterar las condiciones iniciales del problema modificando el diseño inicial referente a las presiones internas.

4) Si la tubería presenta problema por un DPS transversal, se puede revisar La Tabla 9-7 que muestra los anchos de fallas que puede soportar cada material, dentro de cierto rango de diámetros, antes de fluir. El ancho de falla soportado está en directa relación con el desplazamiento que soporta la tubería, es decir, a mayor ancho de falla, mayor será el desplazamiento transversal tolerado. Estos anchos de fallas consideran que la tubería se desplaza transversalmente hasta una distancia tal que la deformación sufrida se vuelve constante y no aumentará de forma significativa, aunque se siga desplazando el terreno. Por lo tanto, una tubería podrá soportar anchos de falla bastante mayores a los indicados en la tabla si el terreno no se desplaza en forma significativa.

   Si la tubería es una conducción de gran tamaño e importancia se recomienda utilizar HDPE de tensión mínima PE200, debido a que es el material que presentó el mejor comportamiento ante desplazamientos transversales, seguido por el Hierro Dúctil y el Acero. Para conducciones de menor tamaño, se puede utilizar el Acero o el HDPE de menor tensión mínima (PE100 o PE80), ya que tiene comportamientos similares. Sin embargo, el HDPE es un material más elástico, el cual puede presentar menos problemas si se incursiona en el rango post elástico, esta decisión debe ser tomada por el ingeniero a cargo.

   El PVC resultó ser un material no recomendado si el terreno presenta probabilidad de falla, ya que es capaz de resistir pequeños desplazamientos antes de fluir, siendo recomendado solo para conducciones locales de poca importancia.

5) En el caso de ser problemas por DPS longitudinales, la Tabla 9-8 muestra los largos de fallas que puede soportar cada material, dentro de cierto rango de diámetros, antes de fluir. El largo de falla soportado está en directa relación con el desplazamiento que soporta la tubería, es decir, a mayor largo de falla, mayor será el desplazamiento longitudinal tolerado. Al igual que el caso anterior, estos largos de fallas consideran que la tubería se desplaza longitudinalmente hasta una distancia tal que la deformación sufrida se vuelve constante y no aumentará de forma significativa más allá de cierto valor, aunque se siga desplazando el terreno, por lo tanto, una tubería podrá soportar largos de falla bastante mayores a los indicados en la tabla si el terreno no se desplaza en forma significativa.

   Los materiales que presentan mejor comportamiento ante DPS longitudinales son el Hierro Dúctil, el Acero y luego el HDPE de PE200, siendo estos tres los que se recomiendan para el uso en conducciones de importancia en las que un fallo puede causar grandes pérdidas o daños. Si la conducción es de menor importancia, se puede utilizar el HDPE de PE 80 o 100, los que presentaron un comportamiento similar, aunque superado por el PE80 el cual tiene una plasticidad un poco mayor dada por su menor densidad.

El PVC nuevamente es el material que peor comportamiento presentó, siendo recomendado solo para conducciones de poca importancia.

6) Si bien, en los puntos 4) y 5) se indicó al Hierro Dúctil como un material que presenta buen comportamiento ante DPS en tramos continuos de conducción, se debe recordar que la unión de sus segmentos de tubería es mediante juntas que se pueden separar antes de llegar a los valores de las tablas 9-7 o 9-8. Sobre todo, si los anchos o largos de falla son pequeños y cerca de las uniones, lo que provocará considerables giros en las tuberías de gran diámetro que pueden generar filtraciones o una separación total, siendo preferible utilizar Acero o HDPE de PE200, antes que Hierro Dúctil en conducciones de alta importancia enterradas en suelos susceptibles a fallar. El PVC igual une sus segmentos de tuberías mediante juntas, pero debido a que fue recomendado para conducciones locales de baja importancia, solo se debe tener cuidado en instalarlas de forma correcta para evitar filtraciones.

7) Pese a lo indicado en el punto 6), si se opta por utilizar Hierro Dúctil, se recomienda el uso de junta elástica para diámetros menores a 1.3 metros y junta acerrojada externa para cualquier diámetro, ya que estas son las que tienen un mayor rango de tolerancia ante la separación por giros y tensión axial.

8) En cuanto a la instalación de la tubería se realizan las siguientes recomendaciones:

    a) Mantener la integridad de la tubería cuando sea instalada, ya que cualquier discontinuidad en ella puede crear un punto débil que genere daños antes de los valores estimados.
    b) Al realizar uniones por soldadura o termofusión, éstas deben ser capaz de resistir esfuerzos incluso mayores que en lugares donde no hay unión, para que la red pueda ser considerada como un tramo continuo y el análisis sea válido.
    c) Si bien no fue considerado en el análisis, es probable que, durante el trayecto de conducción, se deba realizar algún empalme en la tubería, ya sea de válvula, ventosa, etc. Es común, que el material de éste accesorio instalado, sea de material distinto al de la tubería, por lo tanto, es necesario que su instalación sea tan fuerte que resistan los mismos esfuerzos que soporta el material de la tubería.
    d) Incluir sistemas de respuesta frente a emergencias como válvulas de cortes antes de entrar en el área susceptible a fallar.
    e) Por último, de ser posible, esquivar las probables fallas o estabilizar el terreno con métodos como vibroflotación o inyección de concreto líquido.

11. Conclusiones

El modelo implementado permitió tener una referencia respecto al comportamiento de las tuberías enterradas en suelos que son propensos a fallar y desplazarse ante un movimiento telúrico. Los resultados obtenidos, y la planilla Excel realizada, tienen como objetivo principal ser utilizados por los ingenieros encargado del diseño de redes de conducción de agua potable, y así, evitar los cortes de aguas presentes cada vez que hay un sismo en el país.

Con el fin de obtener las expresiones necesarias para calcular la deformación en una tubería sometida a un DPS transversal, el profesor O'Rourke propuso como hipótesis principal un comportamiento rígido de la tubería cuando era sometida a desplazamientos con un ancho de falla pequeño, el cual se iba transformando en un comportamiento flexible a medida que W aumentaba. Los gráficos 9-22, 9-23, 9-24 y 9-25 muestran que esta hipótesis se cumple en los materiales de Acero, HDPE, Hierro Dúctil y PVC respectivamente. Siendo válidas las expresiones utilizadas para realizar los cálculos de deformación en estos cuatro materiales.

En el caso de los DPS longitudinales, para obtener las expresiones necesarias, se asumió que hay una adherencia perfecta entre el suelo y la tubería, lo que hace que tengan un desplazamiento en conjunto. Esta hipótesis es difícil de cumplir en la práctica, sobre todo porque la lisura de las tuberías busca disminuir el rose con el suelo. Sin embargo, lo único que provoca esta suposición es que los resultados arrojados sean menores a los que realmente resiste la tubería, siendo utilizado como un factor de seguridad. Aun así, los resultados arrojados por el modelo muestran que los materiales estudiados resisten grandes desplazamientos longitudinales antes de entrar en fluencia, por lo que la tensión parece no ser un problema. Lo que sí se debe comprobar es que el material no se pandeé cuando es sometido a esfuerzos de compresión, debiendo ser verificado con las expresiones de la Tabla 7-2.

En el caso de las tuberías segmentadas, es decir, las que no tienen un método de unión que las haga ser consideras como un tubo continuo de conducción, se calculó la separación de sus uniones debido a DPS transversales y longitudinales. Mostrando que para un DPS transversal el mayor conflicto lo presentan las tuberías con diámetros mayor a 1 metro que se someten a fallas del terreno pequeñas (cercanas al tamaño del segmento de tubería), ya que el giro producido en la unión provoca separaciones que las juntas no son capaces de resistir. En cambio, cuando el DPS es longitudinal los diámetros pequeños presentarán mayor separación en las uniones debido a los esfuerzos de tensión.

Para todos los casos anteriores, es decir, tuberías continuas o segmentadas sometidas a DPS transversales o longitudinales, se concluyó que la mejor opción para disminuir las deformaciones en la tubería es aumentar su espesor. Otra opción es acrecentar el diámetro, pero esto va de la mano con un incremento de las fuerzas resistentes que el suelo opone al movimiento de la tubería, aumentados los esfuerzos en las paredes del tubo. Por último, se pueden revisar las tablas 9-7 y 9-8 y cambiar el material seleccionado a uno que tenga un mejor comportamiento frente a la situación

que se está analizando. Sin embargo, este cambio también modificará el diseño previo referente a las presiones internas que debe resistir la tubería en su función de transportar agua potable.

También, con el fin de facilitar el diseño de redes de conducción frente a sismos, se realizaron gráficos que muestran la deformación y desplazamiento de tuberías de distintos materiales, diámetros y espesores enterradas en suelos susceptibles a deslizar en un terremoto. Incluyendo suelos de arena fina y/o suelta, suelos de arena gruesa y/o compactada y suelos limosos de baja plasticidad. Estos gráficos que se encuentran en los anexos del presente documento, sirvieron como base para realizar las recomendaciones de diseño del capítulo 10, mostrando el buen comportamiento que presentan materiales como el HDPE de PE200 ante un evento sísmico, seguido por el Acero y Hierro Dúctil que son los materiales ideales para terrenos inestables. Del análisis se dedujo que, si bien un suelo menos compactado como la arena fina es más propenso a fallar y desplazarse en un sismo, las fuerzas que se oponen a su movimiento también serán menores y, por ende, puede llegar a un desplazamiento mayor que en un suelo más compactado.

Finalmente, se debe mencionar que la base teórica de este documento está fundada en los estudios del profesor O´Rourke, quien ha dedicado su carrera al estudio del comportamiento de tuberías enterradas frente a un sismo. Sin embargo, al ser uno de los pocos profesionales que ha incursionado más a fondo en este tema, la validación de las expresiones realizadas se basa en experiencia histórica anterior, principalmente en tuberías de acero que han mostrado comportamientos similares al predicho en sus modelos. Quedando como desafió hacía el futuro diseñar basándose en el modelo implementado y hacer un seguimiento de las tuberías, incluyendo artefactos como sensores que permitan hacer mediciones de las deformaciones sufridas en un terremoto, las que afirmen o refuten la teoría, debido a que un país símico como Chile siempre estará sometido a este problema.

12. Referencias

[1] American Water Works Association, Steel Pipe- A guide for Design and Installation, M11 2005, U.S., 1964, 263 p.

[2] American Water Works Association, PE Pipe- Design and Installation, M55 2006, U.S., 2006, 178 pp.

[3] American Water Works Association, Ductile- Iron Pipe and Fittings, M41 2009, U.S., 1996, 276 pp.

[4] American Water Works Association, PVC Pipe- Design and Installation, M23 2002, U.S., 2002, 181 pp.

[5] American Lifelines Alliance, Guidalines for the Design of Buried Steel Pipe, U.S., ASCE, Julio 2001, 83 pp.

[6] ALVENIUS, Alvenius chilena [En línea], <https://www.alveniuschilena.cl> [Consulta: 16 mayo 2016].

[7] CINTAC, Cintac [En Línea] <https://www.cintac.cl] [Consulta: 20 mayo 2016].

[8] El Hmadi, K. y O´Rourke, M.J., Seismic Damage to Segmented Buried pipelines, Earthquake Engineering and Structural Dynamics (19):529-539, mayo 1990.

[9] Essbio y Nuevosur, El caso de Essbio y Nuevosur lecciones del 27/F, Concepción, Chile, Essbio S.A, Alfil Publicaciones Ltda., 2015, 164 pp.

[10] FASTPACK, Fastpack soluciones en piping [En línea] <https://www.fastpack.cl> [Consulta: 19 mayo 2016].

[11] González, S. y Rodríguez, P., Análisis de vulnerabilidad de tuberías sometidas a deslizamientos, tesis realizada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería-Geotecnia, Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2010, 178 pp.

[12] Hall, W. y Newmark, N., Seismic Design Criteria for Pipelines and Facilities, New York, ASCE, 1977, 34 pp.

[13] KRAH, Krah piping Solutions [En línea], <https://www.krah.cl> [Consulta: 17 mayo 2016].

[14] Mella, M. y Beltran, M., Revisión de modelos numéricos para predecir el comportamiento de tuberías enterradas ante solicitaciones sísmicas, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile, Universidad de Chile, 2013, 131 pp.

[15] O'Rourke, M.J. y Xuejie Liu, Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects, New York, MCEER, 1999, 249 pp.

[16] O' Rourke, M.J. y Nordberg, C., Behavior of Buried Pipelines Subject to Permanent Ground Deformation, Madrid, España, NCEER, 1992, Vol. 9.

[17] O' Rourke, M.J. y Nordberg, C., Analysis Procedures for Buried Pipelines Subject to Longitudinal and Trasverse Permanent Ground Deformation, New York, NCEER, 1991, 453 pp.

[18] O' Rourke, M., Meyersohn, W.D, Shiba, Y., y Chaudhuri, D., Evaluation of Pile Response to Liquefaction-Induce Lateral Spread, Buffalo, New York, NCEER, 1994, 479 pp.

[19] O'Rourke, M. y Trautmann, C.H., Analytical Modeling of Buried Pipeline Response to Permanent Earthquake Displacements, Ithaca, New York, Conrnell University, 1980, 85 pp.

[20] Organización Panamericana de la Salud, Reducción de daño sísmico, Donald B. Ballantyne: Minimzing Earthquake Damage. A guide for Water Utilities, U.S., AWWA, 1994, 87 pp.

[21] Pineda, P. y Ordaz, S., Estimación de daño sísmico en tuberías enterradas, Tesis para optar por el grado de Doctor en Ingeniería, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006, 102 pp.

[22] Quijada, O. y Collarte, C., Mejoramiento de suelos en base a los métodos de virbroflotación y vibrosustitución, Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor, Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile, 2008, 165 pp.

[23] Rojas, R., Sánchez, P. y Ortiz, S., Civilgeeks.com Ingeniería y Construcción [En línea], <https://www.civilgeeks.com> [Consulta: 21 junio 2016].

[24] Suzuki, N. y Masuda, N., Idealization of Permanent Ground Movement and Strain Estimation of Buried Pipes, San Francisco, California, NCEER, 1991, 469 pp.

[25] Suzuki, N., Kobayashi, T., Nakane, H., y Ushikawa, M., Modeling of Permanent Ground Deformation for Buried Pipelines, Buffalo, New York, NCEER, 1989, 425 pp.

[26] Trautmann, C.H, y O'Rourke, M., Load-Displacement Characteristics of a Buried Pipe Affected by Permanent Earthquake Ground Movements, New York, ASME, 1983, 262 pp.

[27] TUBEXA, Soluciones integrales al transporte de fluidos [En línea], <https://www.tubexa.cl> [Consulta: 16 mayo 2016].

[28] U.S. Pipe and Foundry Company, Inc., Ventas Internaciones de Tuberías y Accesorios de Hierro Dúctil, Birmingham, Alabama, NSF, 2009, 54 pp.

[29] VINILIT, Vinilit an Aliaxis Company [En Línea], <https://www.vinilit.cl> [Consulta: 17 mayo 2016].

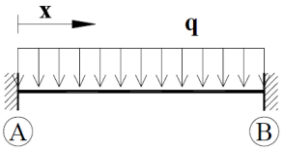
[30] VII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA (8°, 2014, Santiago, Chile). Sitios afectados por licuefacción a causa del terremoto 27-F, Santiago, Chile, Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica, 2014. 10 p.

13. Anexos

A. Expresión analítica para una Viga Rígida.

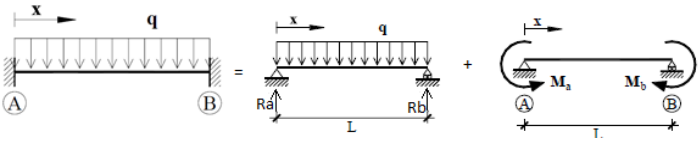
Para pequeños anchos de falla la deformación crítica del terreno y su comportamiento están controlados por la flexión.

O'Rourke y Liu plantean un modelo de una tubería rígida, representada como una viga empotrada en ambos extremos soportando una carga distribuida igual al esfuerzo transversal del suelo sobre la tubería, tal como se muestra a continuación:



Donde, $q = p_u$ y L=W.

Por superposición se tiene que:



Aplicando simetría se obtienen las reacciones Ra y Rb:

$$Ra = Rb = \frac{p_u W}{2} \tag{13-1}$$

Por otro lado, la curvatura de una viga sometida a flexión está dada por:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \tag{13-2}$$

Si se define como línea elástica la curva que forma el eje neutro de la viga, la relación entre la curvatura y la pendiente de la curva es:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}}{\left(1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2\right)^{3/2}} \tag{13-3}$$

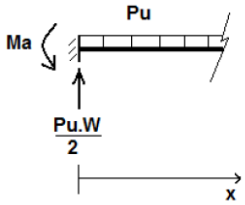
Para deflexiones pequeñas, el termino de segundo orden tiende a cero, resultando:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{13-4}$$

Igualando (13-2) y (13-4) se obtiene:

$$\frac{M}{EI} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{13-5}$$

Ahora, por integración y utilizando las condiciones de borde de una viga biempotrada, es posible calcular el corte y momento interno en la viga.



Corte interno en viga:

$$V_{(x)} = \frac{p_u W}{2} - p_u x \tag{13-6}$$

Integrando, se obtiene el momento interno:

$$M_{(x)} = \int_0^x V_{(x)} dx = \frac{p_u W x}{2} - \frac{p_u x^2}{2} + C1 \tag{13-7}$$

Por condición de borde se sabe que:

$$M_{(0)} = Ma \ \rightarrow C1 = Ma$$

Por lo tanto:

$$M_{(x)} = \frac{p_u W x}{2} - \frac{p_u x^2}{2} + Ma \tag{13-8}$$

Remplazando (13-8) en (13-5) se tiene:

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{p_u W x}{2} - \frac{p_u x^2}{2} + Ma \tag{13-9}$$

Integrando ambas expresiones entre 0 y x:

$$EI\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{p_u W x^2}{4} - \frac{p_u x^3}{6} + M_a x + C2 \quad \textbf{(13-10)}$$

Por condición de borde se sabe que:

$$\frac{\partial y}{\partial x_{(0)}} = 0 \ \rightarrow C2 = 0$$

Además:

$$\frac{\partial y}{\partial x_{(W/2)}} = 0 \ \rightarrow Ma = -\frac{p_u W^2}{12} = -Mb$$

Por lo tanto:

$$EI\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{p_u W x^2}{4} - \frac{p_u x^3}{6} - \frac{p_u W^2 x}{12} \quad \textbf{(13-11)}$$

Integrando (13-11) entre 0 y x se obtiene:

$$EI * y = \frac{p_u W x^3}{12} - \frac{p_u x^4}{24} - \frac{p_u W^2 x^2}{24} + C3$$

Por condiciones de borde:

$$y_{(0)} = 0 \ \rightarrow C3 = 0$$

Resultando:

$$EI * y = \frac{p_u W x^3}{12} - \frac{p_u x^4}{24} - \frac{p_u W^2 x^2}{24} \quad \textbf{(13-12)}$$

Se sabe que el desplazamiento máximo se obtendrá en el centro de la luz, por lo tanto:

$$y_{(W/2)} = \delta_{cr-f}$$

Reemplazando, se obtiene finalmente que:

$$\delta_{cr-f} = \frac{p_u W^4}{384EI} \quad \textbf{(13-13)}$$

Por otro lado, es posible obtener la deformación debido a la flexión como:

$$\varepsilon_f = \frac{M}{EI} y \quad \textbf{(13-14)}$$

De la ecuación de la elástica se sabe que:

$$M_{(x)} = EI\frac{d^2y}{dx^2} \tag{13-15}$$

Asumiendo que la tubería se desplaza junto con el suelo, se puede aproximar su desplazamiento a la función propuesta por O'Rourke para modelar el suelo en (5-1). Así:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{2\pi^2\delta}{W^2}\cos\frac{2\pi x}{W} \tag{13-16}$$

Reemplazando (13-16) en (13-15) es posible obtener el momento máximo, el que es igual a:

$$M_{max} = EI\frac{2\pi^2\delta}{W^2} \tag{13-17}$$

Reemplazando (13-17) en (13-14), es posible obtener la deformación máxima debido a flexión:

$$\varepsilon_f = \pm\frac{\pi^2\delta D}{W^2} \tag{13-18}$$

En (13-18) se consideró Y=D/2 por simetría en la tubería.

La inercia de un cilindro de pared delgada es:

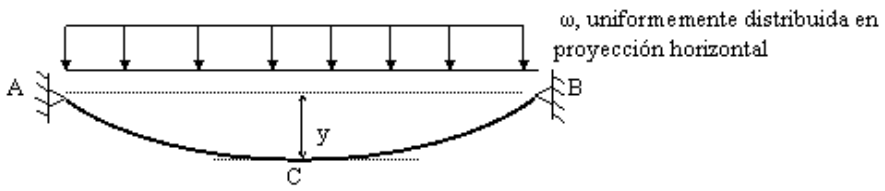
$$I = \frac{\pi t D^3}{8} \tag{13-19}$$

B. Expresión analítica para un Cable Flexible.

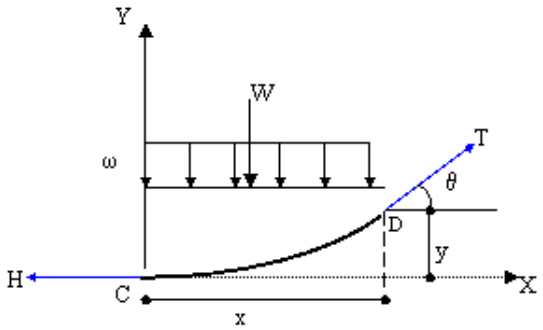
Para anchos de fallas "W" grandes la tubería se comporta como un cable flexible, razón por la cual se ignora la rigidez a flexión, y el desplazamiento crítico lo controla la fuerza axial.

Según Beer y Jhonston (1973) en un cable sujeto en dos puntos fijos que soportan una carga distribuida, la fuerza interna en un punto cualquiera corresponde a una fuerza de tensión "T", y está dirigida a lo largo de la tangente de la curva.

El caso es el presentado a continuación:



En un punto cualquiera (x,y) se tiene:



Es posible obtener las siguientes relaciones:

$$W = p_u x \tag{13-20}$$

$$T\cos\theta = H \qquad T\sin\theta = p_u x \tag{13-21}$$

$$T = \sqrt{H^2 + p_u x^2} \tag{13-22}$$

$$\tan\theta = \frac{p_u x}{H} \tag{13-23}$$

Debido a las condiciones de borde el momento en el punto D debe ser cero, por lo tanto:

$$\frac{p_u x^2}{2} - Hy = 0 \qquad \textbf{(13-24)}$$

Despejando la coordenada "y", se obtiene:

$$y = \frac{p_u x^2}{2H} \qquad \textbf{(13-25)}$$

La deflexión máxima, δ, se obtiene en el punto C, el cual, es el punto más bajo y se encuentra en una posición x= W/2, reemplazando en (13-25) obtenemos:

$$\delta = \frac{p_u W^2}{8H} \qquad \textbf{(13-26)}$$

Despejando H de (13-26) y reemplazando en (13-22), se tiene que la tensión del cable en un punto "X" cualquiera es:

$$T = \sqrt{\left(\frac{p_u W^2}{8\delta}\right)^2 + p_u x^2} \qquad \textbf{(13-27)}$$

Expresando (13-27) en función del ángulo "θ" se tiene:

$$T = \frac{p_u W^2}{8\delta}\sqrt{1 + (\tan\theta)^2} \qquad \textbf{(13-28)}$$

Por otro lado, se tiene que la expresión (13-23) evaluada en W/2, es igual a:

$$\tan\theta = \frac{4\delta}{W} \qquad \textbf{(13-29)}$$

Considerando que $W \gg \delta \ \rightarrow \tan\theta \approx 0 \ \rightarrow \theta \approx 0$.

Finalmente, el desplazamiento máximo se produce en el centro del cable, es decir, x=W/2 y es igual a:

$$T = \frac{p_u W^2}{8\delta} \qquad \textbf{(13-30)}$$

C. Cálculo de la deformación axial.

La longitud de arco de la cuerda se puede expresar como:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} \tag{13-31}$$

Lo que es igual a:

$$dl = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\, dx \tag{13-32}$$

Integrando:

$$l = \int_0^w \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\, dx \tag{13-33}$$

Esto se puede aproximar a:

$$l = \int_0^w 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx \tag{13-34}$$

Ahora, asumiendo que la tubería se desplaza junto con el suelo, se puede aproximar su desplazamiento con la función propuesta por O'Rourke para modelar el suelo en (5-1). Derivando esta función, se tiene:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\delta\pi}{W}\sin\frac{2\pi x}{W} \tag{13-35}$$

Reemplazando (13-35) en (13-34) tenemos:

$$l = \int_0^w 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\delta\pi}{W}\sin\frac{2\pi x}{W}\right)^2 dx \tag{13-36}$$

Integrando:

$$l = W + \left(\frac{\delta\pi}{2W}\right)^2 W \tag{13-37}$$

Finalmente, es posible calcular la elongación axial de la tubería como:

$$\varepsilon = \frac{l-w}{W} \tag{13-38}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\delta\pi}{2W}\right)^2$$

D. Solución ecuación de cuarto grado

En el presenta anexo se resolverá la ecuación de cuarto grado correspondiente a la deformación crítica de una tubería flexible. La ecuación es la siguiente:

$$\delta_{cr-t}{}^{4} - \left(\frac{W^4 P_u}{4\pi^3 DtE}\right)\delta_{cr-t} - \left(\frac{W^5 P_u{}^2}{64\pi^3 DtEt_u}\right) = 0$$

En la siguiente dirección:

http://www.josechu.com/ecuaciones_polinomicas/cuartica_solucion_es.htm

Se encuentra resuelta la ecuación (13-39), en función de los coeficientes a, b, c, d y e:

$$\mathrm{ax}^4 + \quad \mathrm{bx}^3 + \quad \mathrm{cx}^2 + dx + e = 0 \qquad \textbf{(13-39)}$$

Para la ecuación en estudio, estos coeficientes tienen los siguientes valores:

$$\begin{gathered} a = 1 \\ b = 0 \\ c = 0 \\ d = -\left(\frac{W^4 P_u}{4\pi^3 DtE}\right) \\ e = -\left(\frac{W^5 P_u{}^2}{64\pi^3 DtEt_u}\right) \end{gathered} \qquad \textbf{(13-40)}$$

Reemplazando, en las expresiones propuestas, se obtiene que la solución δ_1 y δ_2 son números imaginarios y la solución δ_3 es negativa. Por lo tanto, la solución a utilizar es la δ_4, que se presenta a continuación:

$$\delta_4 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2^{1/3}(12e)}{3\left(27d^2+\sqrt{-4(12e)^3+(27d^2)^2}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{\left(27d^2+\sqrt{-4(12e)^3+(27d^2)^2}\right)^{1/3}}{3*2^{1/3}} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{-\frac{2^{1/3}(12e)}{3\left(27d^2+\sqrt{-4(12e)^3+(27d^2)^2}\right)^{\frac{1}{3}}} - \frac{\left(27d^2+\sqrt{-4(12e)^3+(27d^2)^2}\right)^{1/3}}{3*2^{\frac{1}{3}}} - 8d}{4\sqrt{\frac{2^{1/3}(12e)}{3\left(27d^2+\sqrt{-4(12e)^3+(27d^2)^2}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{\left(27d^2+\sqrt{-4(12e)^3+(27d^2)^2}\right)^{1/3}}{3*2^{1/3}}}}}} \qquad \textbf{(13-41)}$$

E. Calculo de deformación unitaria máxima en una tubería elástica

Es posible obtener la deformación máxima unitaria como la suma de la deformación por tensión y la deformación por flexión:

La deformación por tensión se puede calcular según:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} \tag{13-42}$$

De la ecuación (5-7) se obtiene que $\frac{\sigma}{E}$ es aproximadamente:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\pi\delta}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \tag{13-43}$$

Por lo tanto, el término de la deformación asociado a la tensión es:

$$\varepsilon_t = \frac{\pi\delta}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \tag{13-44}$$

Por otro lado, la deformación por flexión se puede calcular según (13-18) como:

$$\varepsilon_f = \pm\frac{\pi^2\delta D}{W^2}$$

Finalmente se tiene que la deformación unitaria máxima de la tubería será igual a:

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_f \tag{13-45}$$

$$\varepsilon = \frac{\pi\delta}{2}\sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta D}{W^2} \tag{13-46}$$

El máximo valor de δ es igual a δ_{cr}.

F. Extensión y Rotación debido a DPS transversal

Al ocurrir un DPS transversal al eje de las tuberías en una conducción como la mostrada en la Figura 13-1, ocurre un extensión y rotación en la unión de los segmentos de tubería, tal como lo muestra la Figura 5-16.

(Fuente: <http://www.geosai.com/tuberia-hierro-ductil/>)

Figura 13-1: Tuberías de Hierro Dúctil segmentadas .

Esta extensión y rotación de las uniones es posible estimarla asumiendo que la tubería se desplaza junto con el suelo y que el terreno se mueve según la aproximación de O´Rourke indicada en (5-1).

Como se indica en (13-33) la longitud de arco es posible aproximarla como:

$$dl = \left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\delta\pi}{W}\sin\frac{2\pi x}{W}\right)^2\right)dx \qquad \textbf{(13-47)}$$

Luego la deformación diferencial es igual a:

$$\Delta x_t = \frac{1}{2}\left(\frac{\delta\pi}{W}\sin\frac{2\pi x}{W}\right)^2 dx \qquad \textbf{(13-48)}$$

Aproximando la longitud diferencia “dx” a la longitud del segmento de tubería “Lo”, se tiene que la deformación diferencial máxima es:

$$\Delta x_t = \frac{1}{2}\left(\frac{\delta\pi}{W}\right)^2 L_o \tag{13-49}$$

Este máximo se produce en los puntos X= W/4 y 3W/4.

Por otro lado, como se indica en (13-4) la rotación o curvatura se puede obtener como:

$$\Delta\Theta = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{13-50}$$

Luego el desplazamiento diferencial debido a la rotación es:

$$\Delta\Theta\frac{D}{2} = \Delta_{x_r} \tag{13-51}$$

Reemplazando, se obtiene que:

$$\Delta_{x_r} = \begin{cases} \frac{\pi^2\delta D L_o}{W^2}\cos\frac{2\pi x}{w}, & \Delta_{x_t} > \Delta\theta D/2 \\ \frac{2\pi^2\delta D L_o}{W^2}\cos\frac{2\pi x}{w}, & \Delta_{x_t} \leq \Delta\theta D/2 \end{cases} \tag{13-52}$$

Cuyos máximos se encuentran en X= 0, W/2 y W, siendo igual a:

$$\Delta_{x_r} = \begin{cases} \frac{\pi^2\delta D L_o}{W^2}, & \Delta_{x_t} > \Delta\theta D/2 \\ \frac{2\pi^2\delta D L_o}{W^2}, & \Delta_{x_t} \leq \Delta\theta D/2 \end{cases} \tag{13-53}$$

El desplazamiento total Δx, es posible obtenerlo como la suma del desplazamiento debido a la extensión y el desplazamiento debido a la rotación, sin embargo, ambos desplazamientos tienen su máximo en distintos puntos.

Graficando ambas funciones sinusoidales, Δx_t y Δ_{x_r}, O'Rourke y Nordberg obtuvieron que el máximo combinado de ambos desplazamientos es:

$$\Delta_x = \begin{cases} \frac{\pi^2\delta^2 L_o}{W^2}\left[\frac{2D}{\delta}\right], & 0.268 \leq D/\delta < 3.73 \\ \frac{\pi^2\delta^2 L_o}{2W^2}\left[1 + (D/\delta)^2\right], & otro\ caso \end{cases} \tag{13-54}$$

Siendo Δx la máxima apertura de las juntas.

G. Catálogo de Tubexa para tuberías de Acero

Tabla 13-1: Diámetros, espesores y presión de prueba tuberías de Acero A-36.

Diámetro Nominal	Diámetro Externo	Espesor de pared												
Pulg.	mm.	kgf/cm2												
		1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
2	48,0	118,59	158,13											
3	76,0	74,90	99,87											
4	102,0		74,41	111,62	148,82									
	114,3		66,40	99,61	132,81									
5	133,0		57,07	85,60	114,14	142,67	171,20							
	141,3		53,72	80,57	107,43	134,29	161,15							
6	152,0		49,93	74,90	99,87	124,84	149,80							
	168,3		45,10	67,65	90,20	112,75	135,29							
8	203,0		37,39	56,08	74,78	93,47	112,17							
	219,1		34,64	51,96	69,28	86,60	103,93							
10	261,0		29,08	43,62	58,16	72,70	87,24							
	273,0		27,80	41,70	55,60	69,51	83,41							
12	318,0		23,87	35,80	47,74	59,67	71,60							
	323,9		23,43	35,15	46,87	58,58	70,30							
14	355,6			32,02	42,69	53,36	64,03							
	368,0			30,94	41,25	51,56	61,88							
16	406,4			28,01	37,35	46,69	56,03	74,70	93,38					
	419,0			27,17	36,23	45,29	54,34	72,46	90,57					
18	457,2				33,20	41,50	49,80	66,40	83,01					
	470,0				32,30	40,37	48,45	64,60	80,74					
20	508,0				29,88	37,35	44,82	59,76	74,70	89,65				
	521,0				29,14	36,42	43,70	58,27	72,84	87,41				
22	558,8					33,96	40,75	54,33	67,91	81,50				
	572,0					33,17	39,81	53,08	66,35	79,62				
24	609,6					31,13	37,35	49,80	62,25	74,70	87,16	99,61		
	622,0					30,51	36,61	48,81	61,01	73,22	85,42	97,62		
26	660,4						34,48	45,97	57,47	68,96	80,45	91,94		
28	711,2						32,02	42,69	53,36	64,03	74,70	85,38		
30	762,0						29,88	39,84	49,80	59,76	69,72	79,69		
32	812,8						28,01	37,35	46,69	56,03	65,37	74,70		
34	863,6						26,37	35,16	43,94	52,73	61,52	70,31		
36	914,4						24,90	33,20	41,50	49,80	58,10	66,40		
38	965,2						23,59	31,45	39,32	47,18	55,05	62,91		
40	1.016,0						22,41	29,88	37,35	44,82	52,29	59,76		
42	1.066,8						21,34	28,46	35,57	42,69	49,80	56,92	64,03	71,15
44	1.117,6							27,17	33,96	40,75	47,54	54,33	61,12	67,91
48	1.219,2							24,90	31,13	37,35	43,58	49,80	56,03	62,25
52	1.320,8							22,99	28,73	34,48	40,23	45,97	51,72	57,47
56	1.422,4								26,68	32,02	37,35	42,69	48,02	53,36
60	1.524,0								24,90	29,88	34,86	39,84	44,82	49,80
64	1.625,6								23,35	28,01	32,68	37,35	42,02	46,69
68	1.727,2								21,97	26,37	30,76	35,16	39,55	43,94
72	1.828,8								20,75	24,90	29,05	33,20	37,35	41,50
76	1.930,4									23,59	27,52	31,45	35,39	39,32
80	2.032,0									22,41	26,15	29,88	33,62	37,35

Es posible obtener la presión de prueba para distintos tipos de acero aplicando los siguientes factores:

Tabla 13-2: Factores obtener la presión de prueba de distintos Aceros

FACTORES SEGÚN CALIDAD DE ACERO

(ASTM A36 = 1,00)

ASTM A283	GR A	= 0,664
	GR B	= 0,745
	GR C	= 0,826
	GR D	= 0,926
ASTM A572	GR 42	= 1,168
	GR 50	= 1,390
	GR 60	= 1,672
	GR 65	= 1,313
ASTM A252	GR 1	= 1,387
	GR 2	= 1,667
	GR 3	= 1,833
ASTM A570	GR C	= 0,916
	GR D	= 1,110
	GR E	= 1,116
ASTM A139	GR A	= 1,332
	GR B	= 1,667
	GR C	= 1,667
	GR D	= 1,667
	GR E	= 1,833

Formula para obtener el factor de aceros no especificados:

$$\text{Factor} = \frac{\text{Límite de Fluencia (kgf/mm}^2)}{25{,}3}$$

H. Catálogo de Krah para tuberías de HDPE

Tabla 13-3: Diámetros y espesores tuberías de HDPE PE100.

DIAMETRO EXTERIOR		SDR																							
		SDR26		SDR21		SDR17		SDR13,6		SDR11		SDR9													
		Presión Nominal (bar)																							
		PN6		PN8		PN10		PN12,5		PN16		PN20													
Dn	Dn (equiv)	min	Peso medio	min	Peso medio	min	Peso medio	min	Peso medio	min	Peso medio	min	Peso medio												
mm	Pulgadas	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m	mm	Kg/m												
20	½	–	–	–	–	–	–	–	–	2,0	0,12	2,3	0,13												
25	¾	–	–	–	–	–	–	2,0	0,15	2,3	0,17	3,0	0,21												
32	1	–	–	–	–	2,0	0,19	2,4	0,23	3,0	0,28	3,6	0,33												
40	1¼	–	–	2,0	0,25	2,4	0,29	3,0	0,36	3,7	0,43	4,5	0,51												
50	1½	2,0	0,31	2,4	0,37	3,0	0,45	3,7	0,55	4,6	0,67	5,6	0,79												
63	2	2,5	0,47	3,0	0,58	3,8	0,72	4,7	0,88	5,8	1,06	7,1	1,27												
75	2½	2,9	0,66	3,6	0,83	4,5	1,02	5,6	1,24	6,8	1,48	8,4	1,78												
90	3	3,5	0,94	4,3	1,19	5,4	1,46	6,7	1,78	8,2	2,14	10,1	2,57												
110	4	4,2	1,38	5,3	1,78	6,6	2,18	8,1	2,64	10,0	3,17	12,3	3,81												
125	5	4,8	1,80	6,0	2,28	7,4	2,78	9,2	3,40	11,4	4,12	14,0	4,93												
140	5½	5,4	2,24	6,7	2,85	8,3	3,49	10,3	4,25	12,7	5,13	15,7	6,18												
160	6	6,2	2,91	7,7	3,74	9,5	4,56	11,8	5,55	14,6	6,73	17,9	8,04												
180	7	6,9	3,72	8,6	4,70	10,7	5,76	13,3	7,05	16,4	8,51	20,1	10,18												
200	8	7,7	4,57	9,6	5,82	11,9	7,11	14,7	8,64	18,2	10,49	22,4	12,59												
225	9	8,6	5,79	10,8	7,36	13,4	9,02	16,6	10,98	20,5	13,28	25,2	15,93												
250	10	9,6	7,13	11,9	9,01	14,8	11,05	18,4	13,52	22,7	16,33	27,9	19,58												
280	11	10,7	8,96	13,4	11,37	16,6	13,88	20,6	16,94	25,4	20,48	31,3	24,61												
315	12	12,1	11,87	15,0	14,29	18,7	17,58	23,2	21,47	28,6	25,92	35,2	31,13												
355	14	13,6	14,35	16,9	18,14	21,1	22,38	26,1	27,23	32,2	32,91	39,7	39,54												
400	16	15,3	18,15	19,1	23,13	23,7	28,28	29,4	34,52	36,3	41,78	44,7	50,16												
450	18	17,2	23,41	21,5	29,25	26,7	35,83	33,1	43,73	40,9	52,90	50,3	63,50												
500	20	19,1	28,92	23,9	36,09	29,7	44,27	36,8	53,96	45,4	65,28	55,8	78,25												
560	22	21,4	36,29	26,7	45,17	33,2	55,47	41,2	67,70	50,8	81,78	62,5	98,18												
630	24	24,1	45,87	30,0	57,07	37,4	70,25	46,3	85,57	57,2	103,61	70,3	124,24												
710	28	27,2	58,30	33,9	72,77	42,1	89,28	52,2	108,88	64,5	131,83	79,3	158,17												
800	32	30,6	74,06	38,1	92,24	47,4	113,20	58,8	144,24	72,6	167,19	89,3	200,68												

Tabla 13-4: Diámetros y espesores tuberías de HDPE PE 200.

	Presión Nominal [bar]																							
	30			25			20			16			10			6		
Dn / ID	SIDR																	
	7			9			11,5			14,6			24			41		
[mm]	emín	Peso		emín	Peso		emín	Peso		emín	Peso		emín	Peso		emín	Peso	
	[mm]	[Kg / m]		[mm]	[Kg / m]		[mm]	[Kg / m]		[mm]	[Kg / m]		[mm]	[Kg / m]		[mm]	[Kg / m]	
300	41	53		34	43		27	33		21	25		13	15		8	9	
400	55	94		45	75		35	57		28	44		17	27		10	16	
500	69	146		56	116		44	89		35	69		21	41		13	24	
600	82	210		67	167		53	128		41	99		25	59		15	34	
700	96	286		78	227		61	174		48	134		30	80		18	47	
800	110	373		89	296		70	227		55	175		34	104		20	61	
900				100	375		79	287		62	222		38	132		23	77	
1.000				112	464		87	354		69	274		42	163		25	94	
1.200							105	510		83	394		50	234		30	136	
1.400										96	536		59	318		35	184	
1.600										110	700		67	415		40	241	
1.800										124	886		75	525		45	305	
2.000													84	648		50	376	
2.200													92	785		55	455	
2.400													100	933		60	541	
2.600													109	1.095		64	635	
2.800																69	736	
3.000																74	845	
3.200																79	962	
3.400																84	1.086	
3.600																89	1.218	
3.800																94	1.356	
4.000																99	1.502	

Tabla 13-5: Diámetros y espesores tuberías de HDPE PE80.

DIAMETRO		SDR 41		SDR 33		SDR 26		SDR 17.6		SDR 11		SDR 7.4	
		PN2,5		PN3,2		PN4		PN6		PN10		PN16	
mm	pulg	Espesor mm	Peso kg/m	Espesor mm	Peso kg/m	Espesor mm	Peso kg/m	Espesor mm	Peso kg/m	Espesor mm	Peso kg/m	Espesor mm	Peso kg/m
20	1/2	-	-	-	-	-	-	-	-	1,9	0,11	2,8	0,15
25	3/4	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	0,17	3,5	0,24
32	1	-	-	-	-	-	-	2,0	0,19	2,9	0,28	4,4	0,39
40	1 1/4	-	-	-	-	-	-	2,3	0,29	3,6	0,43	5,5	0,61
50	1 1/2	-	-	-	-	2,0	0,31	2,8	0,44	4,6	0,67	6,9	0,95
63	2	-	-	2,0	0,41	2,4	0,49	3,6	0,69	5,7	1,06	8,7	1,50
75	2 1/2	-	-	2,3	0,56	2,9	0,68	4,3	0,98	6,8	1,49	10,4	2,13
90	3	2,2	0,65	2,8	0,80	3,5	0,98	5,1	1,41	8,2	2,15	12,5	3,06
110	4	2,7	0,96	3,4	1,19	4,2	1,46	6,2	2,09	10,0	3,19	15,2	4,57
125	5	3,1	1,24	3,9	1,52	4,8	1,86	7,1	2,70	11,4	4,13	17,3	5,89
140	51/2	3,4	1,54	4,3	1,91	5,4	2,34	7,9	3,36	12,7	5,17	19,4	7,39
160	6	3,9	1,99	5,0	2,48	6,2	3,05	9,1	4,40	14,6	6,75	22,2	9,63
180	7	4,4	2,53	5,6	3,14	6,9	3,84	10,2	5,56	16,4	8,54	24,8	12,15
200	8	4,9	3,10	6,2	3,88	7,7	4,74	11,3	6,82	18,2	10,44	27,7	15,05
225	9	5,5	3,92	7,0	4,88	8,7	5,99	12,7	8,65	20,5	13,32	31,2	19,03
250	10	6,1	4,85	7,8	6,02	9,6	7,39	14,2	10,68	22,7	16,43	34,6	23,50
280	11	6,9	6,04	8,7	7,54	10,8	9,25	15,9	13,36	25,5	20,60	38,8	29,40
315	12	7,7	7,64	9,8	9,53	12,1	11,73	17,8	16,90	28,6	26,06	43,7	37,29
355	14	8,7	9,69	11,0	12,07	13,7	14,84	20,1	21,48	32,3	32,93	49,2	47,32
400	16	9,8	12,28	12,4	15,34	15,4	18,84	22,6	27,23	36,4	41,79	55,4	60,06
450	18	11,0	15,49	14,0	19,36	17,3	23,84	25,5	34,44	40,9	52,85	62,3	75,98
500	20	12,2	19,16	15,5	23,92	19,2	29,41	28,3	42,51	45,5	65,25	69,2	93,79
560	22	13,7	23,97	17,4	29,99	21,5	36,85	31,7	53,26	50,9	81,81		
630	24	15.4	30.32	19.5	37.91	24.2	46.63	35.7	67.37	57.3	103.56		

I. Catálogo de Saint-Gobain para tuberías de Hierro Dúctil

Tabla 13-6: Diámetros y presiones de trabajo para tubería de HD clase k7.

PRESIONES MAXIMAS ADMISIBLES - CANOS K7

DN	Caños - Clase K7					
	JGS			JTI		
	PMA	PFA	PEA	PMA	PFA	PEA
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
150	5,0	6,0	6,5	1,6	1,9	2,4
200	5,0	6,0	6,5	1,0	1,2	1,7
250	4,1	4,9	5,4	1,0	1,2	1,7
300	3,6	4,3	4,8	1,0	1,2	1,7
350	3,2	3,8	4,3	-	-	-
400	3,0	3,6	4,1	-	-	-
450	2,9	3,5	4,0	-	-	-
500	2,8	3,4	3,9	-	-	-
600	2,6	3,1	3,6	-	-	-
700	2,4	2,9	3,4	-	-	-
800	2,3	2,8	3,3	-	-	-
900	2,3	2,8	3,3	-	-	-
1000	2,2	2,6	3,1	-	-	-
1200	2,1	2,5	3,0	-	-	-

Tabla 13-7:Diámetros y presiones de trabajo para tubería de HD clase k9.

PRESIONES MAXIMAS ADMISIBLES - CANOS K9

DN	Caños - Clase K9											
	JGS			JTI			JTE			JPK		
	PMA	PFA	PEA	PMA	PFA	PEA	PMA	PFA	PEA	PMA	PFA	PEA
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
80	6,4	7,7	9,6	2,5	3,0	3,5	-	-	-	-	-	-
100	6,4	7,7	9,6	2,5	3,0	3,5	-	-	-	-	-	-
150	6,4	7,7	9,6	2,5	3,0	3,5	-	-	-	-	-	-
200	6,2	7,4	7,9	1,6	1,9	2,4	-	-	-	-	-	-
250	5,4	6,5	7,0	1,6	1,9	2,4	-	-	-	-	-	-
300	4,9	5,9	6,4	1,6	1,9	2,4	3,7	4,4	4,9	-	-	-
350	4,5	5,4	5,9	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
400	4,2	5,1	5,6	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
450	4,0	4,8	5,3	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
500	3,8	4,6	5,1	-	-	-	3,0	3,6	4,1	-	-	-
600	3,6	4,3	4,8	-	-	-	2,7	3,2	3,7	-	-	-
700	3,4	4,1	4,6	-	-	-	2,5	3,0	3,5	-	-	-
800	3,2	3,8	4,3	-	-	-	1,6	1,9	2,4	-	-	-
900	3,1	3,7	4,2	-	-	-	1,6	1,9	2,4	-	-	-
1000	3,0	3,6	4,1	-	-	-	1,6	1,9	2,4	-	-	-
1200	2,8	3,4	3,9	-	-	-	1,4	1,7	2,2	-	-	-
1400	2,8	3,3	3,8	-	-	-	-	-	-	2,5	3,0	3,5
1500	2,7	3,2	3,7	-	-	-	-	-	-	2,5	3,0	3,5
1600	2,7	3,2	3,7	-	-	-	-	-	-	2,5	3,0	3,5
1800	2,6	3,1	3,6	-	-	-	-	-	-	1,6	1,9	2,4
2000	2,6	3,1	3,6	-	-	-	-	-	-	Consultar		

De DN 80 a DN 600 la longitud útil de la tubería es de seis metros y de DN 700 a DN 1200 la longitud útil es de siete metros.

J. Catálogo de Vinilit para tuberías de PVC.

Tabla 13-8: Diámetros, espesores y clases de tuberías de PVC.

Diám. exterior		Clase 4		Clase 6		Clase 10		Clase 16 (*)	
Nominal (mm)	Nominal (pulg)	Espesor mín. (mm)	Peso tira (kg)	Espesor mín. (mm)	Peso tira (kg)	Espesor mín. (mm)	Peso tira (kg)	Espesor mín. (mm)	Peso tira (kg)
20	1/2	-	-	-	-	-	-	1,5	0,83
25	3/4	-	-	-	-	1,5	1,05	1,9	1,28
32	1	-	-	-	-	1,8	1,59	2,4	2,06
40	1 1/4	-	-	1,8	2,02	2,0	2,20	3,0	3,16
50	1 1/2	-	-	1,8	2,54	2,4	3,32	3,7	4,87
63	2	-	-	1,9	3,45	3,0	5,24	4,7	7,90
75	2 1/2	1,8	3,94	2,2	4,80	3,6	7,49	5,6	11,19
90	3	1,8	4,76	2,7	6,94	4,3	10,73	6,7	16,02
110	4	2,2	7,13	3,2	10,10	5,3	16,10	8,2	23,99
125	4 1/2	2,5	9,11	3,7	13,12	6,0	20,57	9,3	30,88
140	5	2,8	11,33	4,1	16,37	6,7	25,78	10,4	38,66
160	6	3,2	14,88	4,7	21,26	7,7	33,83	11,9	50,47
200	8	4,0	22,93	5,9	33,25	9,6	52,74	14,7	78,15
250	10	4,9	35,14	7,3	51,66	12,0	82,41	18,6	123,78
315	12	6,2	56,35	9,2	82,20	15,0	130,30	23,4	197,07
355	14	7,0	71,37	10,4	104,76	17,0	166,77	26,3	250,33
400	16	7,9	90,88	11,7	132,79	19,1	211,97	29,7	318,87

(*) Clase 16: pedidos especiales.

La longitud útil de las tuberías es de seis metros.

k. Gráficos de deformación de la tubería por desplazamientos del terreno perpendiculares a su eje.

k.1. Tuberías de Acero

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

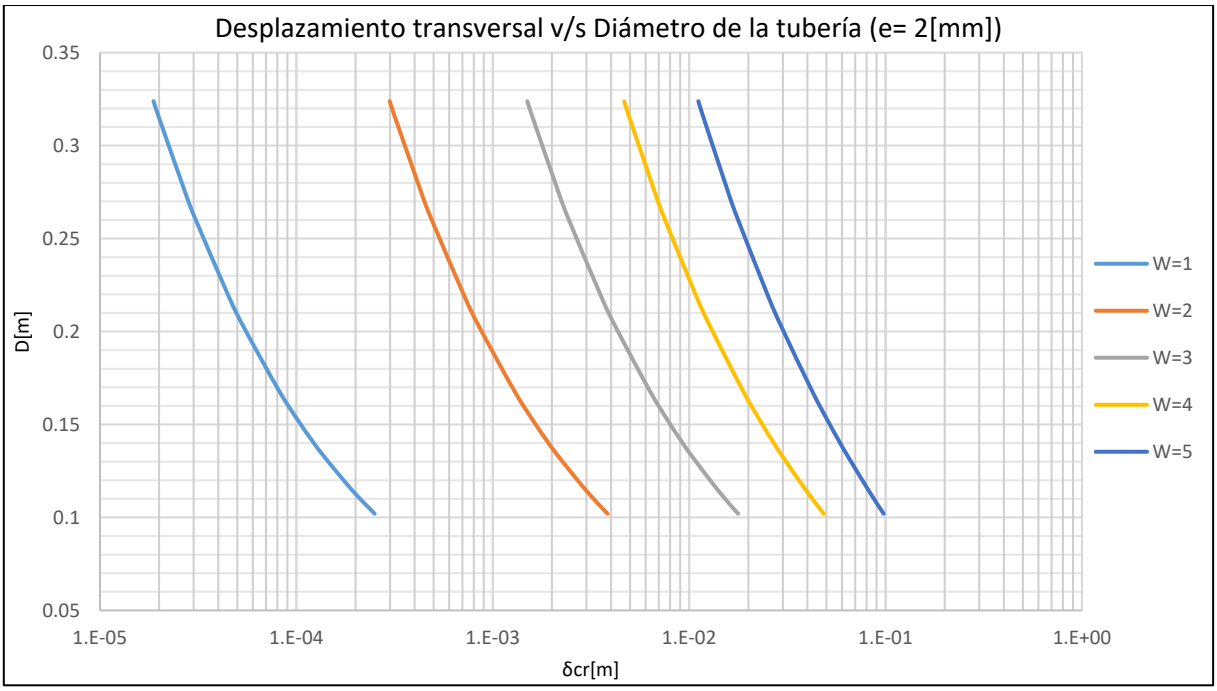


Gráfico 13-1: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], Suelo de Arena Fina.

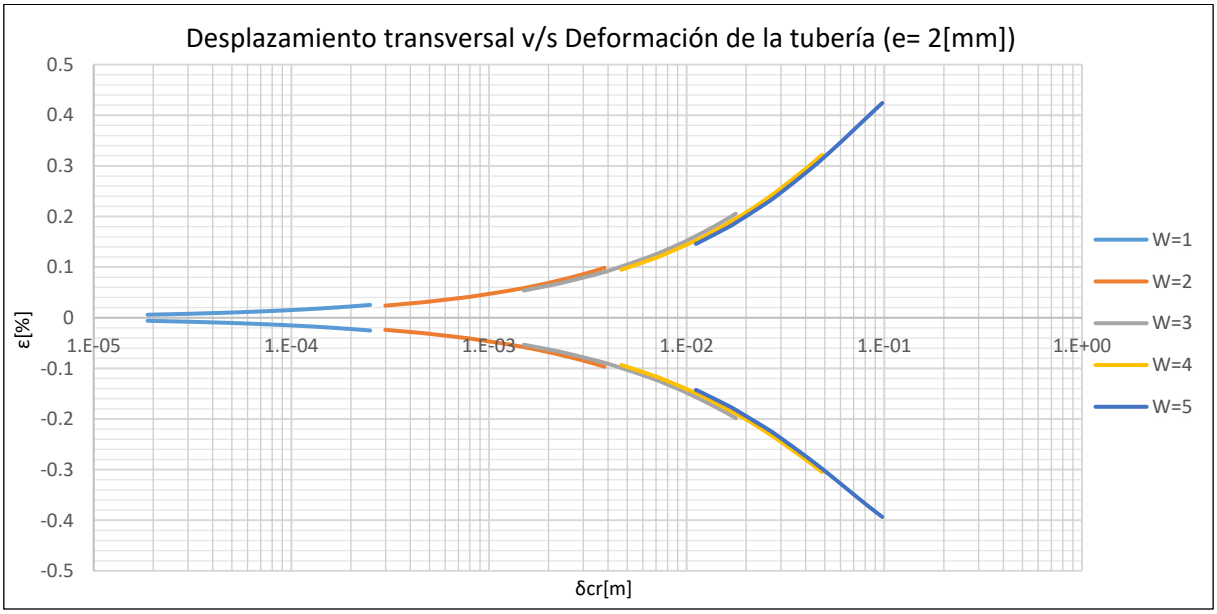


Gráfico 13-2: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], Suelo de Arena Fina.

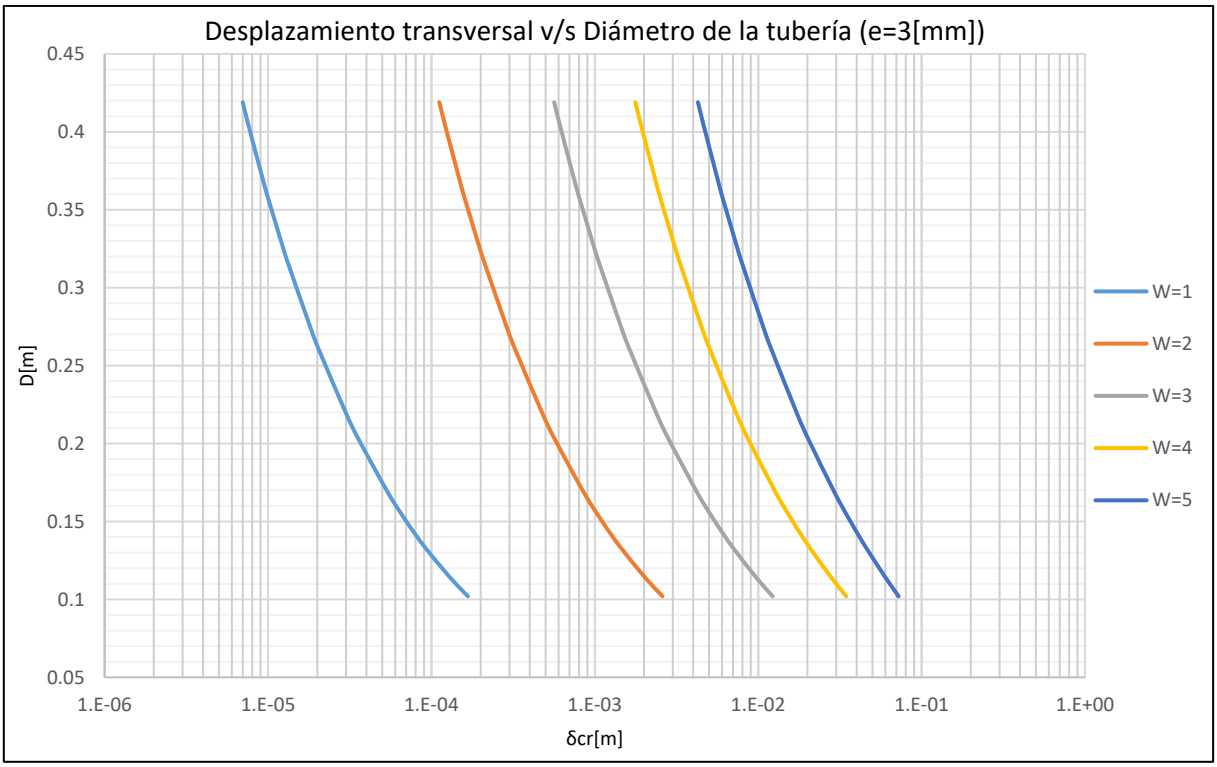


Gráfico 13-3: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], Suelo de Arena Fina.

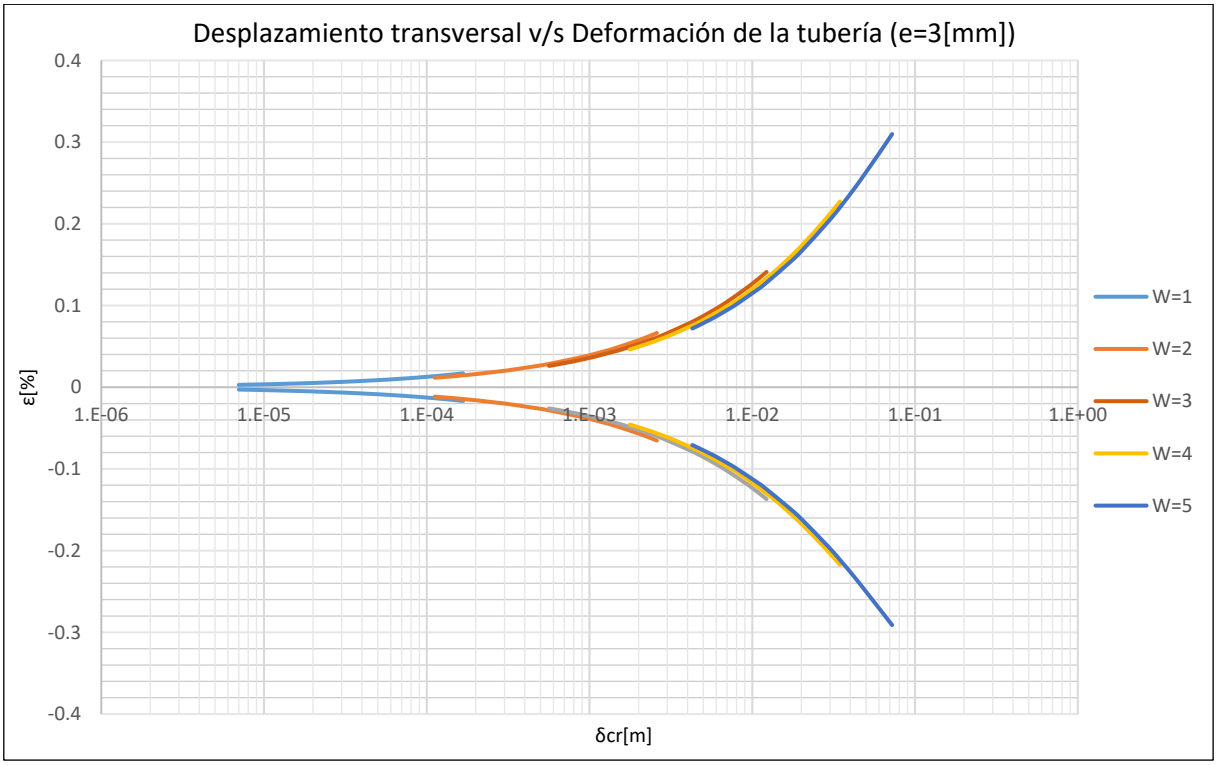


Gráfico 13-4: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], Suelo de Arena Fina.

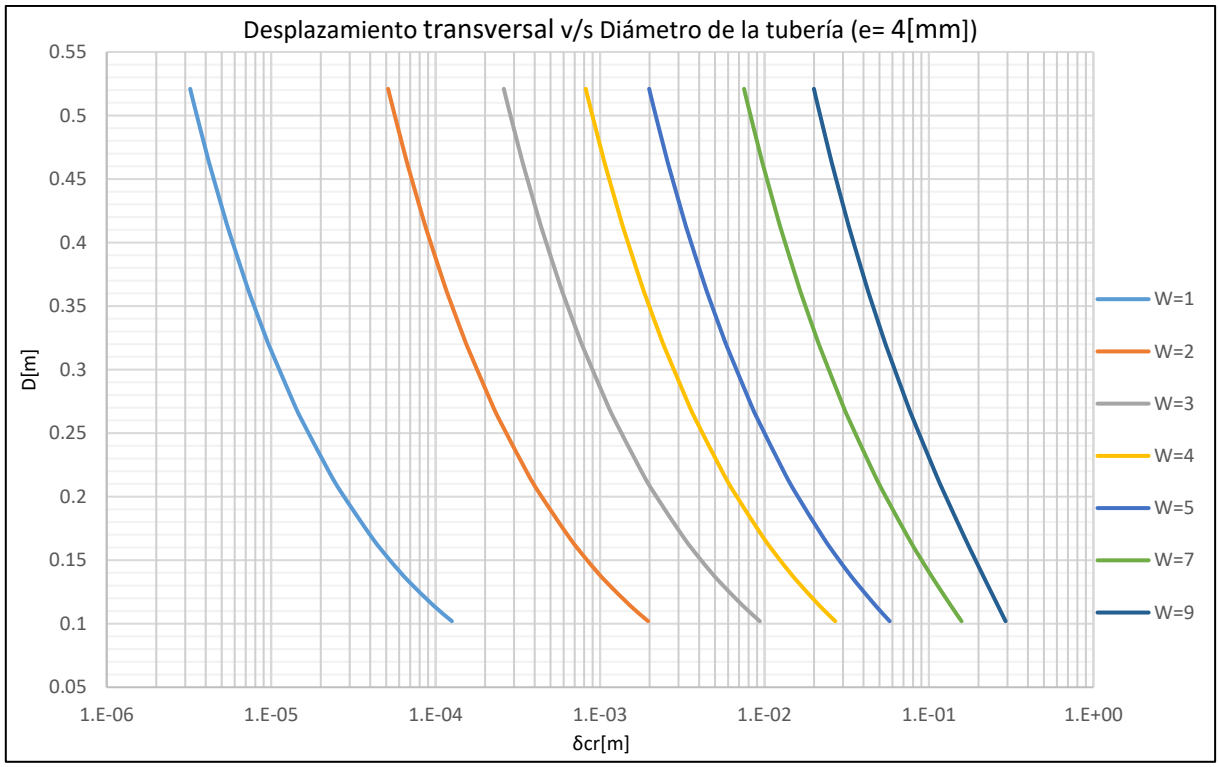


Gráfico 13-5: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], Suelo de Arena Fina.

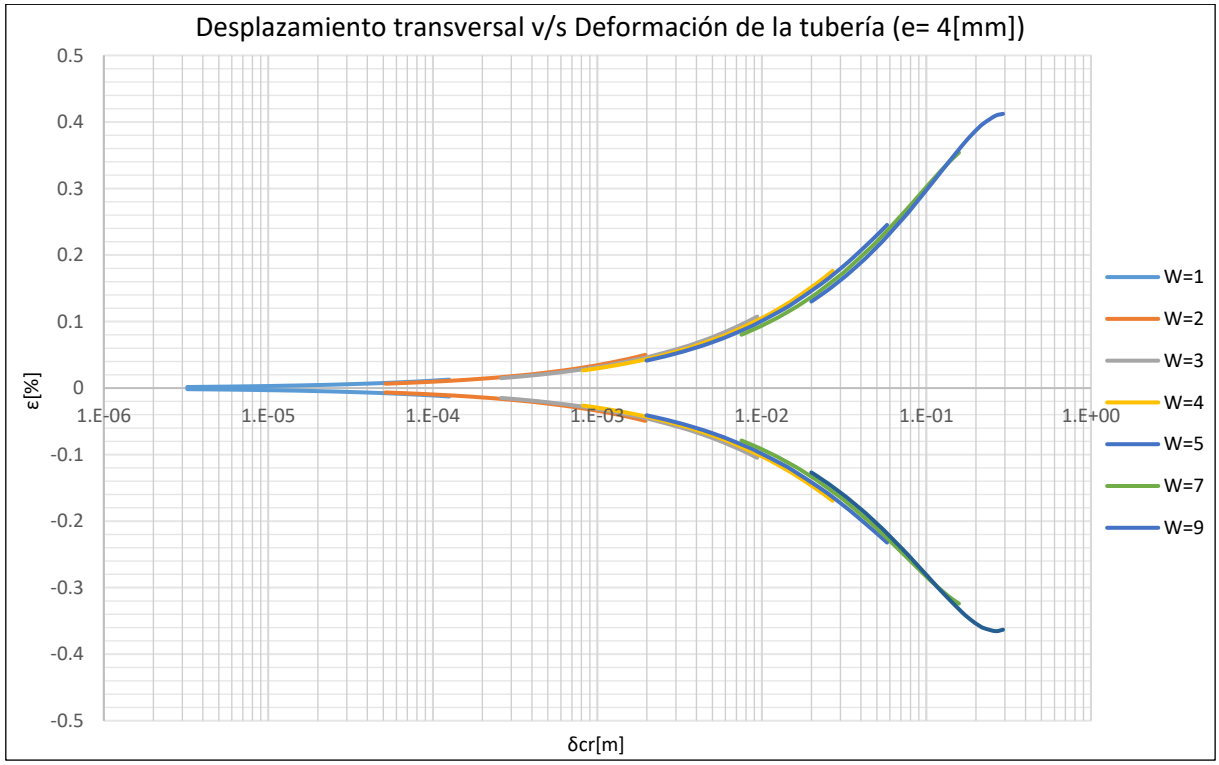


Gráfico 13-6: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], Suelo de Arena Fina.

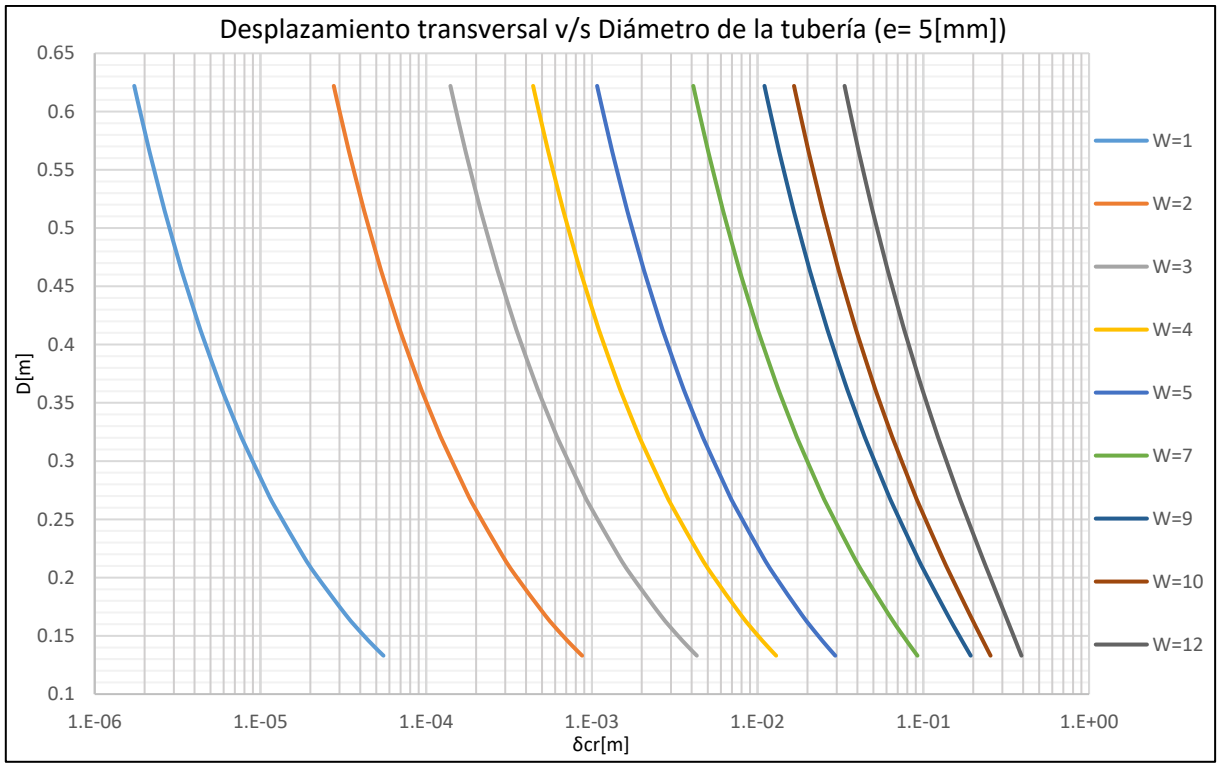


Gráfico 13-7: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], Suelo de Arena Fina.

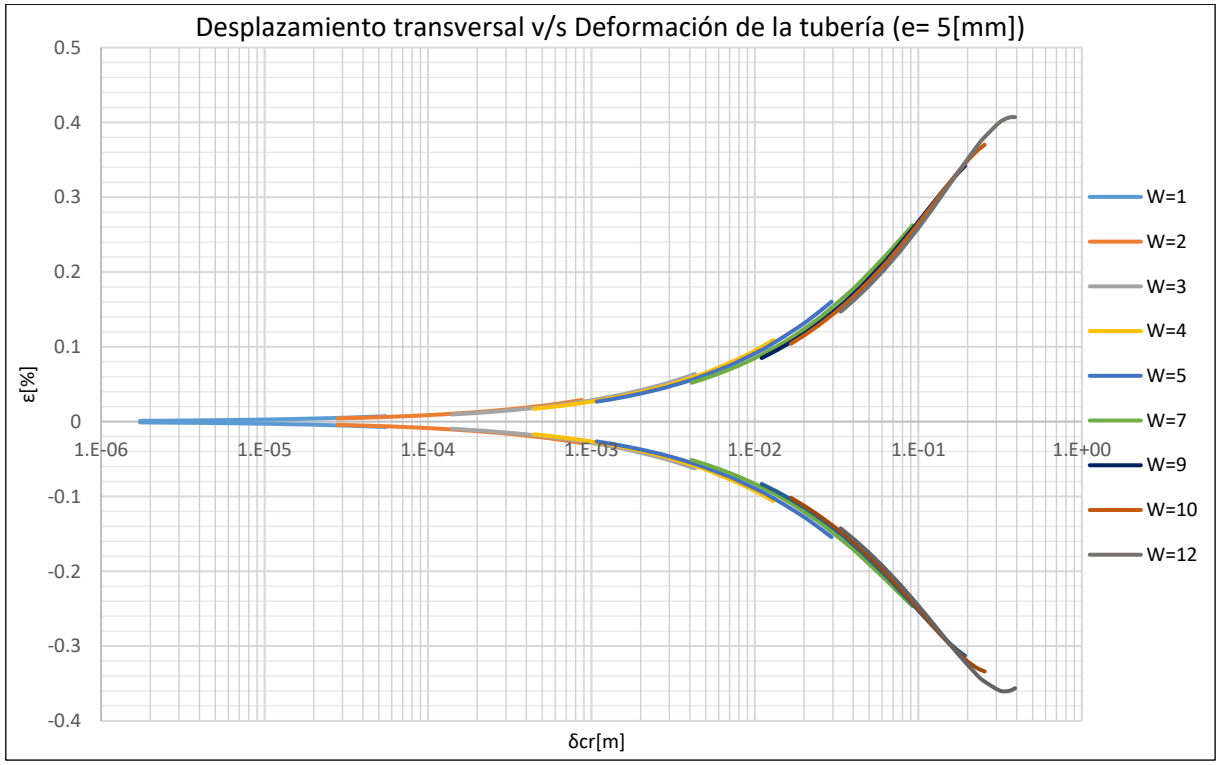


Gráfico 13-8: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], Suelo de Arena Fina.

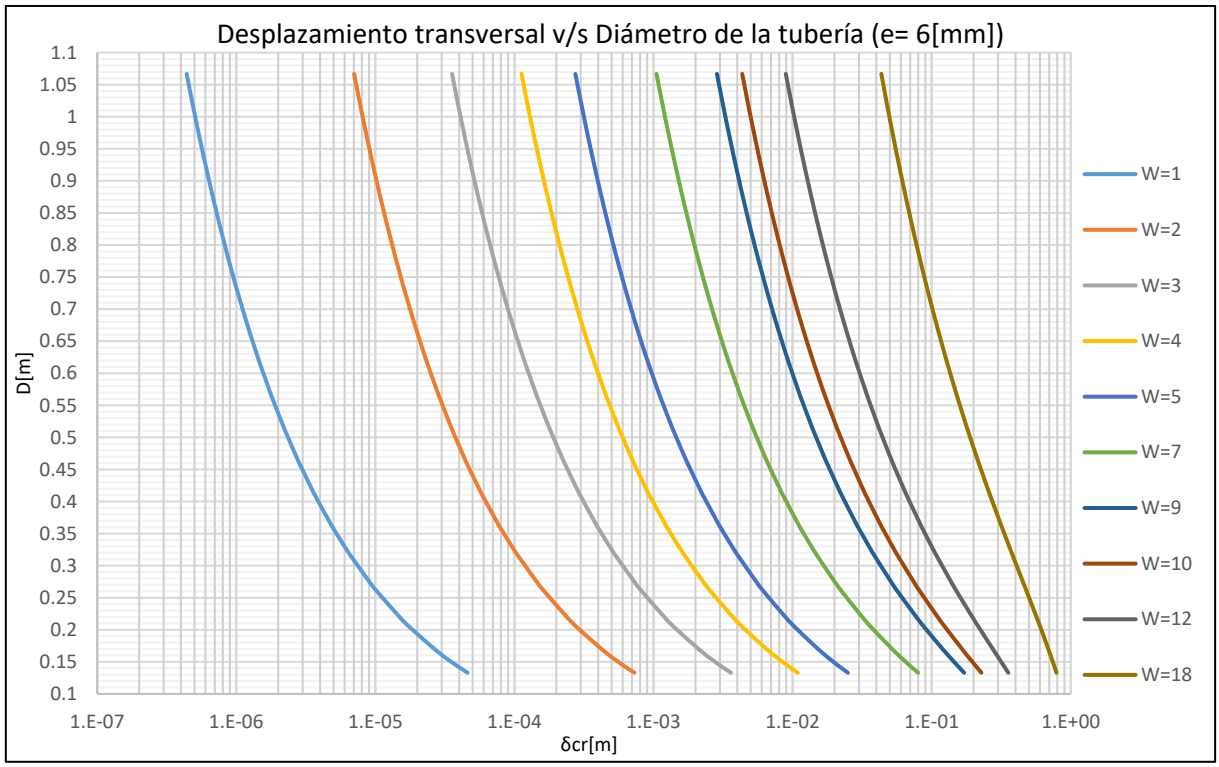


Gráfico 13-9: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], Suelo de Arena Fina.

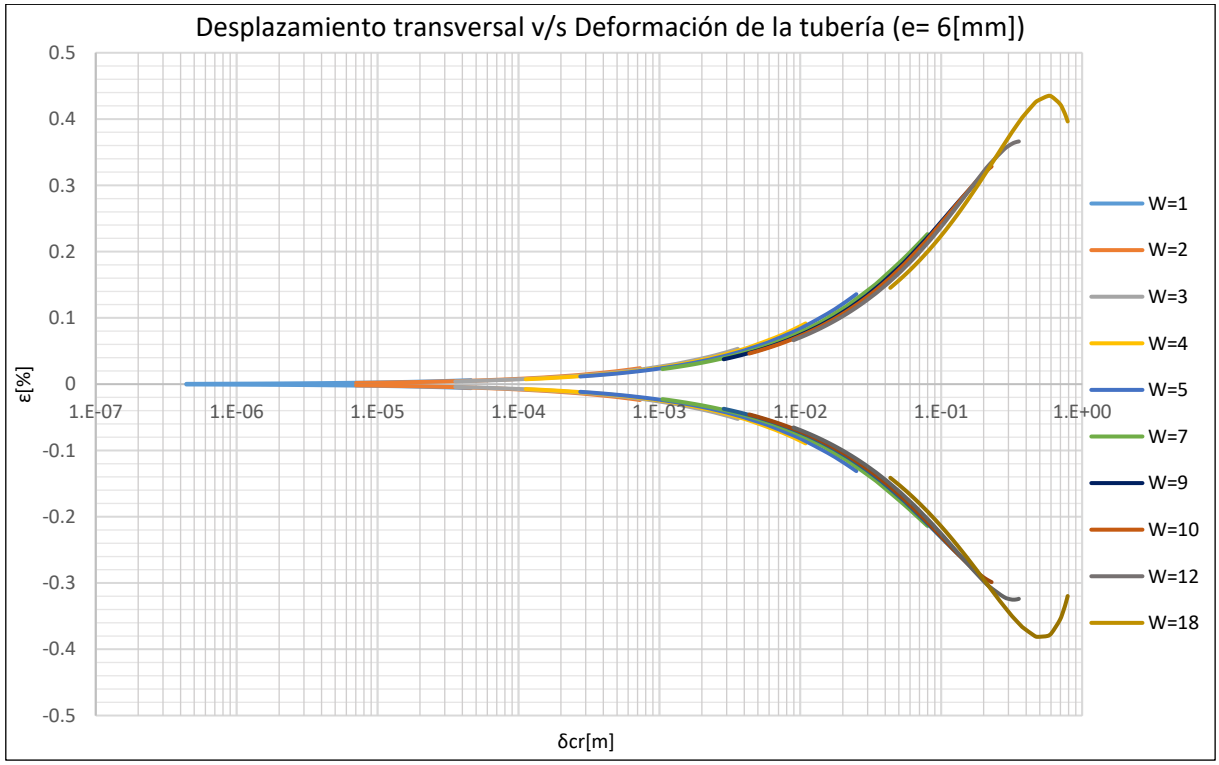


Gráfico 13-10: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], Suelo de Arena Fina.

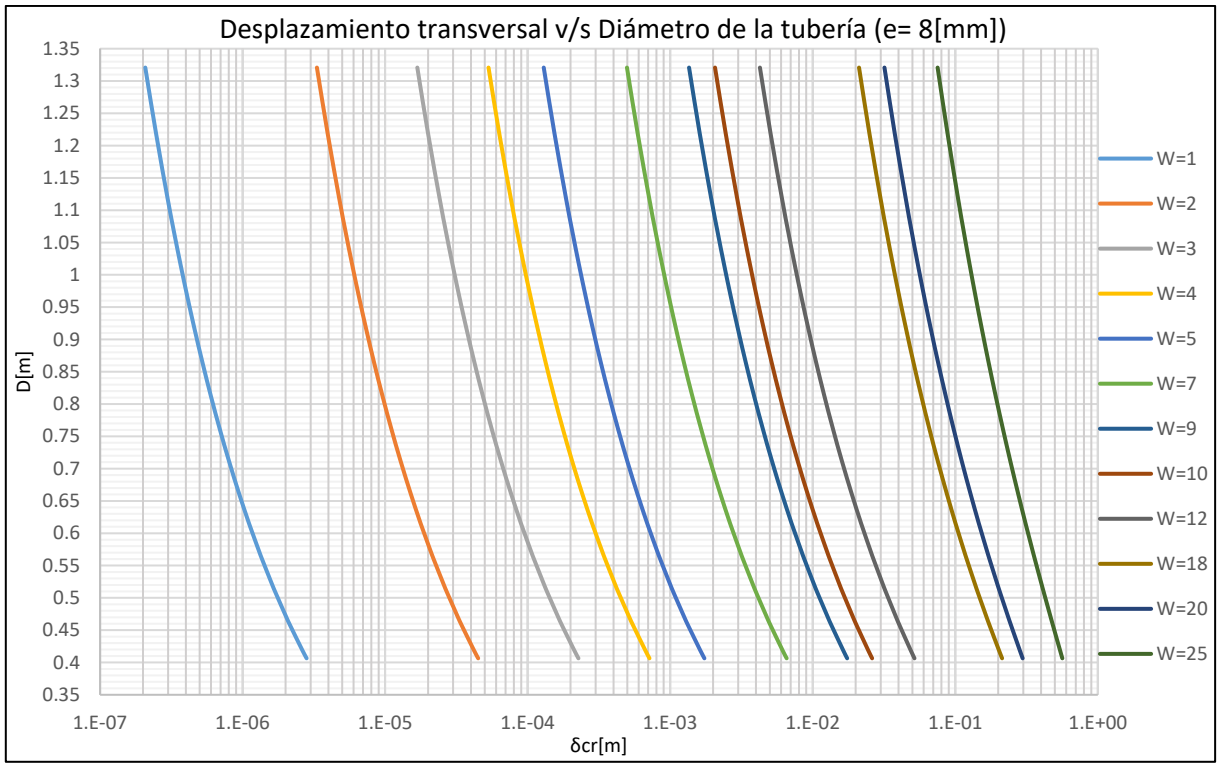


Gráfico 13-11: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], Suelo de Arena Fina.

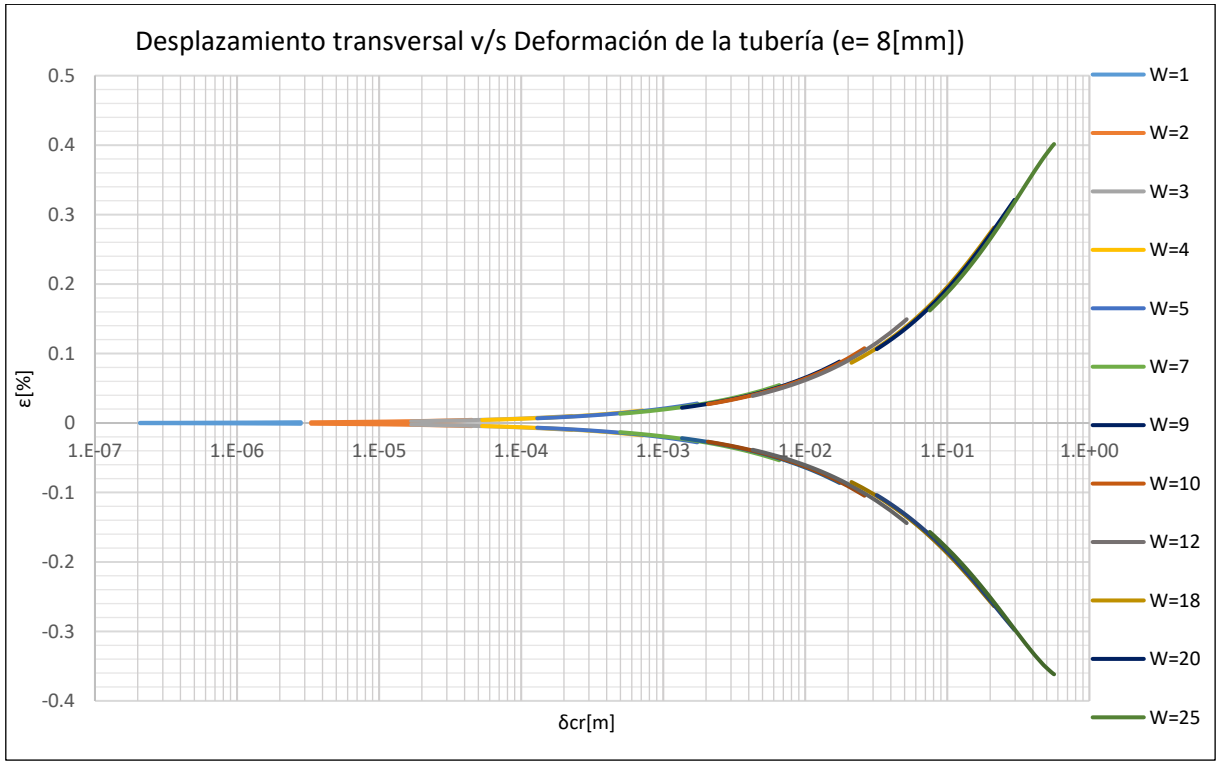


Gráfico 13-12: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], Suelo de Arena Fina.

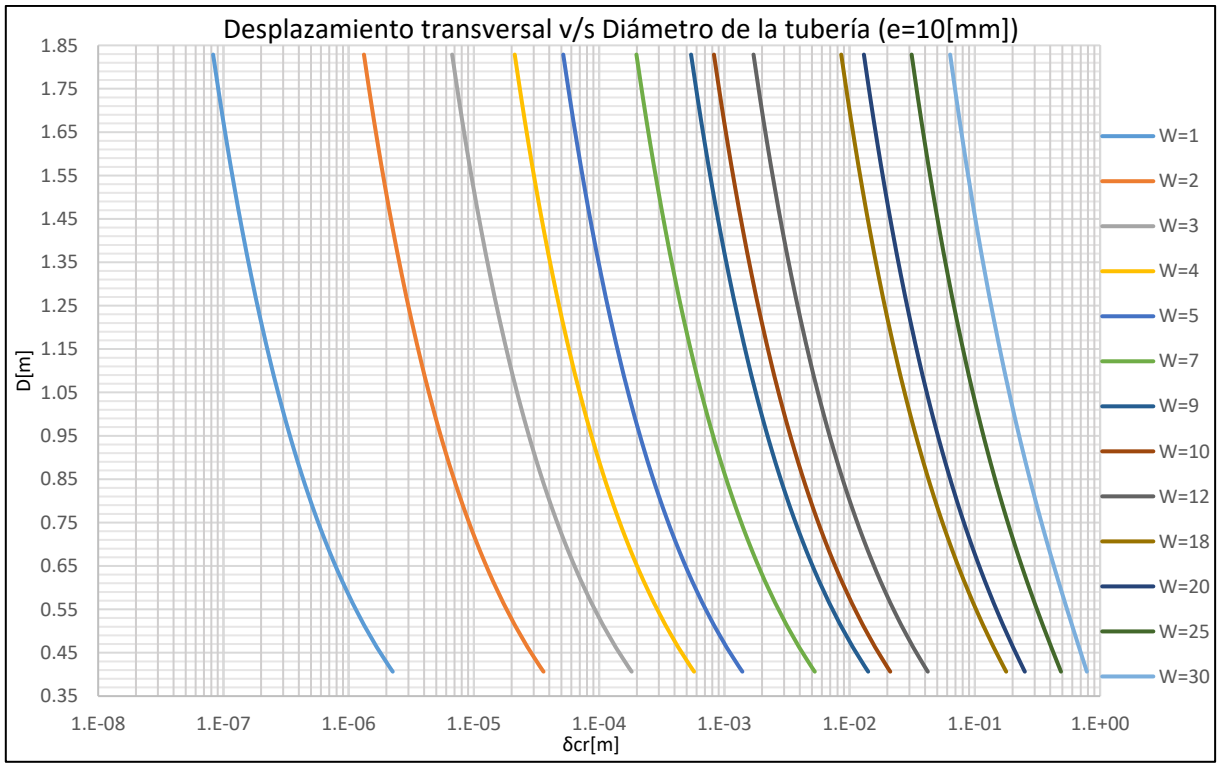


Gráfico 13-13: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], Suelo de Arena Fina.

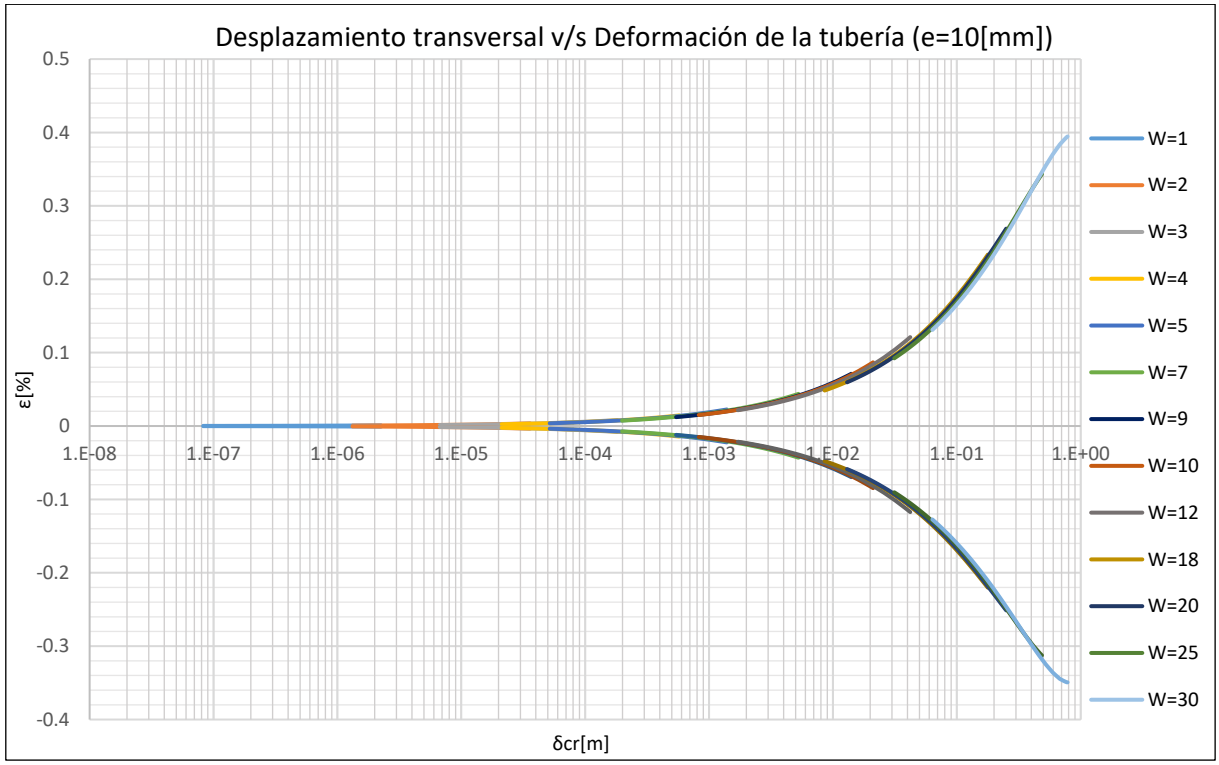


Gráfico 13-14: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], Suelo de Arena Fina.

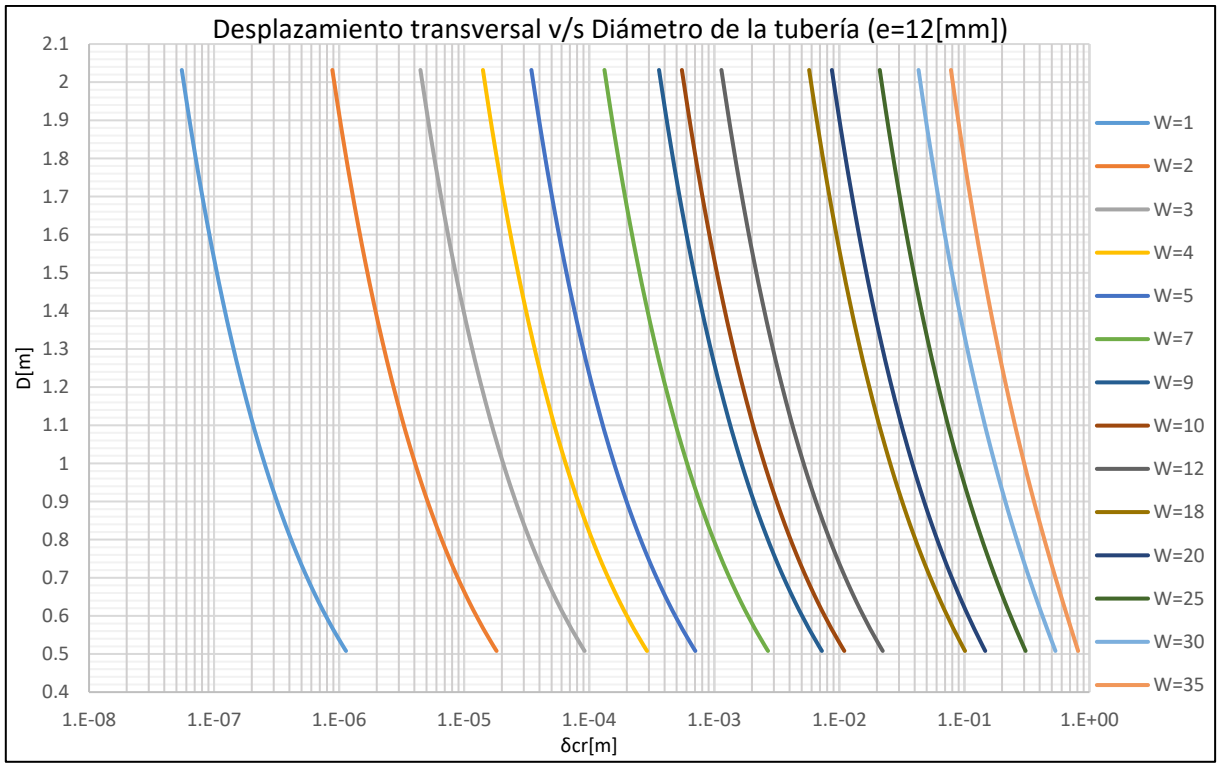


Gráfico 13-15: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], Suelo de Arena Fina.

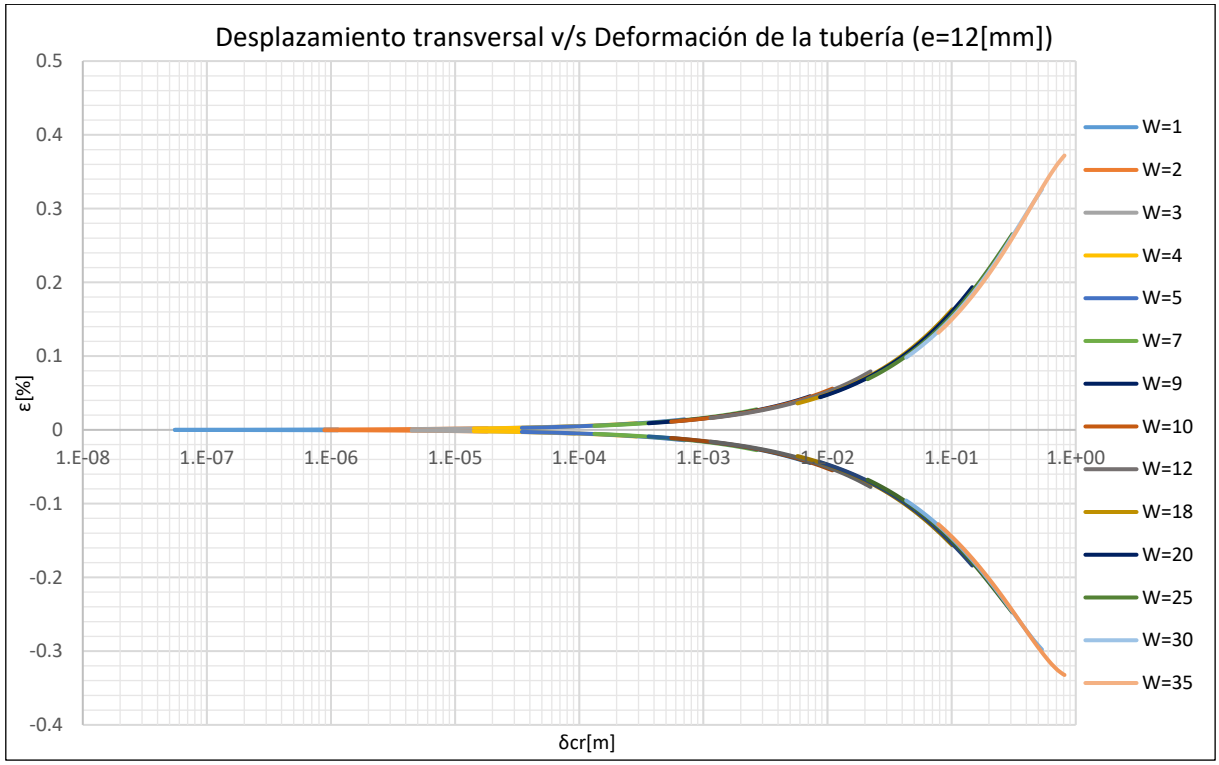


Gráfico 13-16: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], Suelo de Arena Fina.

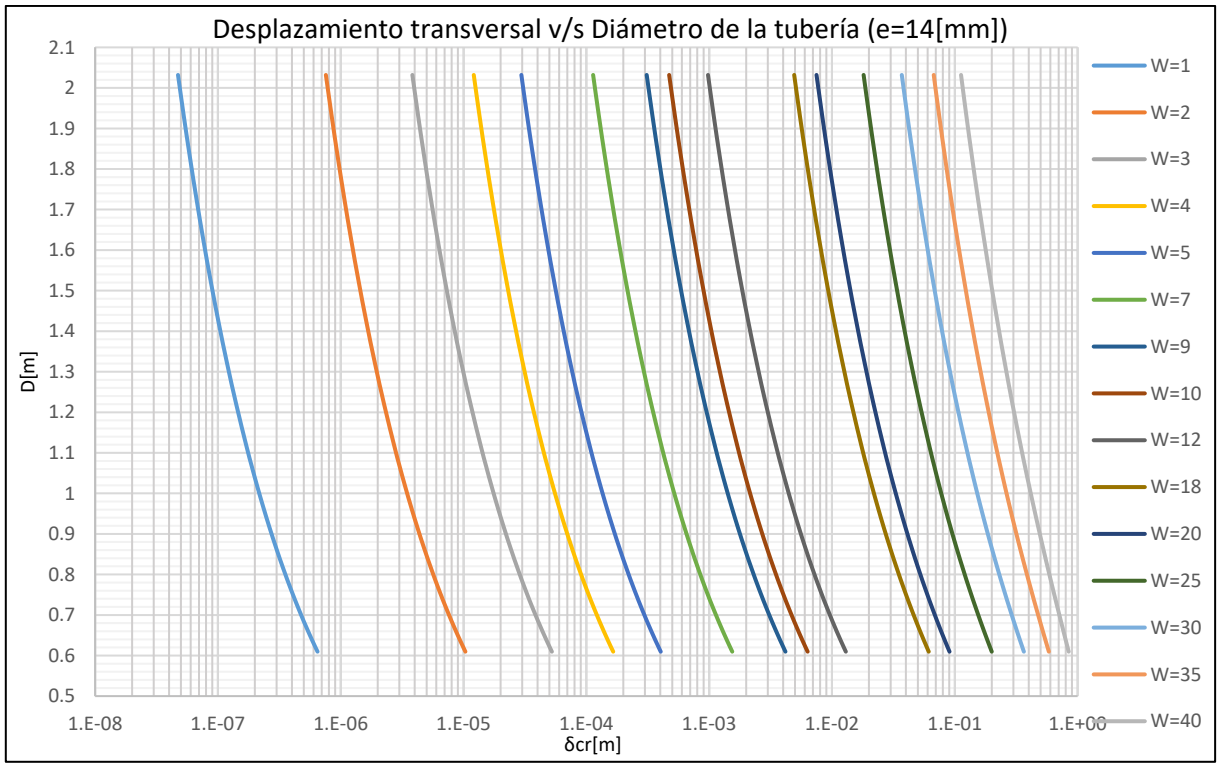


Gráfico 13-17: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], Suelo de Arena Fina.

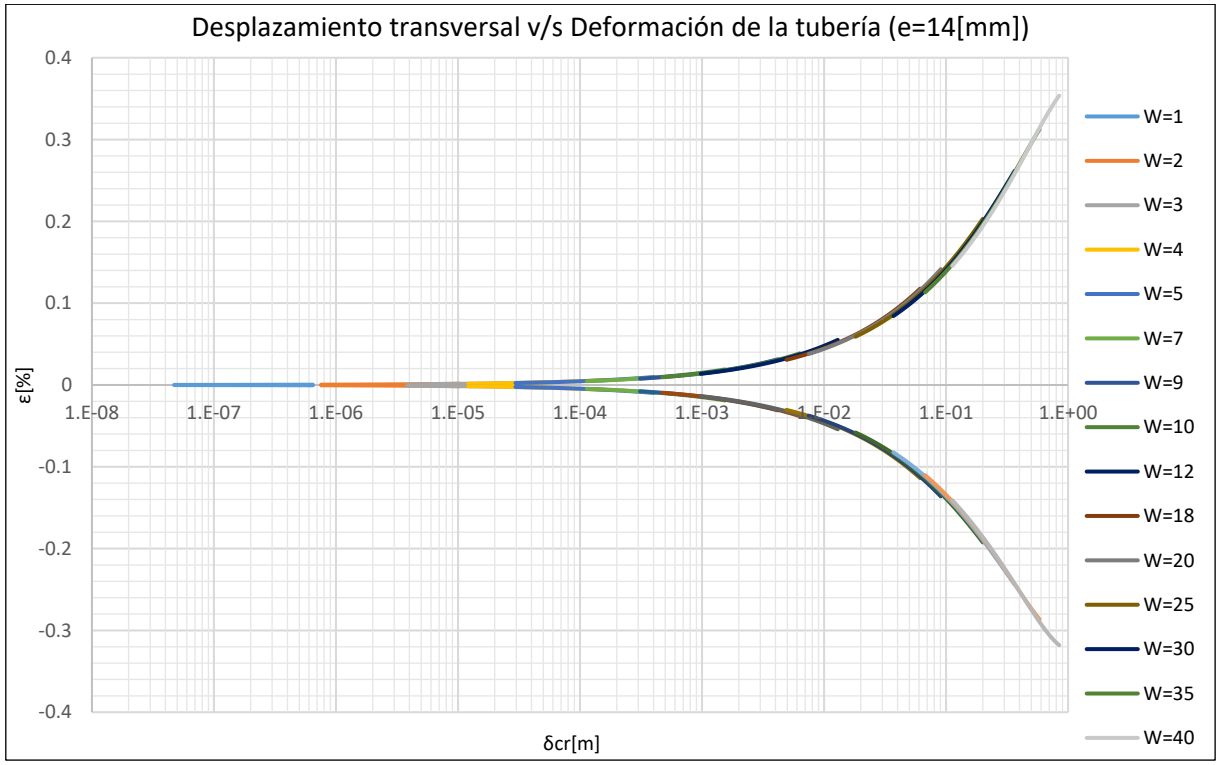


Gráfico 13-18: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], Suelo de Arena Fina.

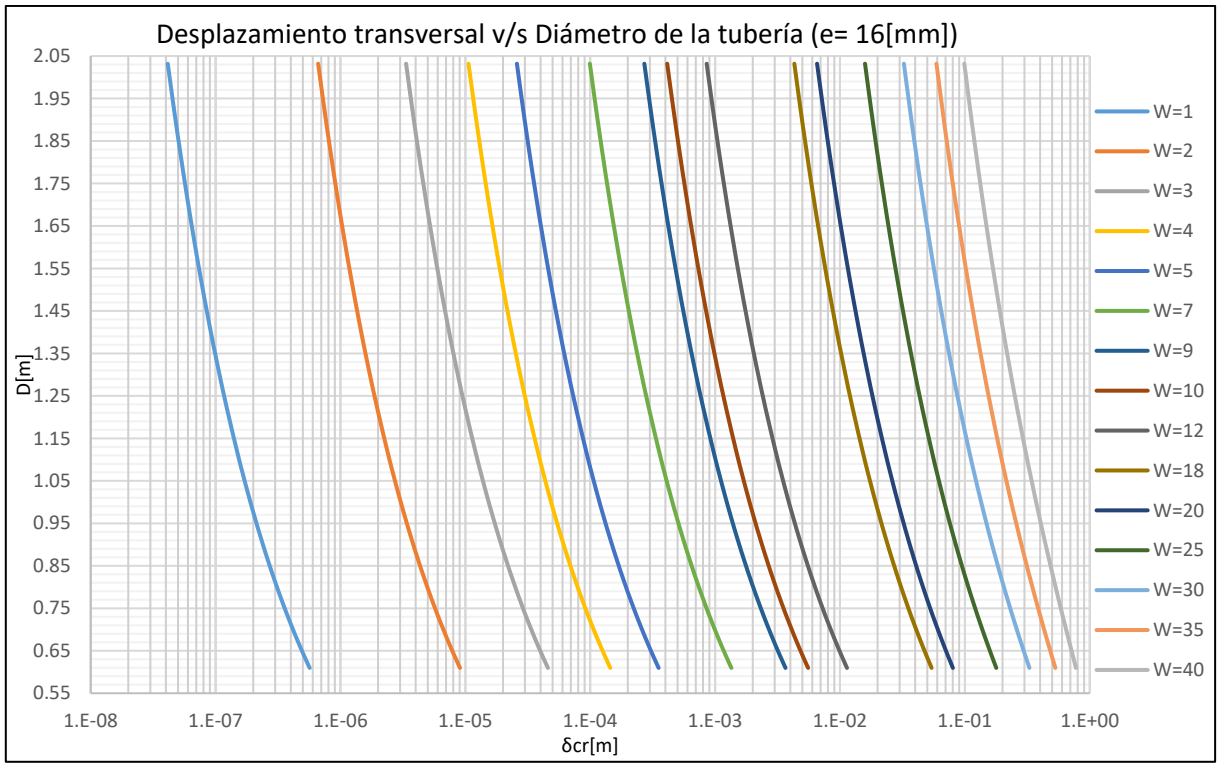


Gráfico 13-19: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], Suelo de Arena Fina.

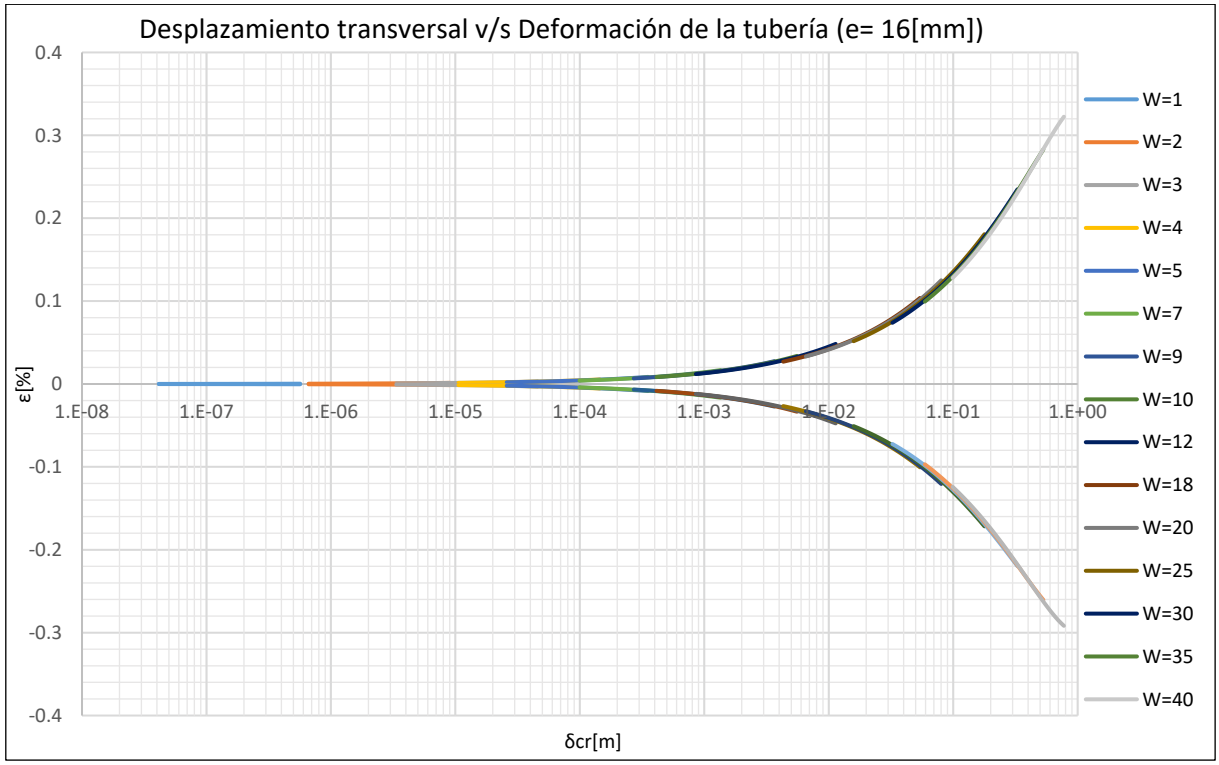


Gráfico 13-20: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], Suelo de Arena Fina.

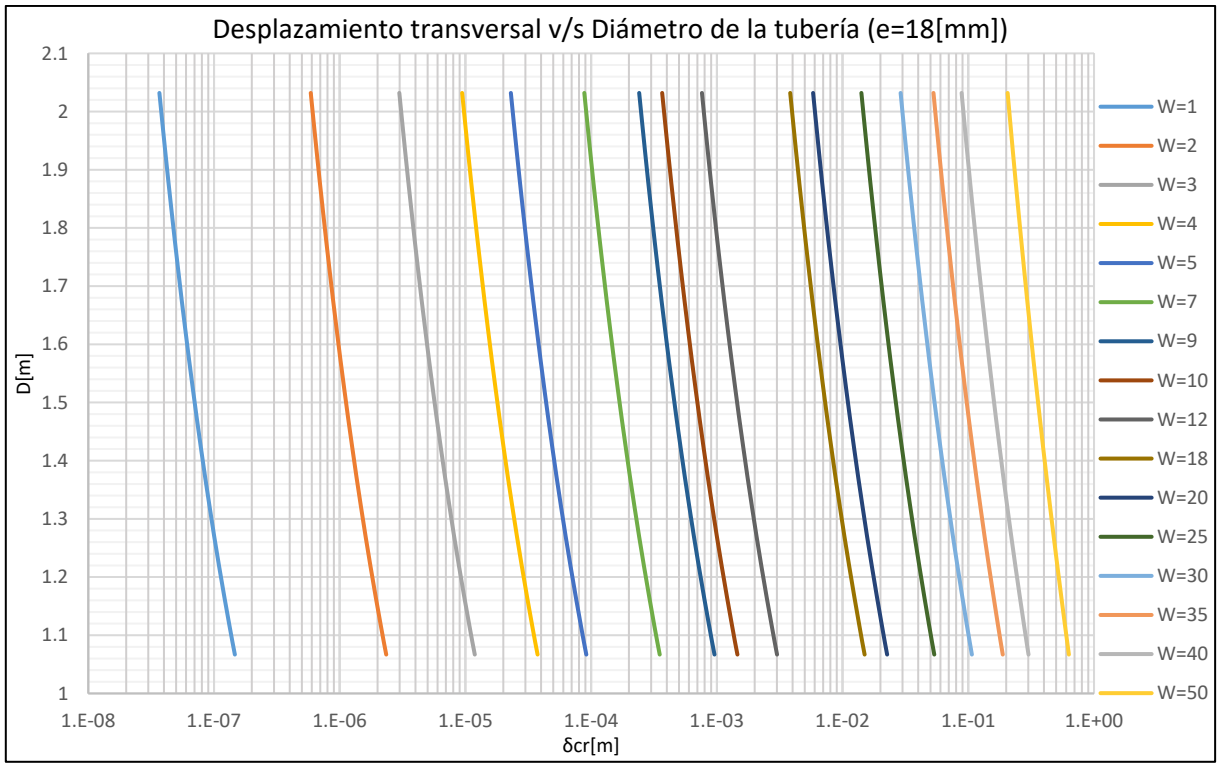


Gráfico 13-21: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], Suelo de Arena Fina.

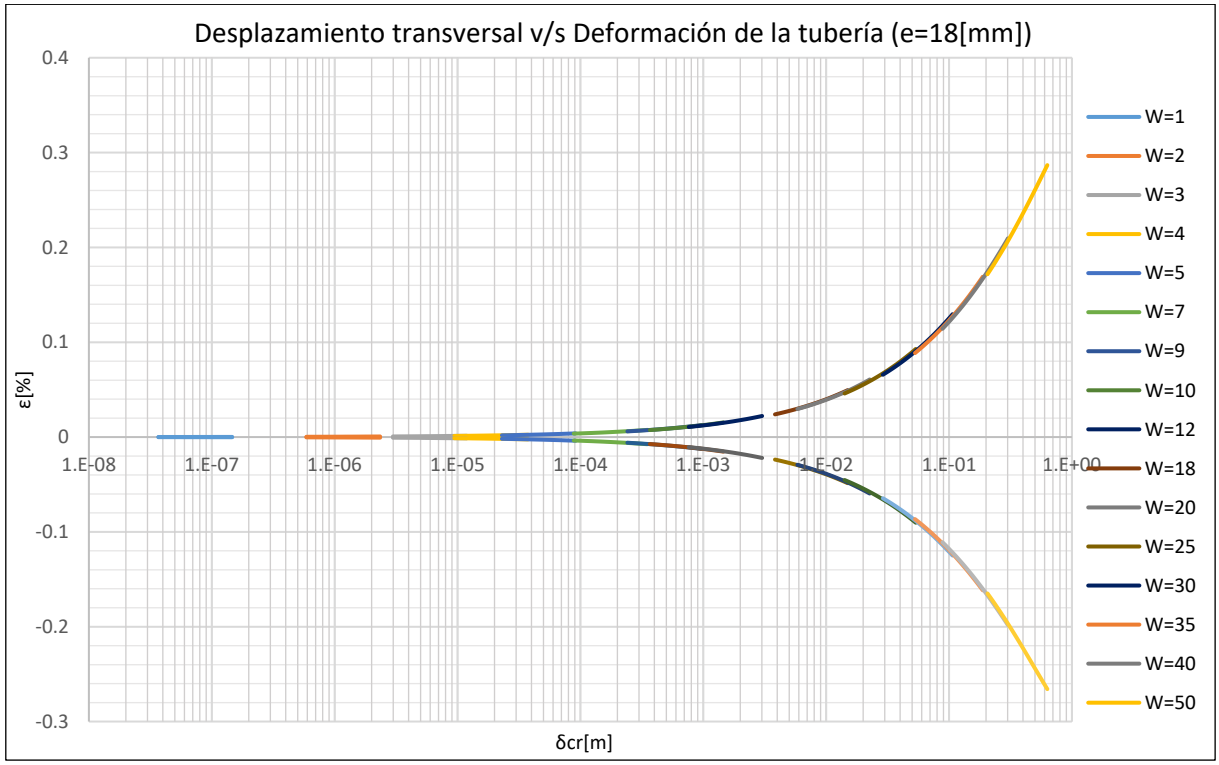


Gráfico 13-22: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], Suelo de Arena Fina.

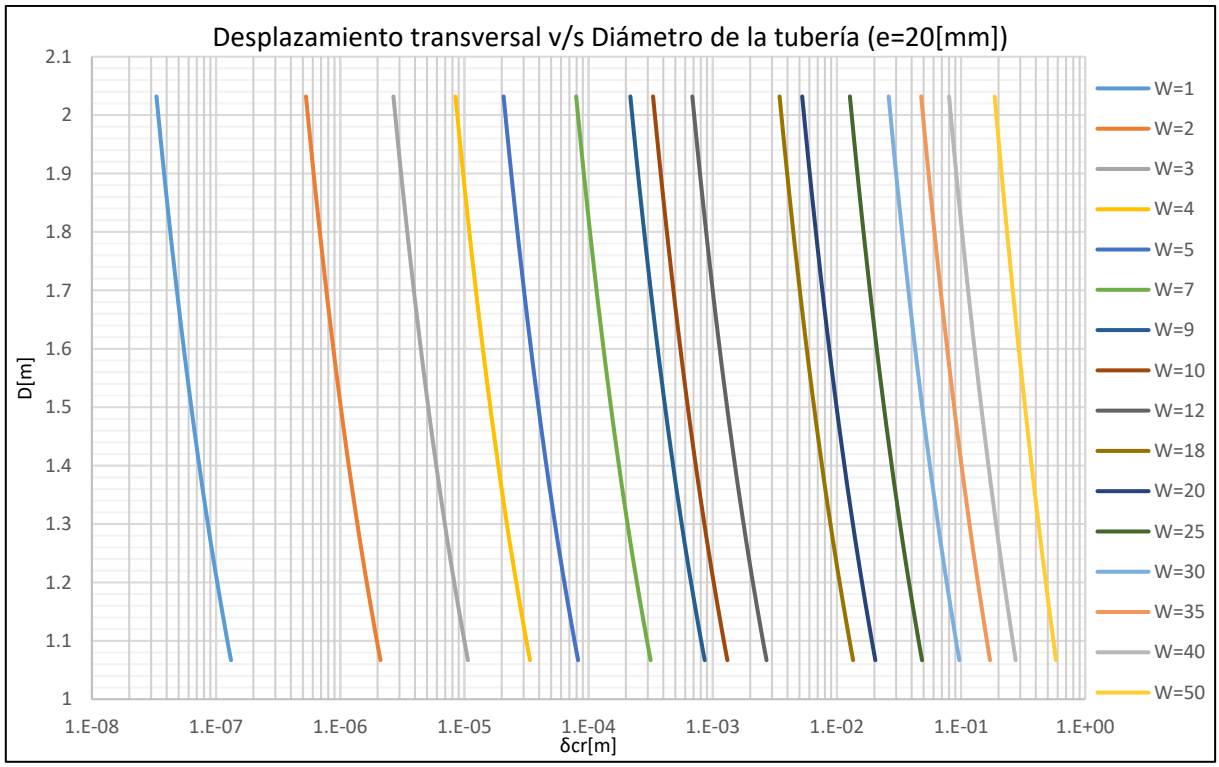


Gráfico 13-23: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], Suelo de Arena Fina.

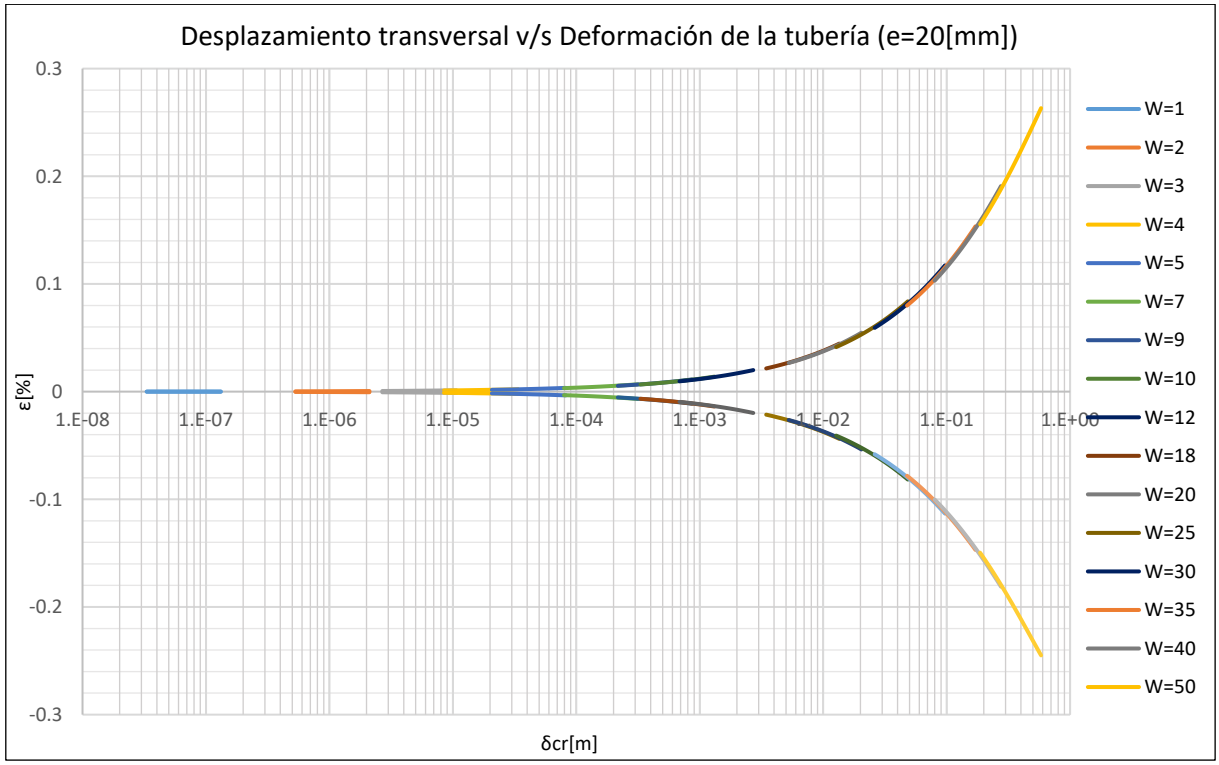


Gráfico 13-24: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

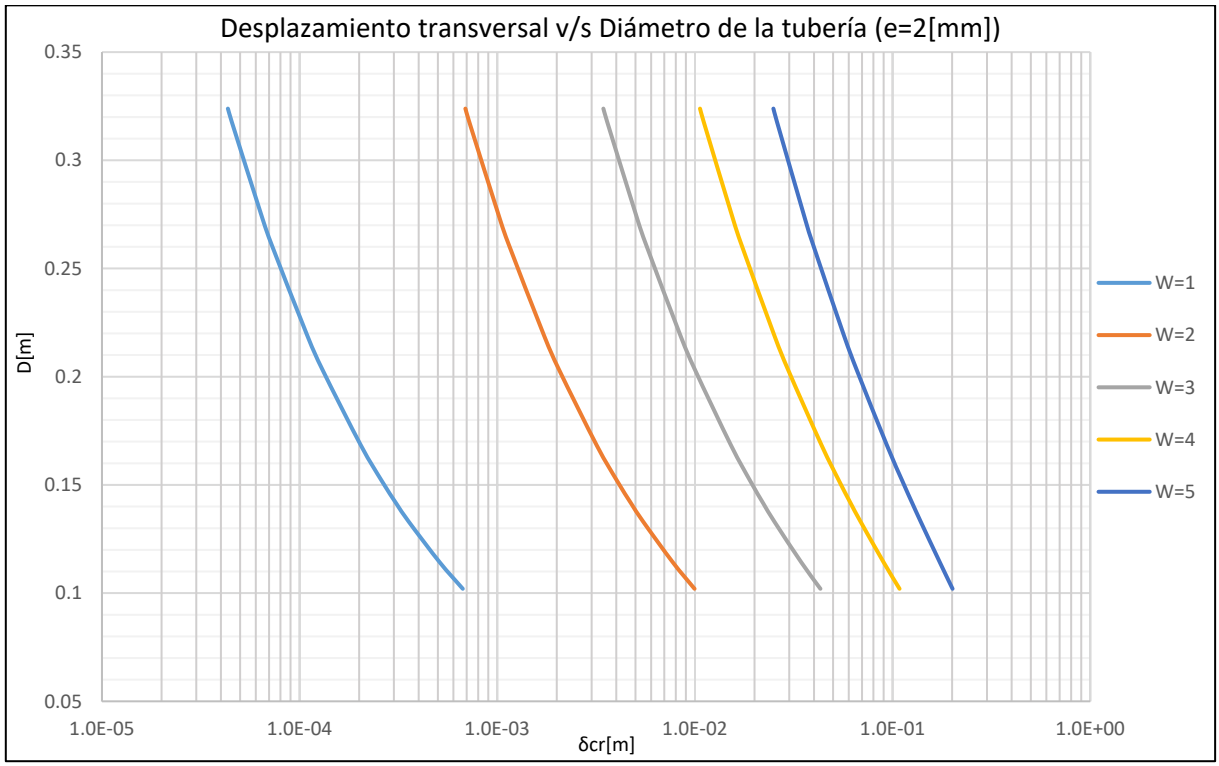


Gráfico 13-25: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], Suelo de Arena gruesa.

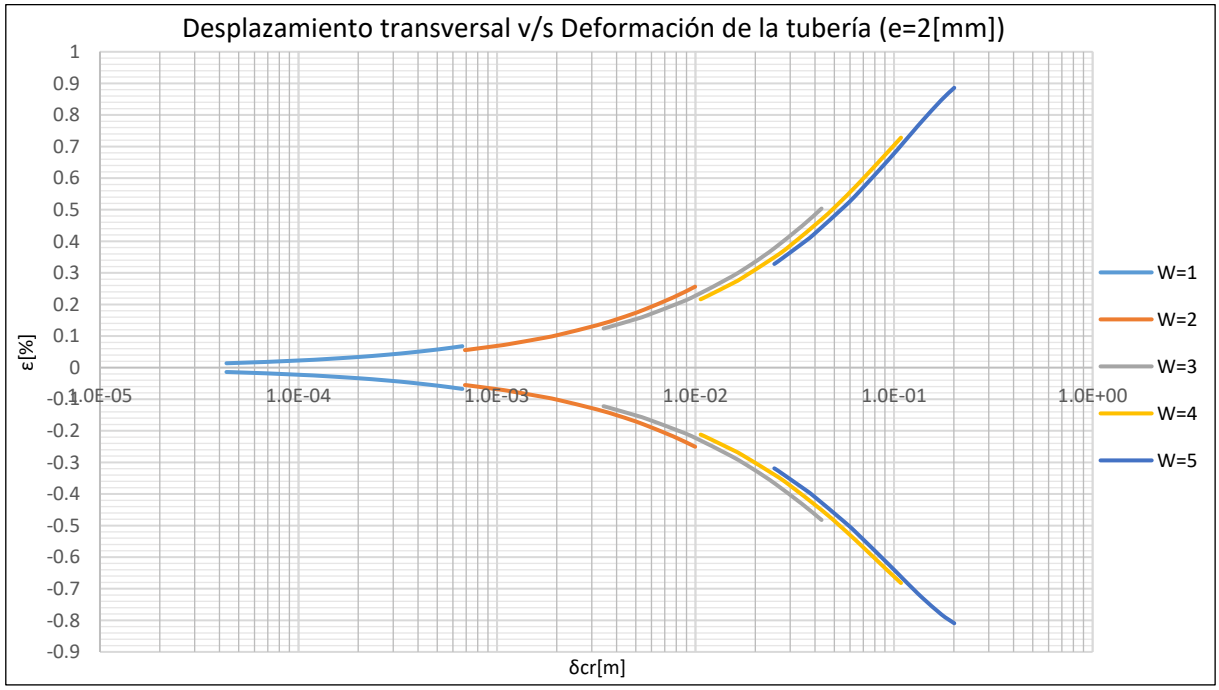


Gráfico 13-26: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], Suelo de Arena gruesa.

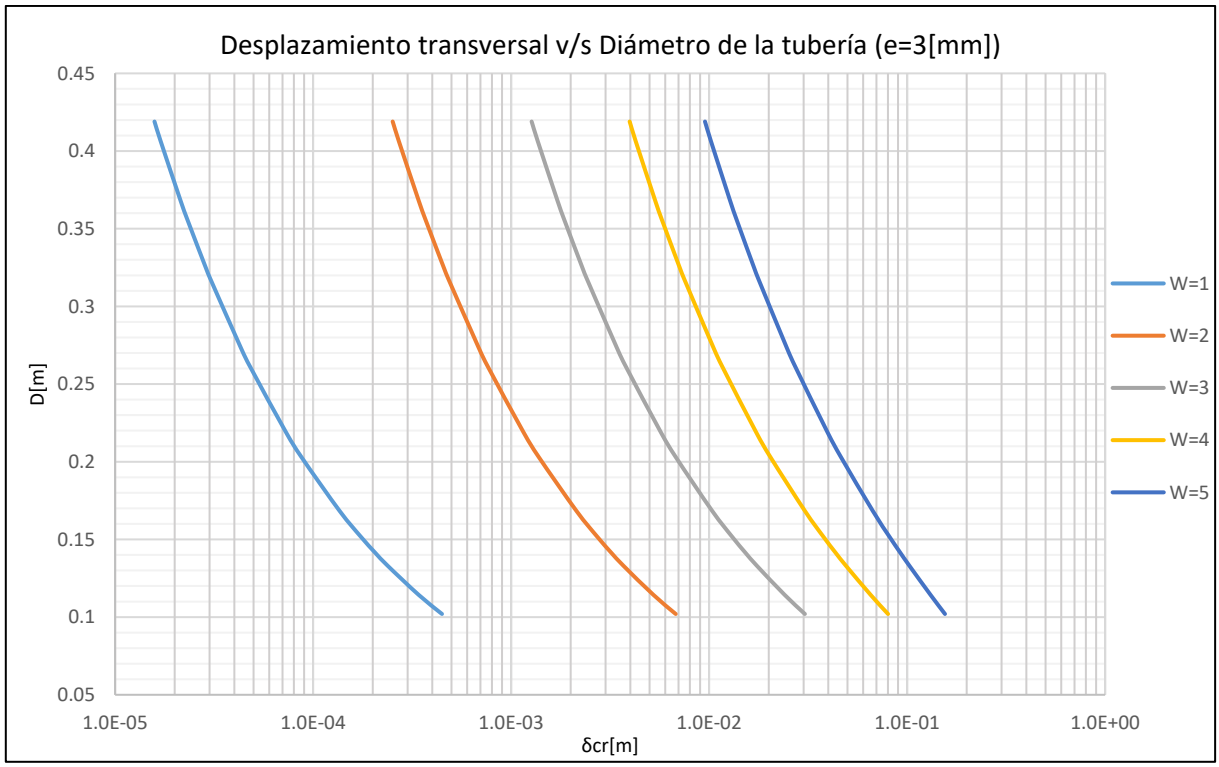


Gráfico 13-27: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], Suelo de Arena gruesa.

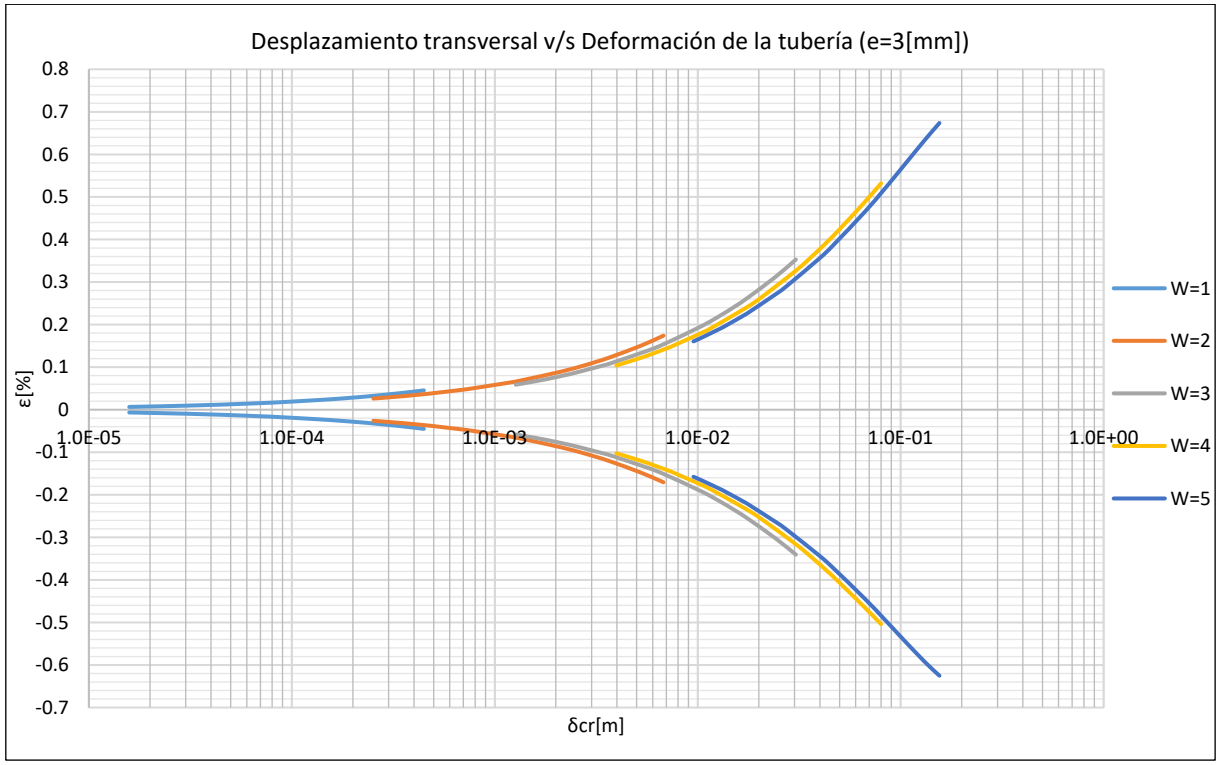


Gráfico 13-28: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], Suelo de Arena gruesa.

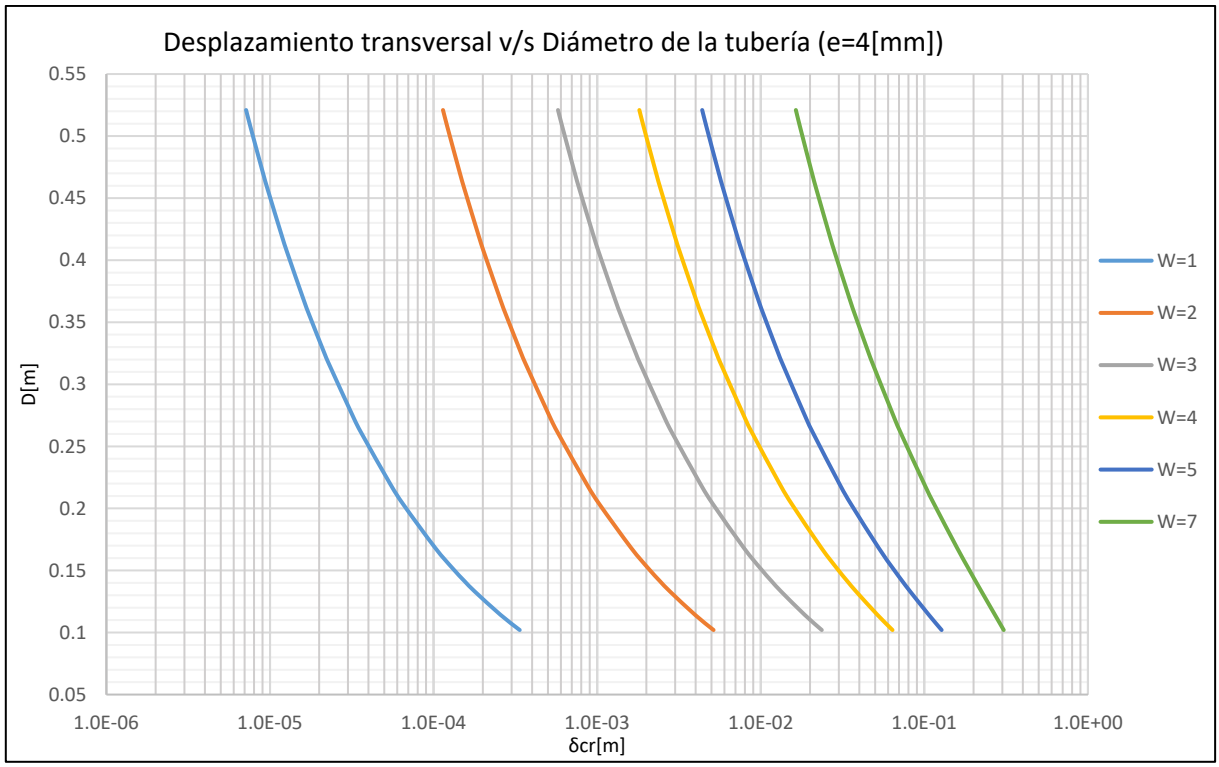


Gráfico 13-29: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], Suelo de Arena gruesa.

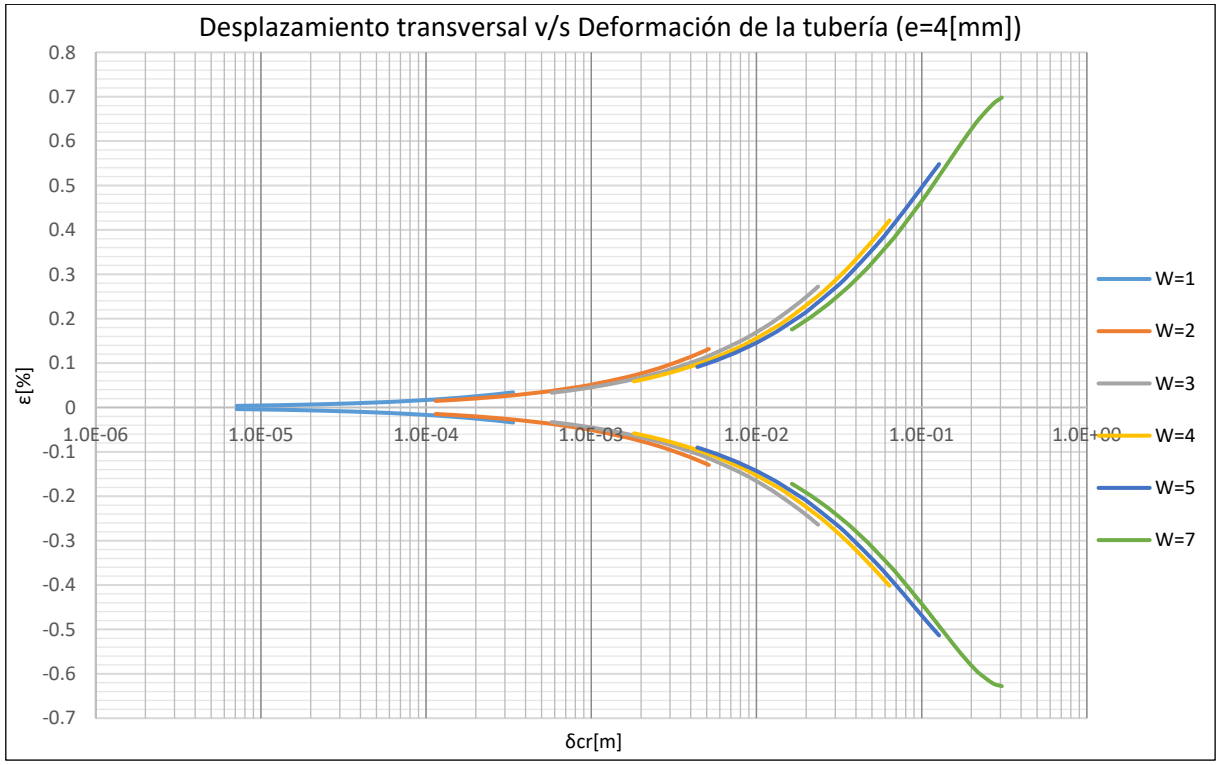


Gráfico 13-30: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], Suelo de Arena gruesa.

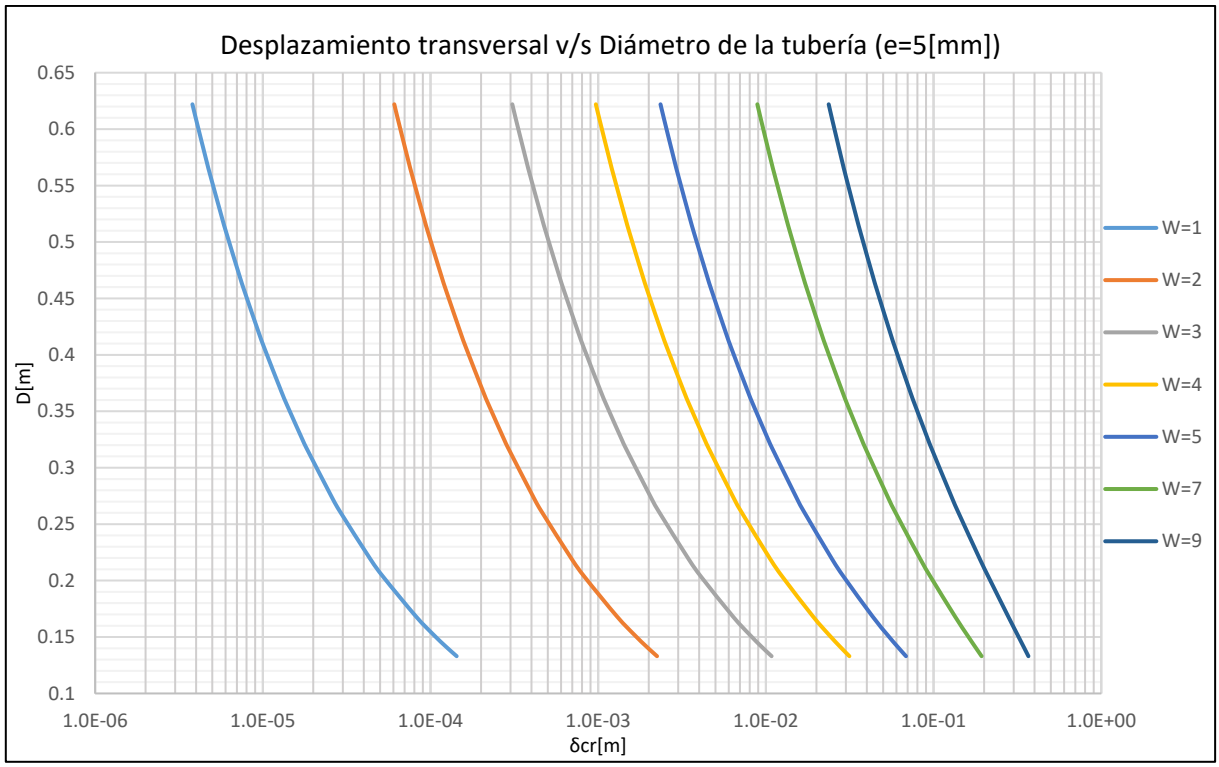


Gráfico 13-31: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], Suelo de Arena gruesa.

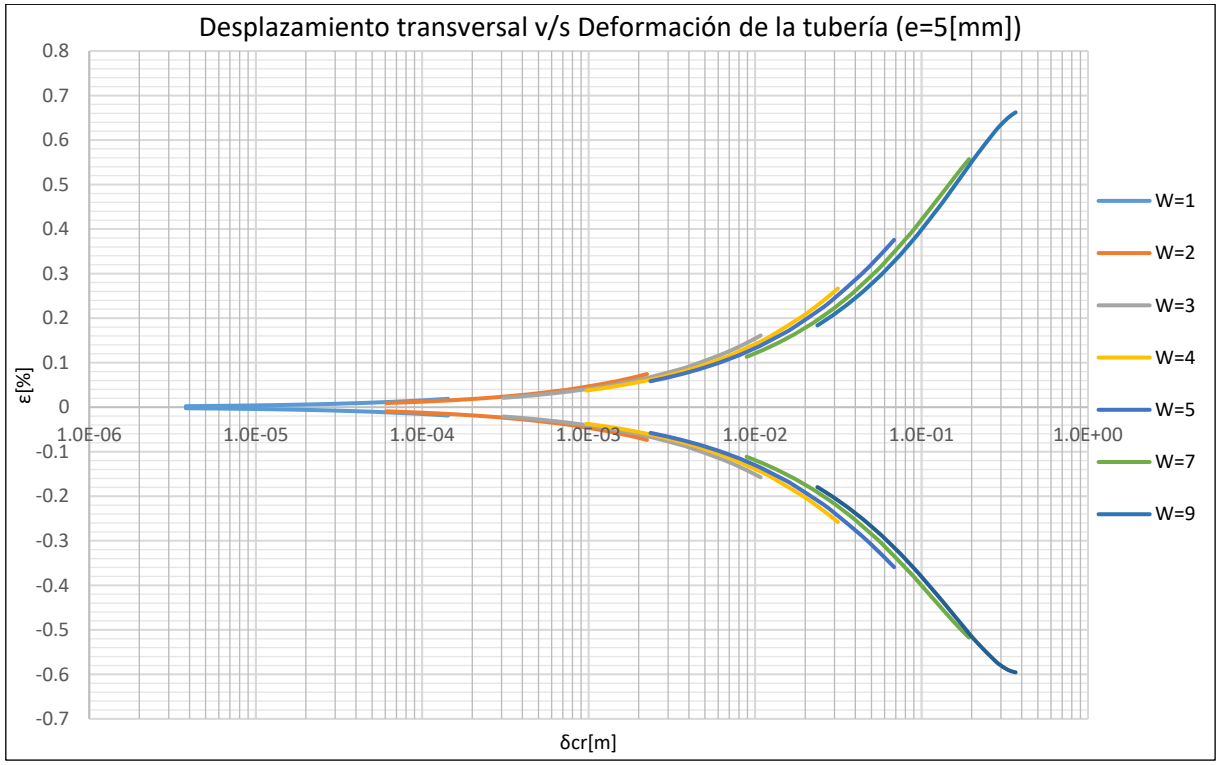


Gráfico 13-32: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], Suelo de Arena gruesa.

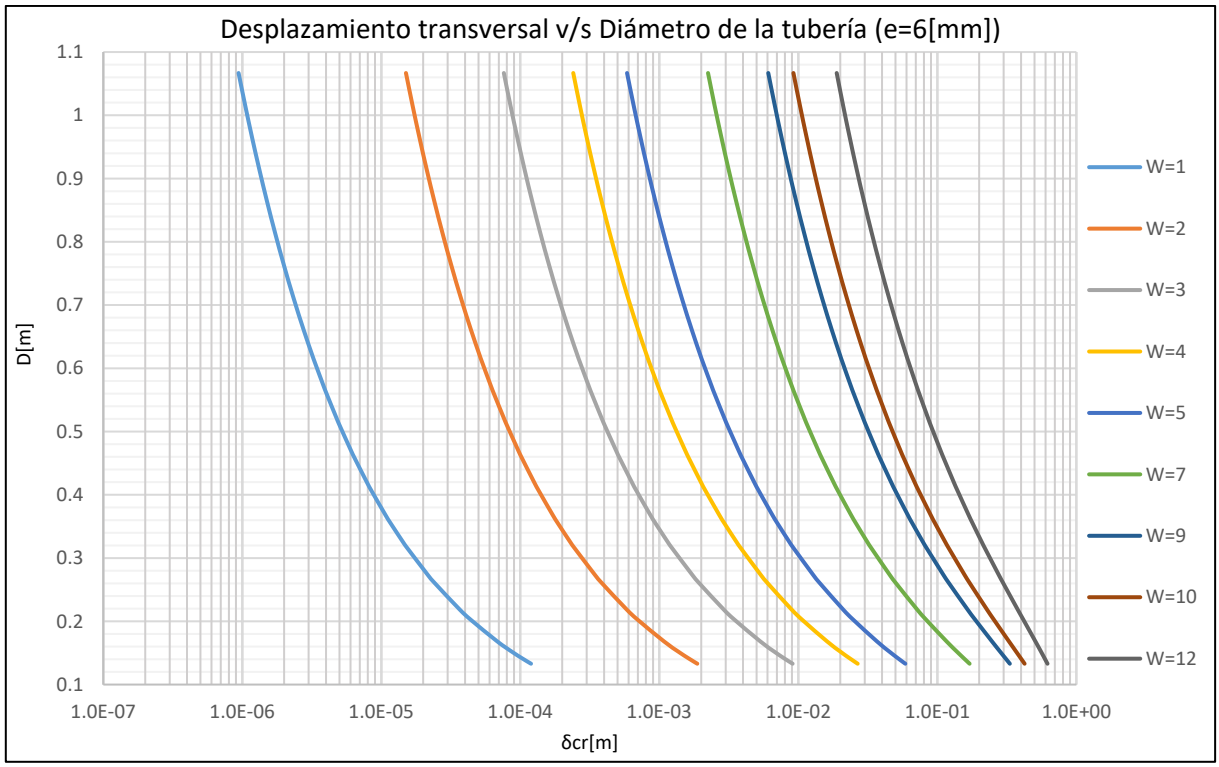


Gráfico 13-33: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], Suelo de Arena gruesa.

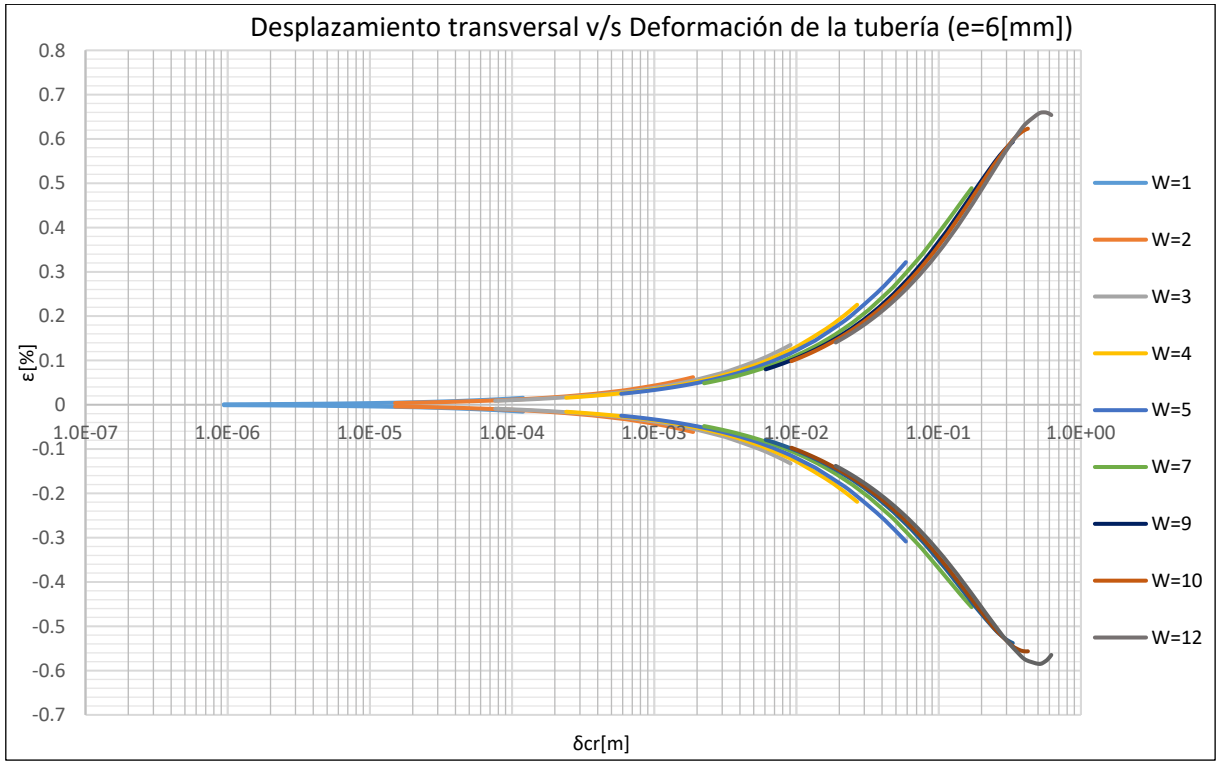


Gráfico 13-34: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], Suelo de Arena gruesa.

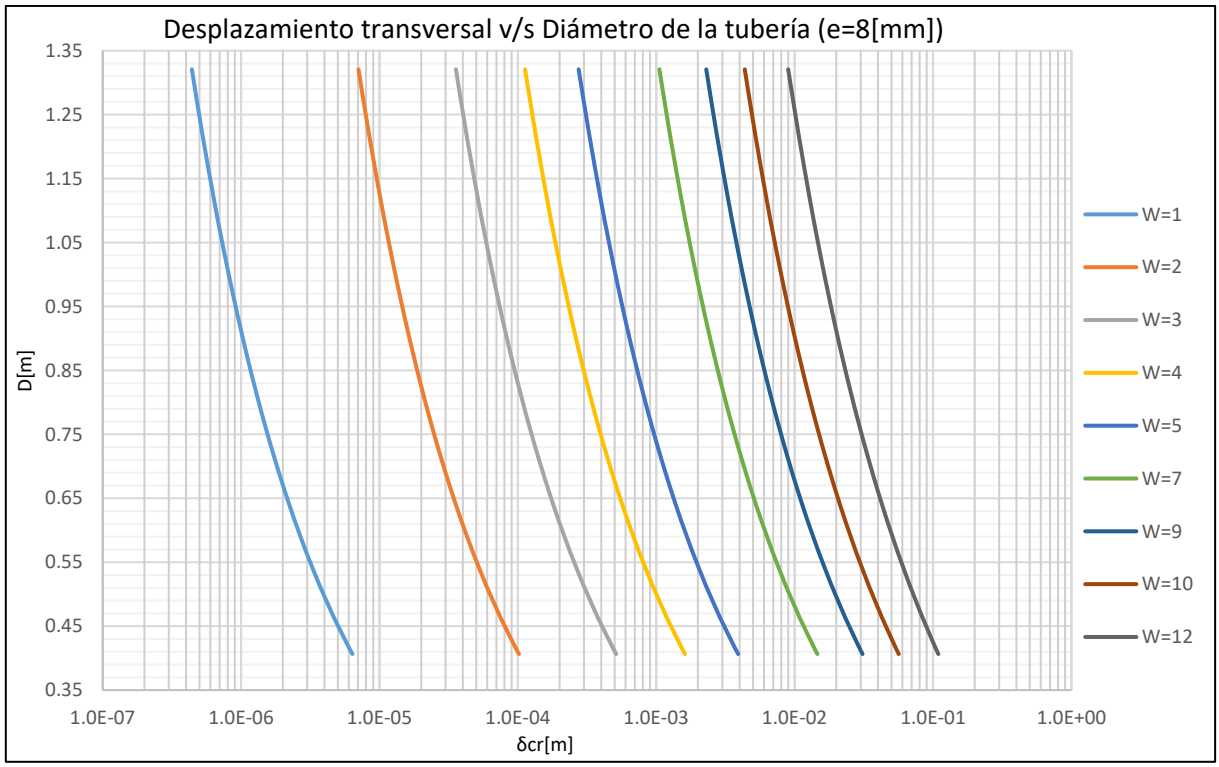


Gráfico 13-35: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], Suelo de Arena gruesa.

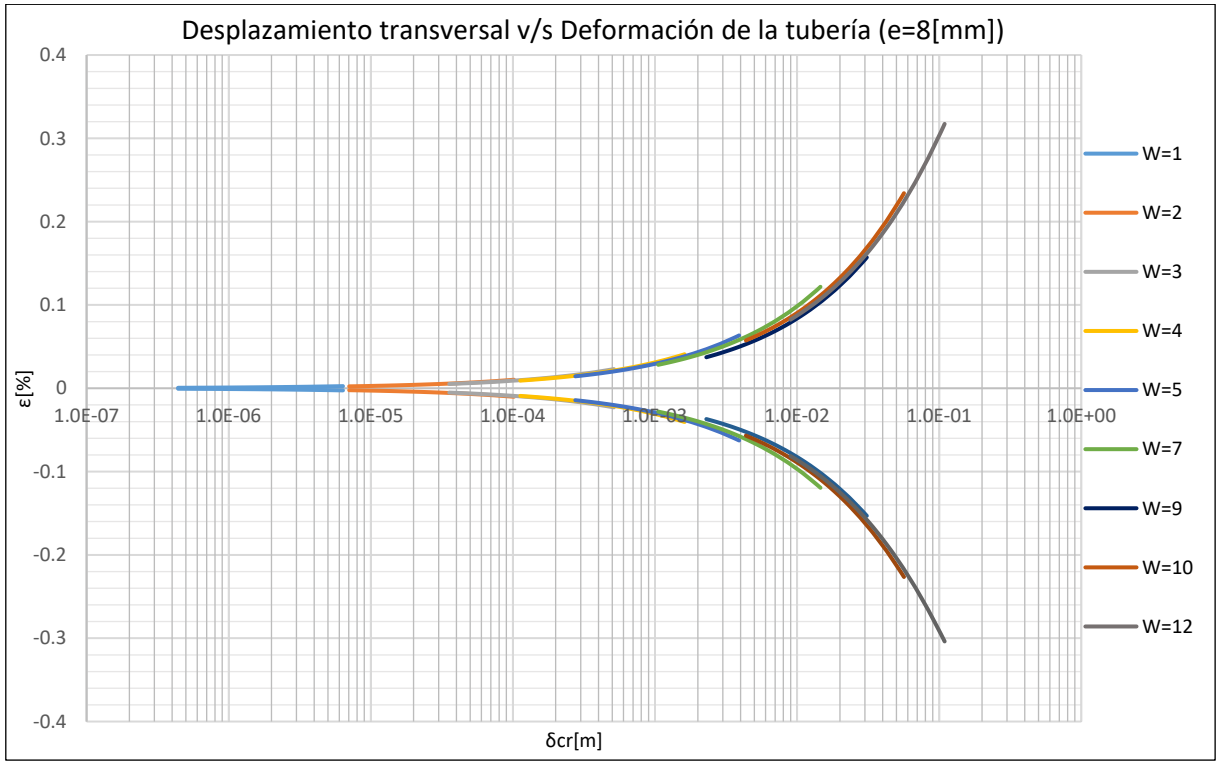


Gráfico 13-36: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], Suelo de Arena gruesa.

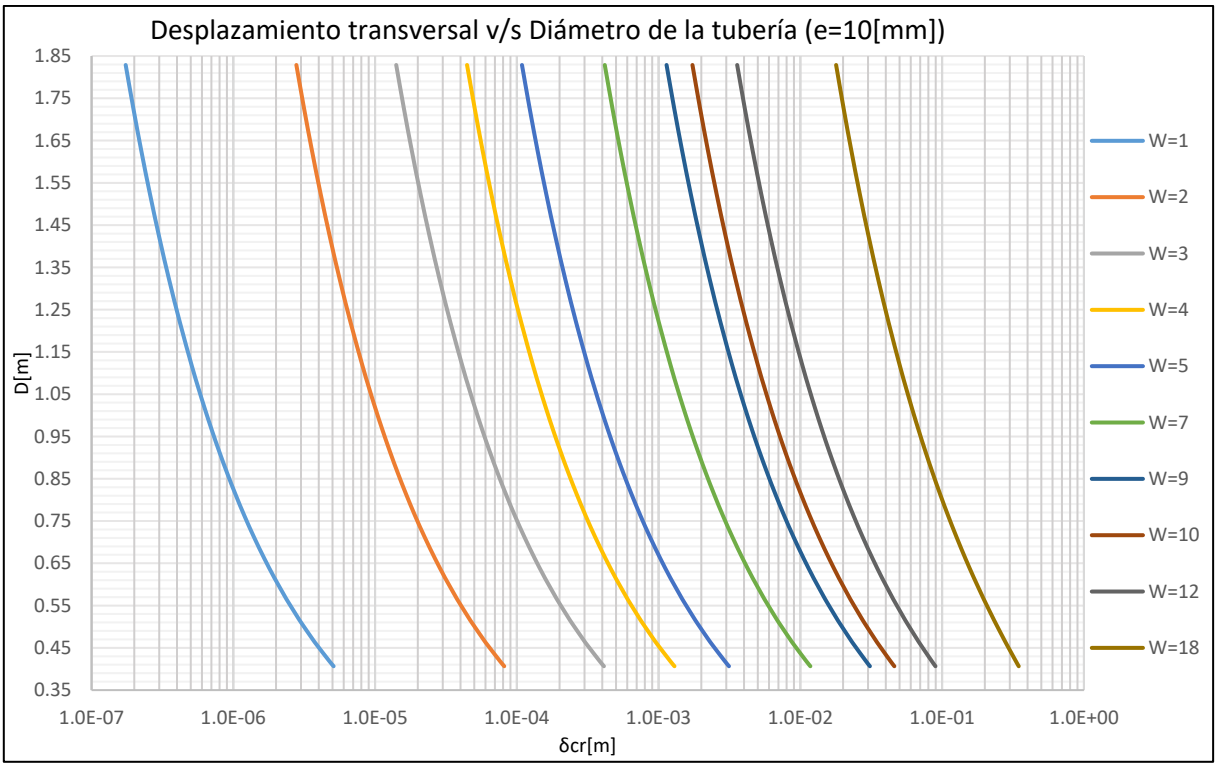


Gráfico 13-37: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], Suelo de Arena gruesa.

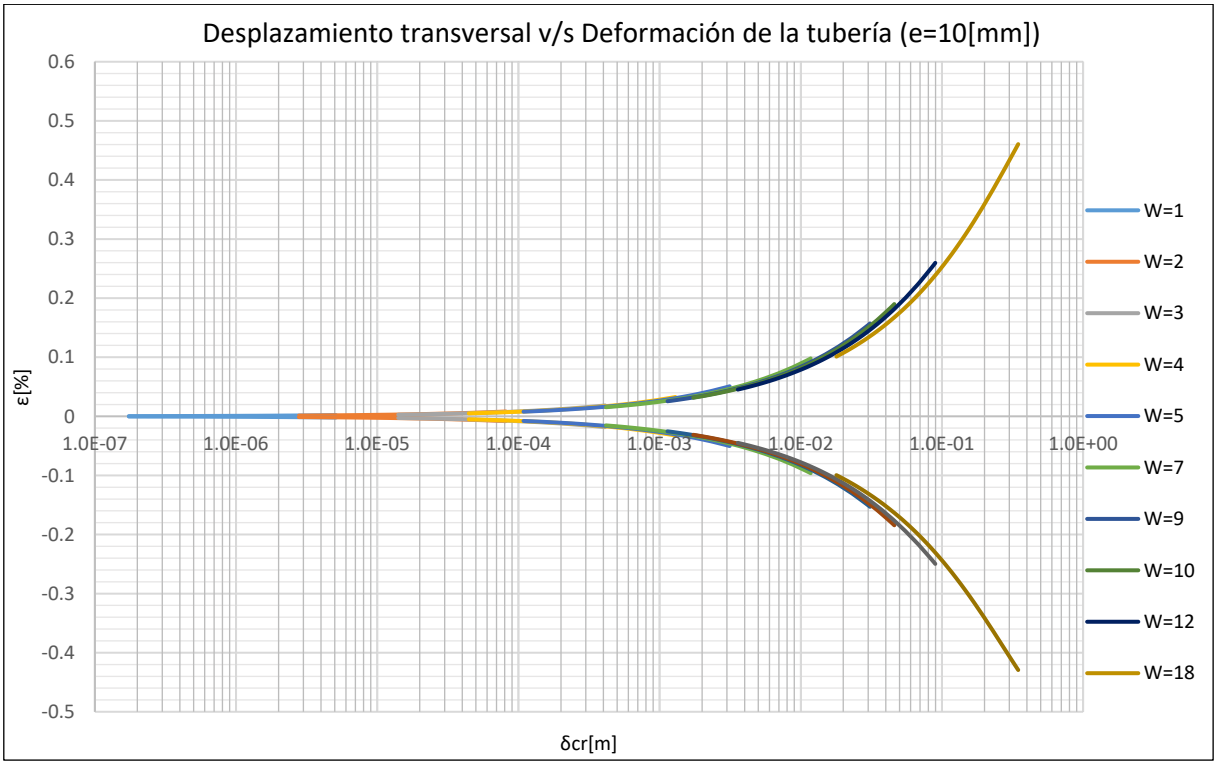


Gráfico 13-38: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], Suelo de Arena gruesa.

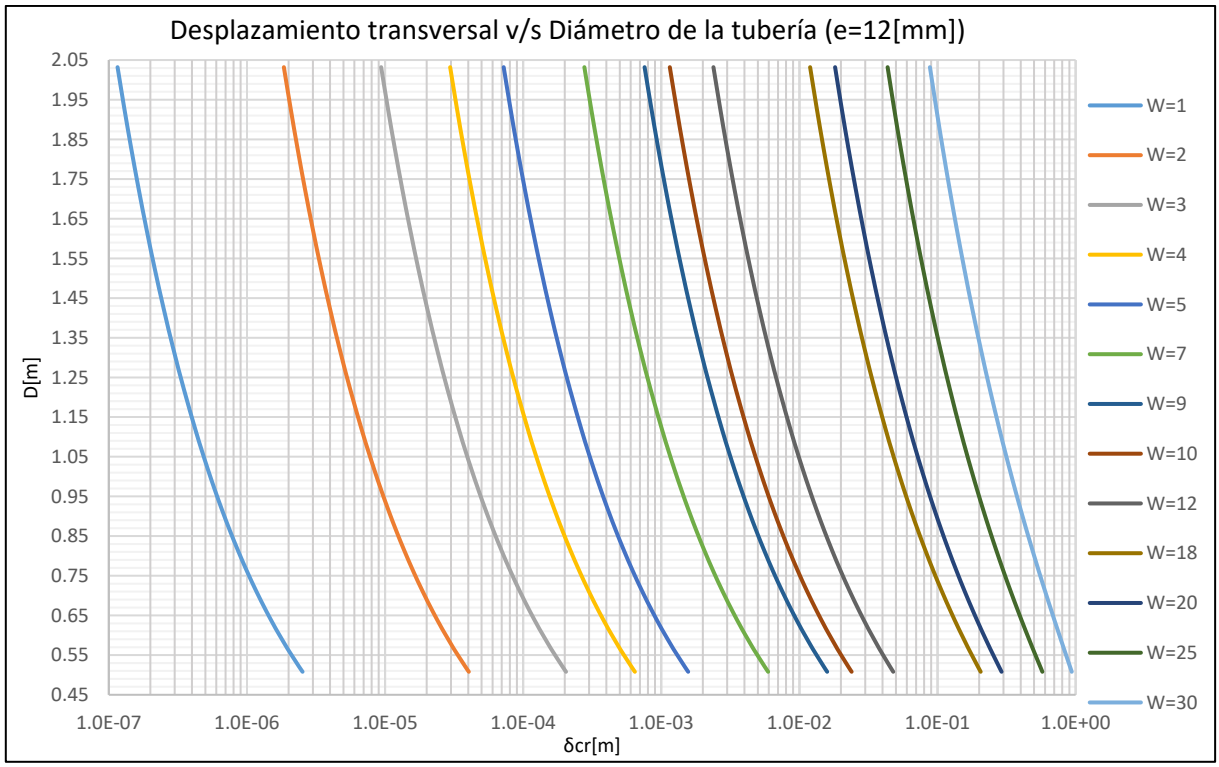


Gráfico 13-39: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], Suelo de Arena gruesa.

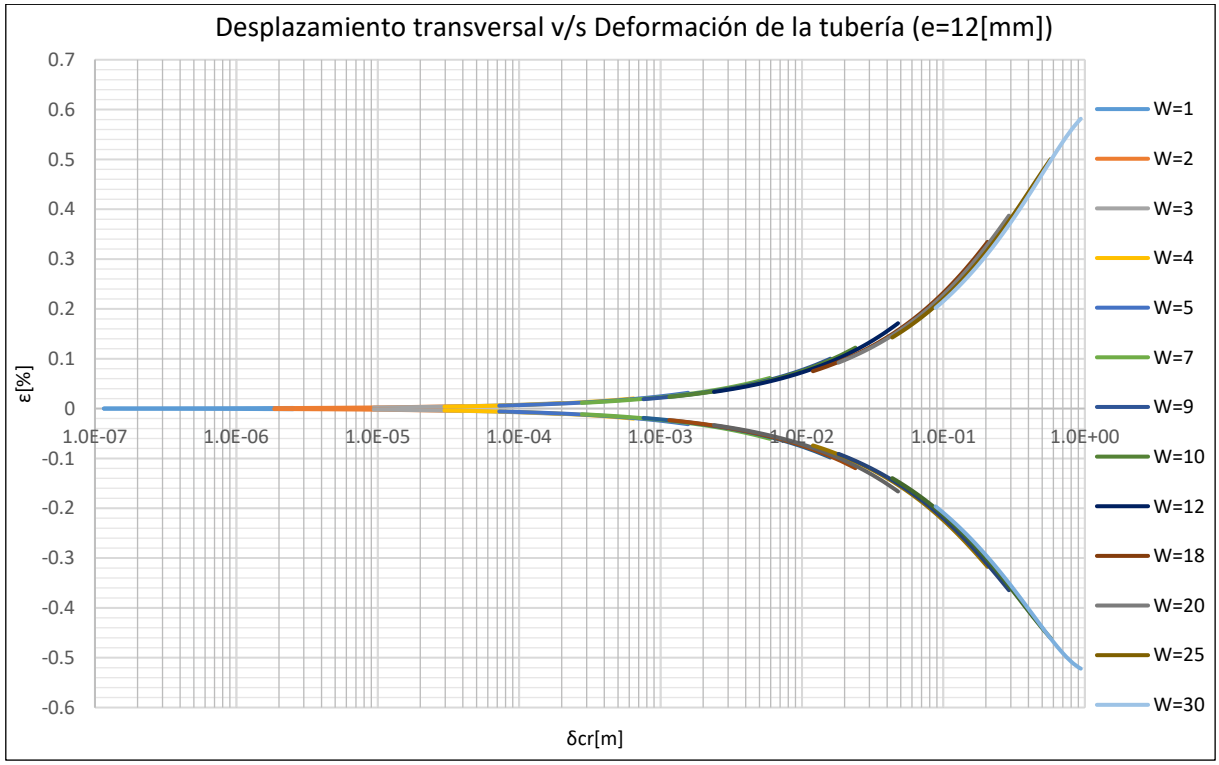


Gráfico 13-40: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], Suelo de Arena gruesa

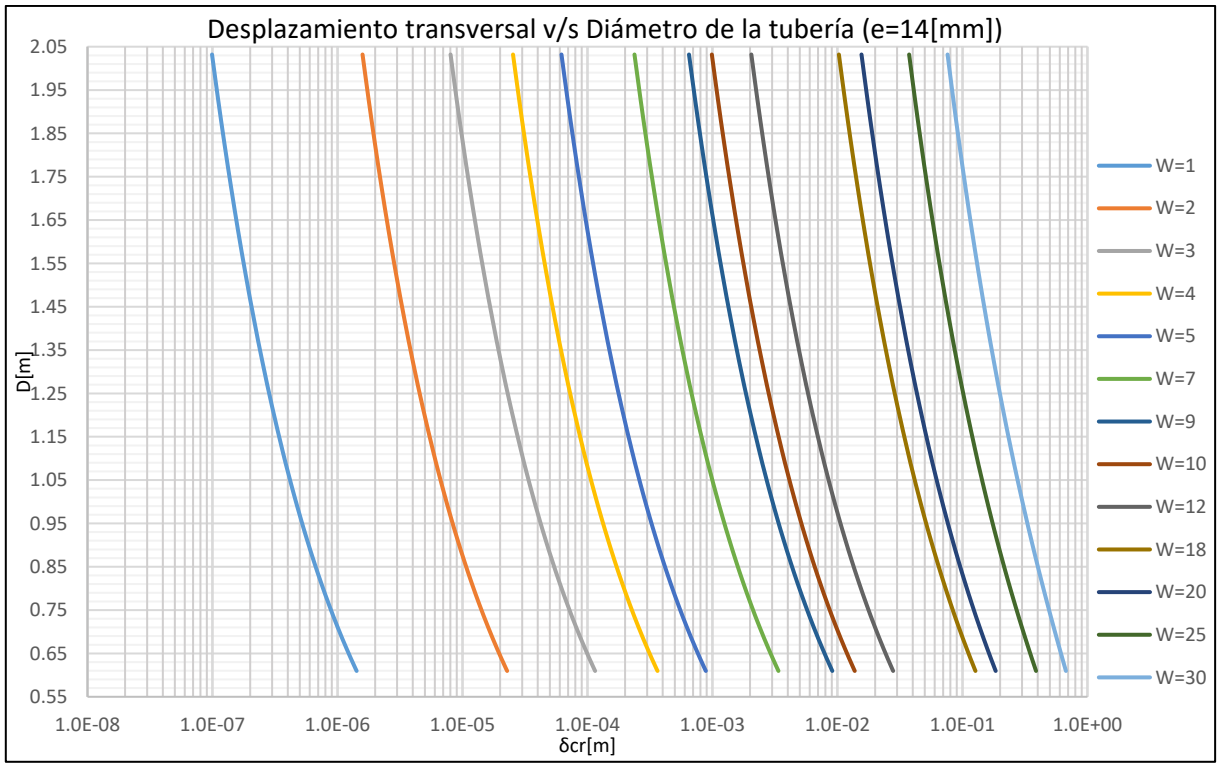


Gráfico 13-41: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], Suelo de Arena gruesa.

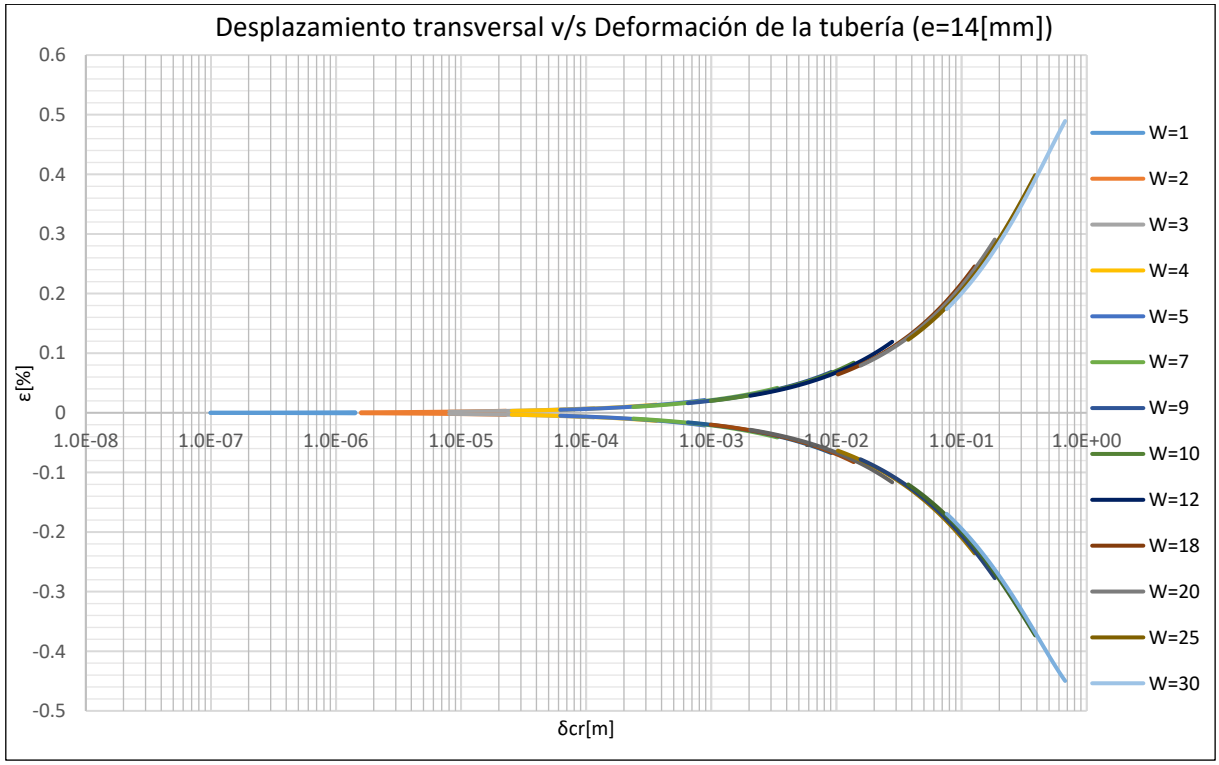


Gráfico 13-42: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], Suelo de Arena gruesa.

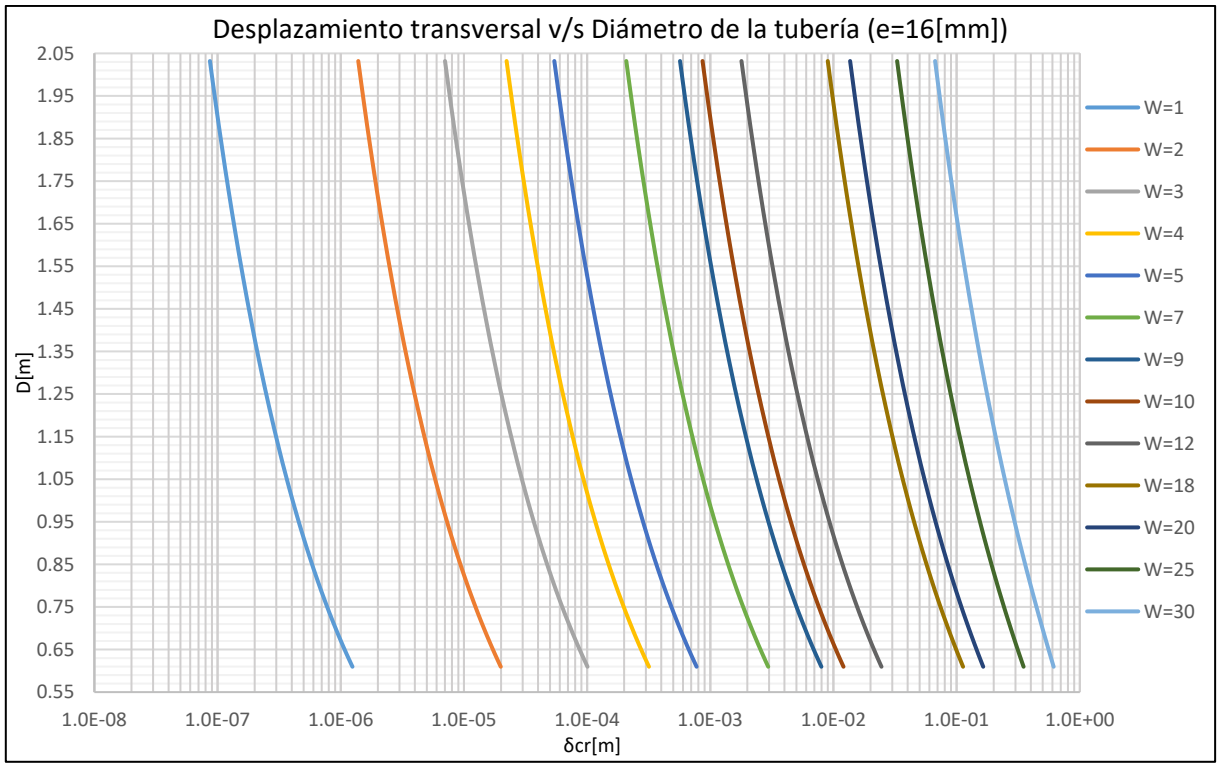


Gráfico 13-43: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], Suelo de Arena gruesa.

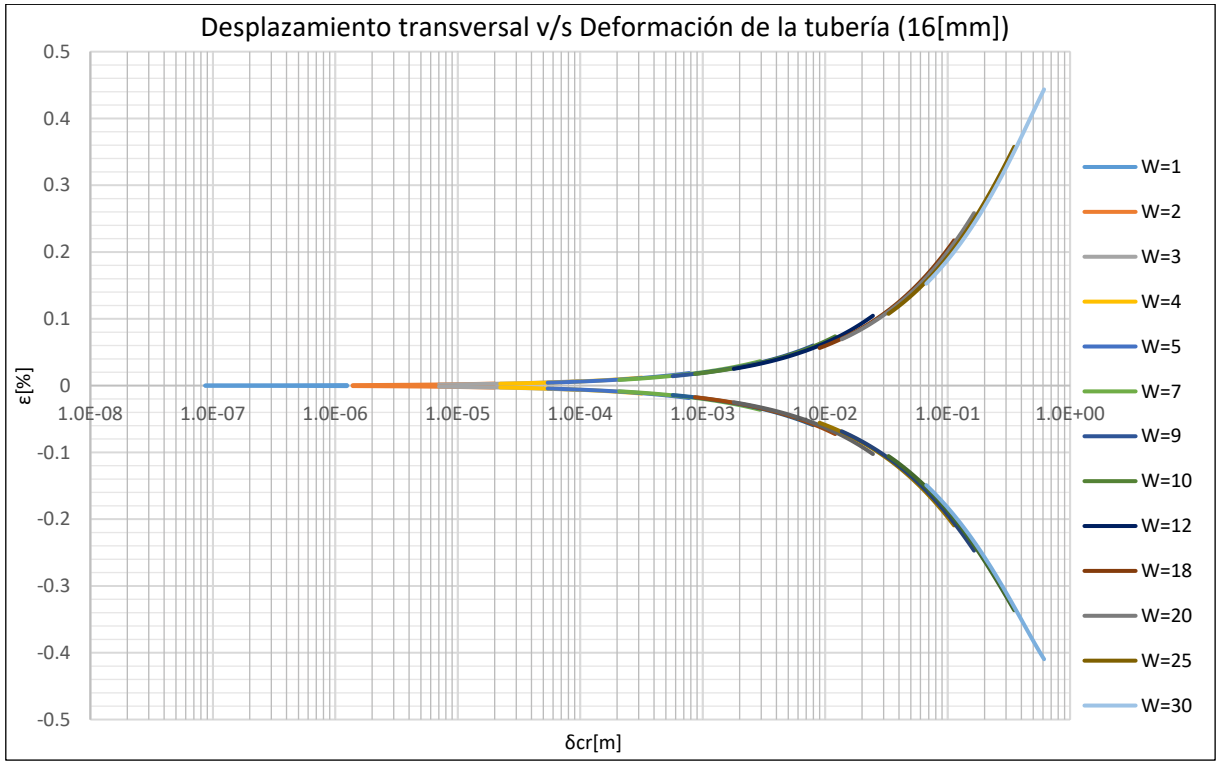


Gráfico 13-44: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], Suelo de Arena gruesa.

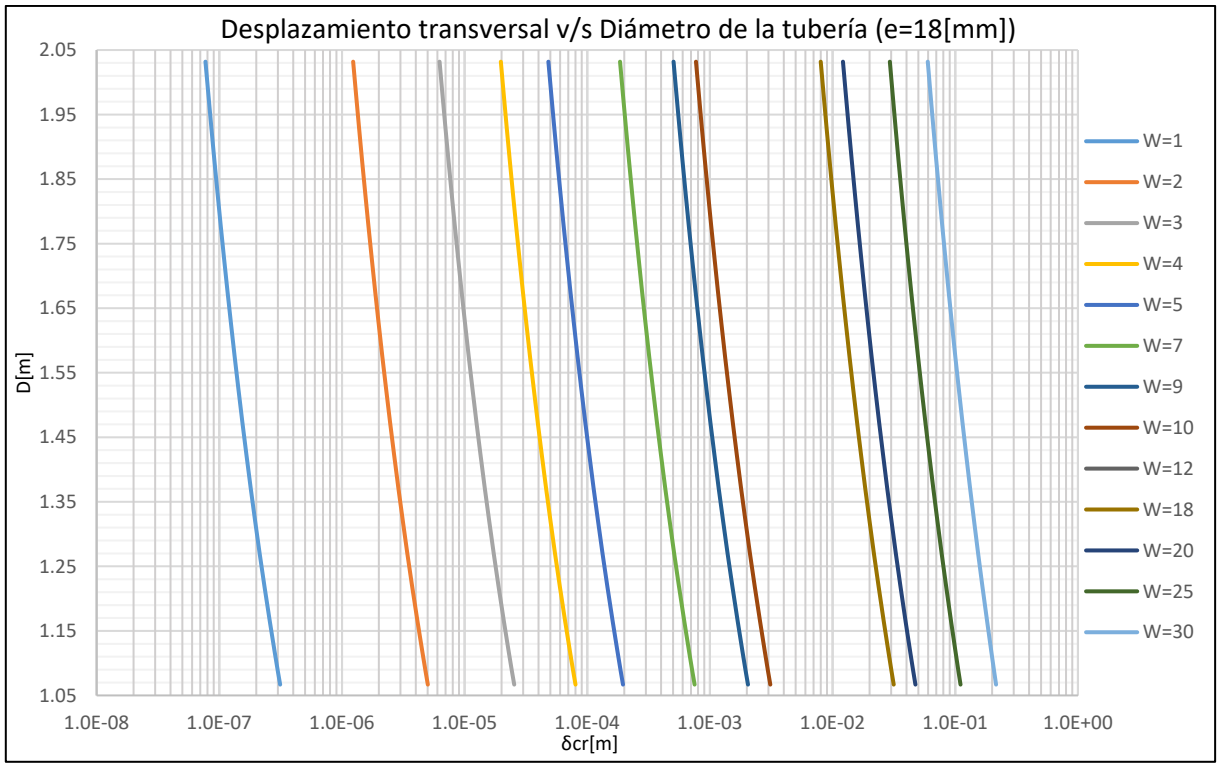


Gráfico 13-45: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], Suelo de Arena gruesa.

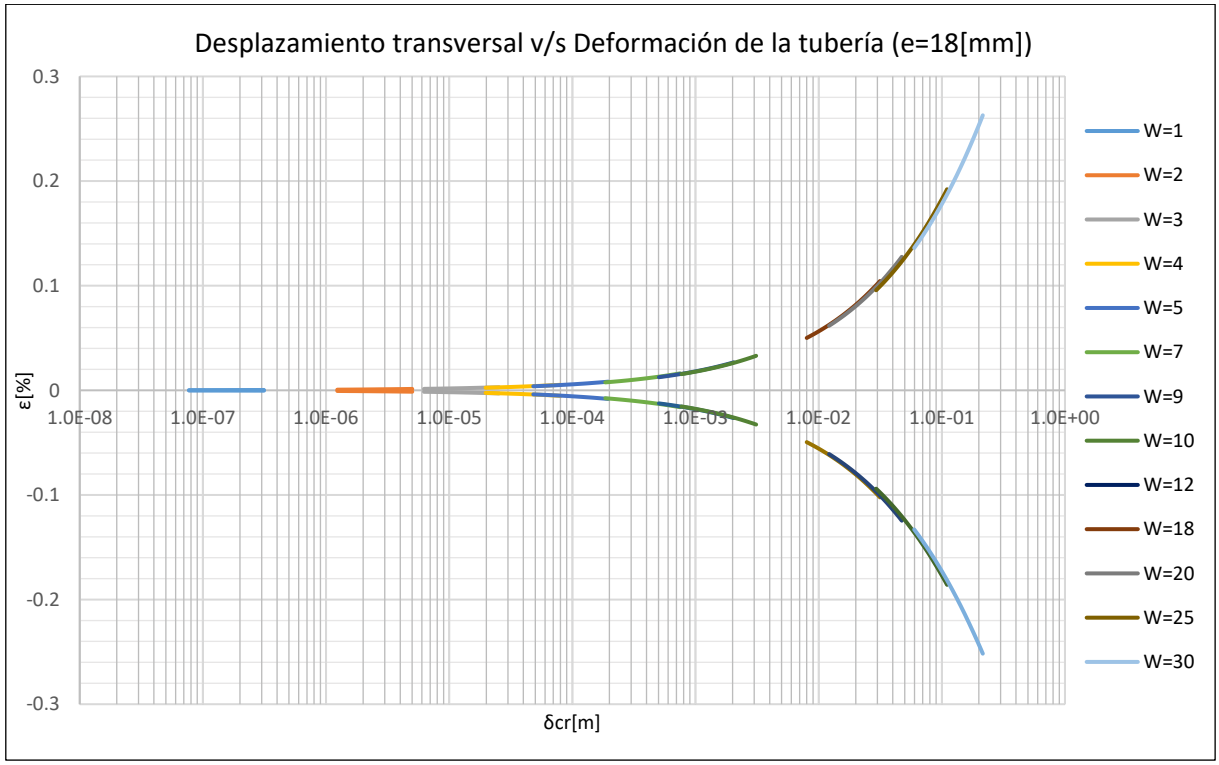


Gráfico 13-46: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], Suelo de Arena gruesa.

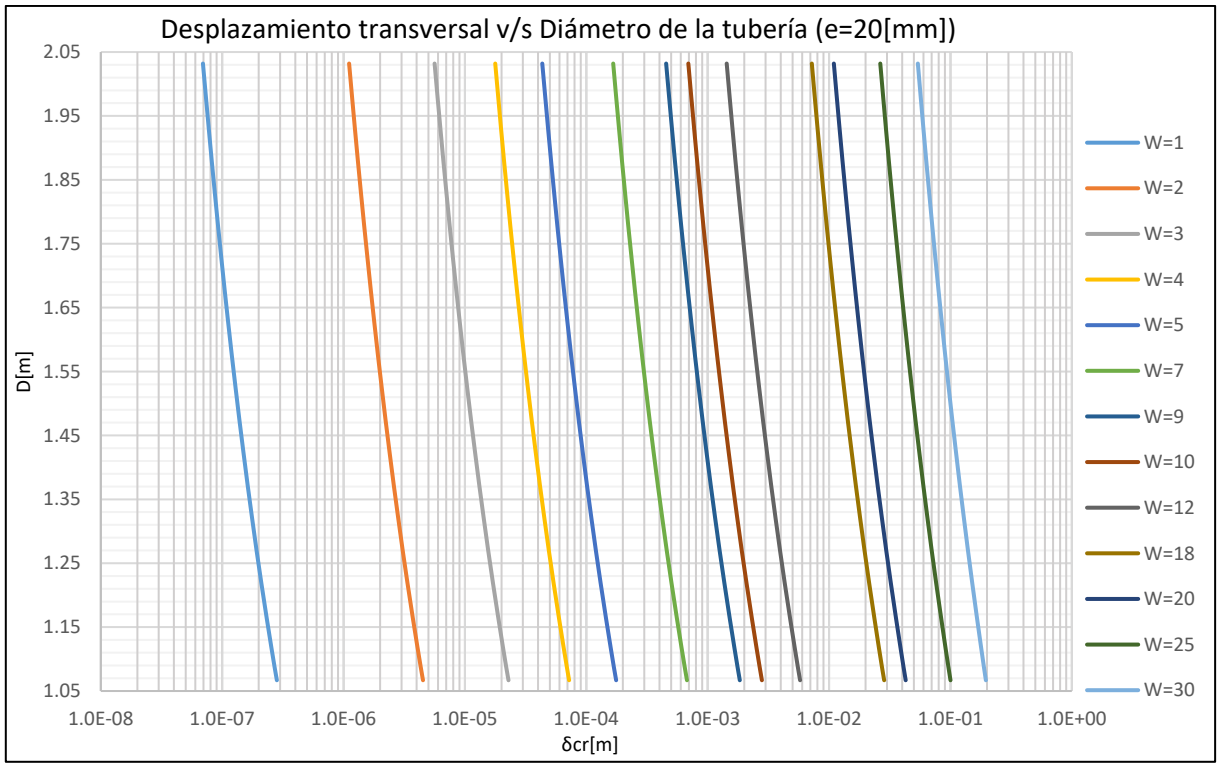


Gráfico 13-47: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], Suelo de Arena gruesa.

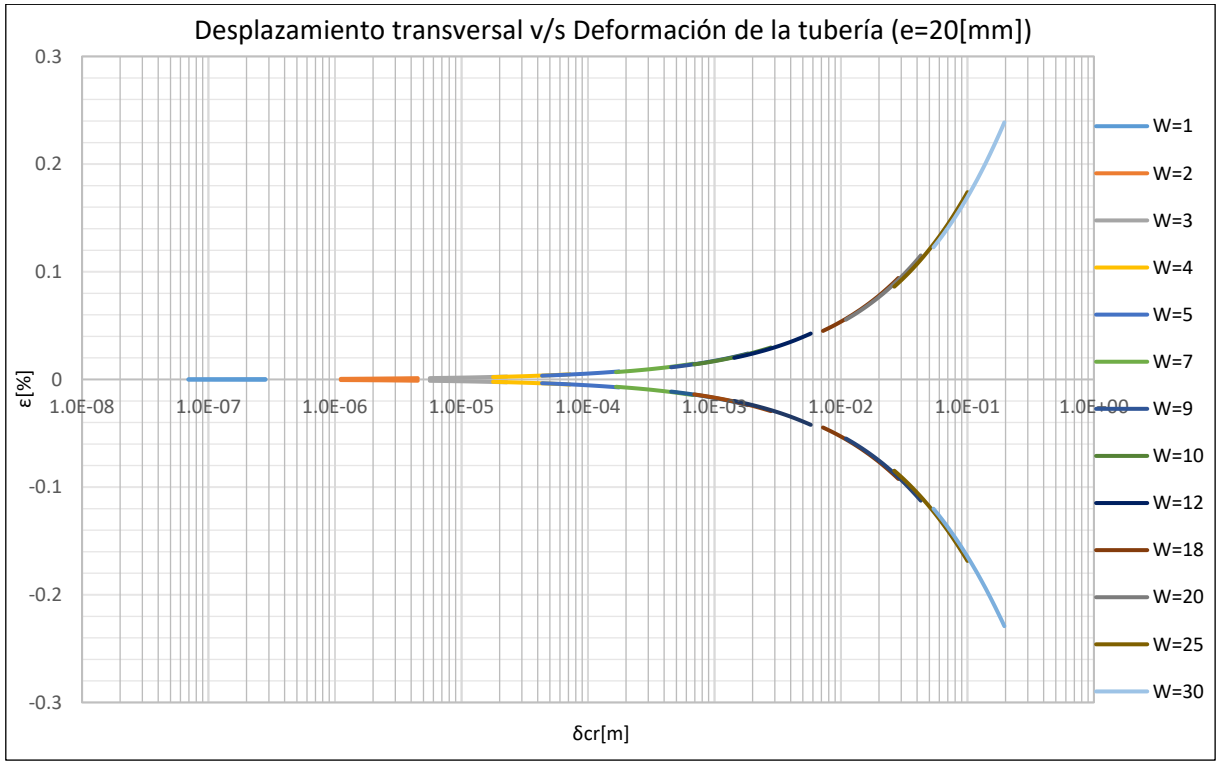


Gráfico 13-48: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

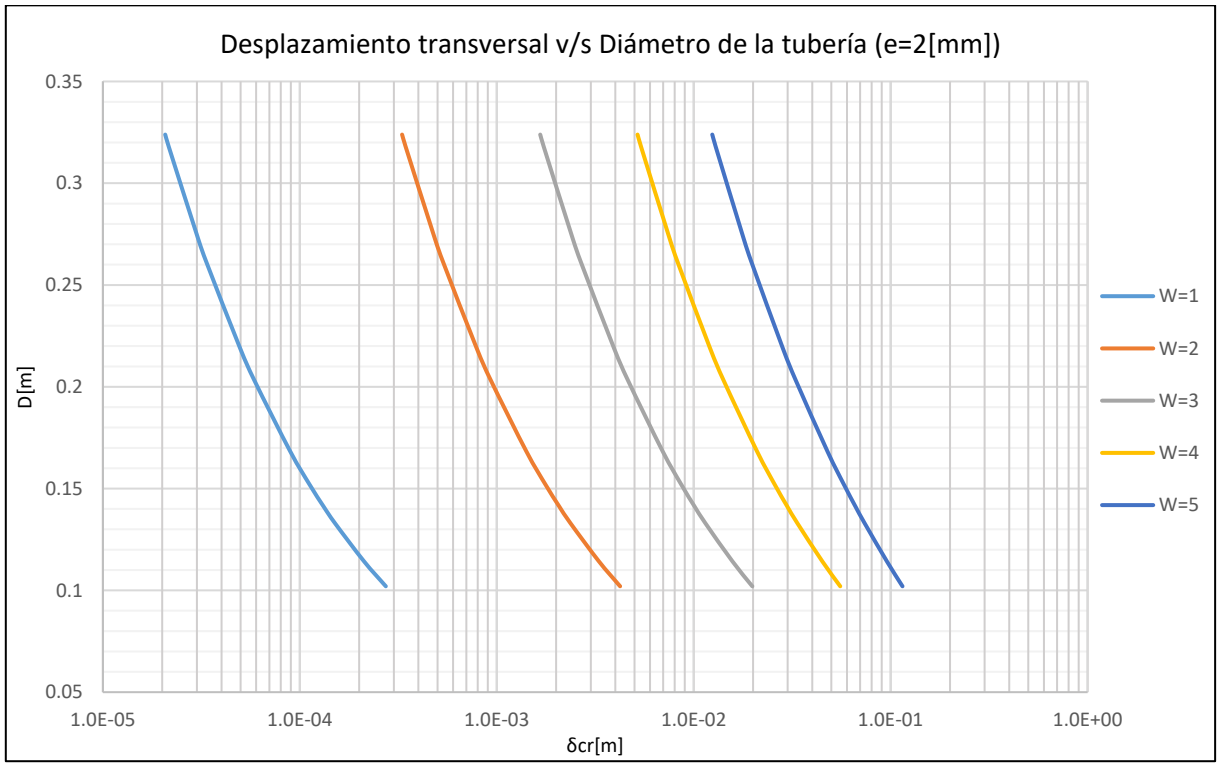


Gráfico 13-49: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

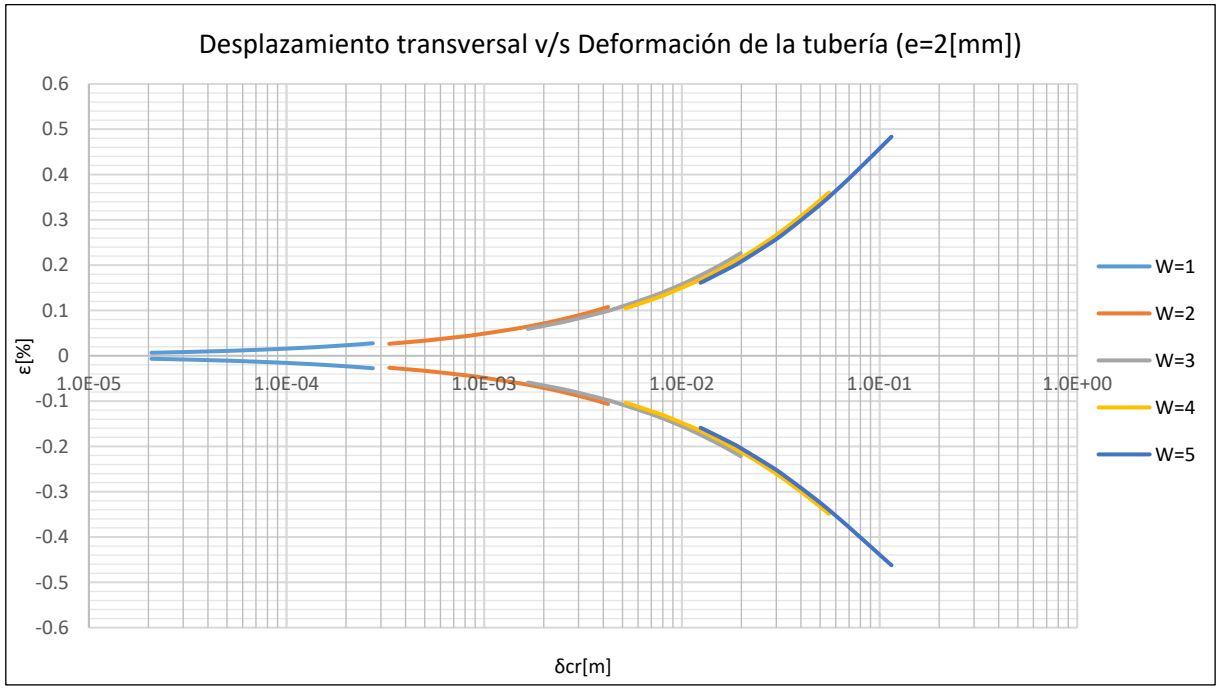


Gráfico 13-50: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

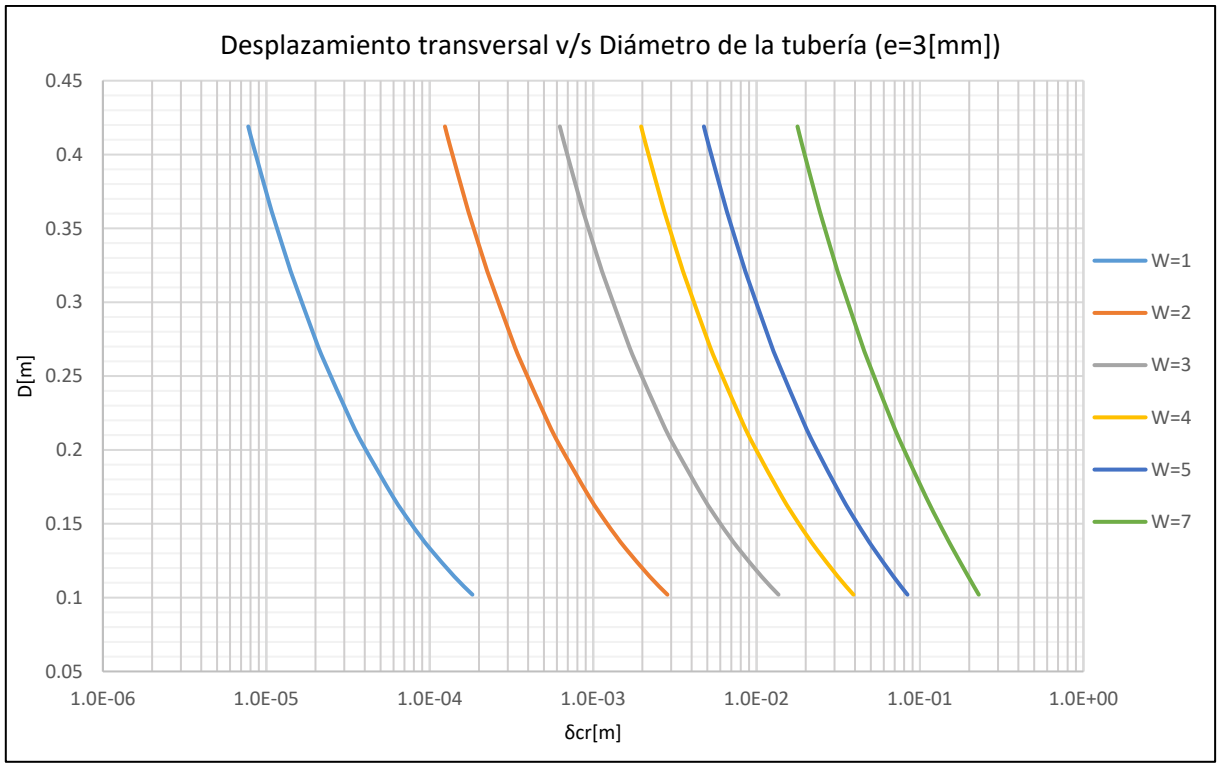


Gráfico 13-51: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

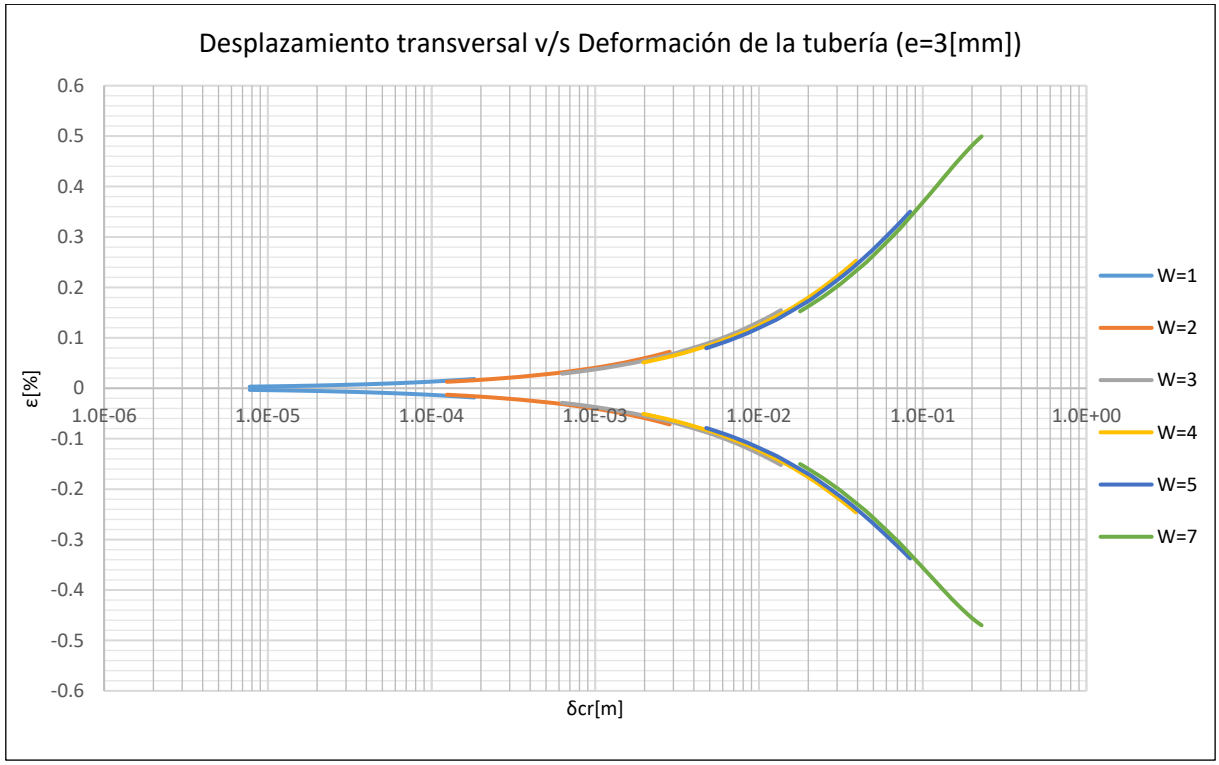


Gráfico 13-52: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

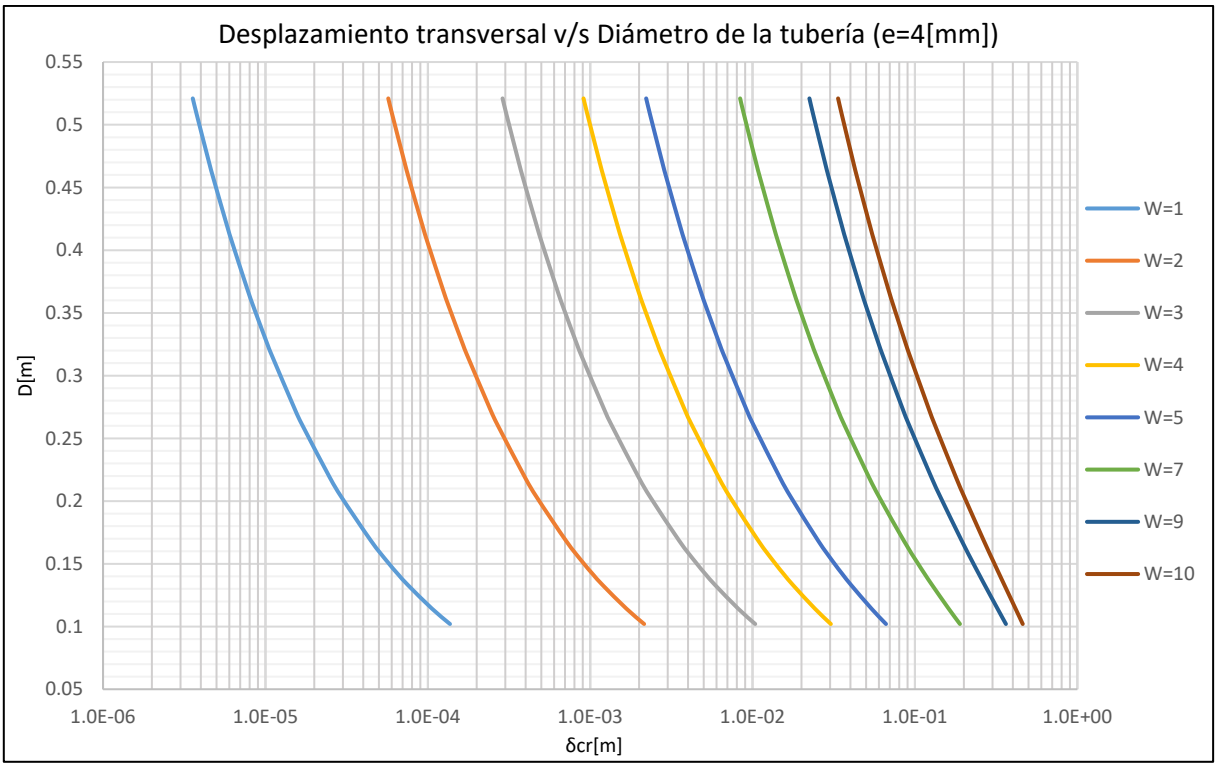


Gráfico 13-53: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

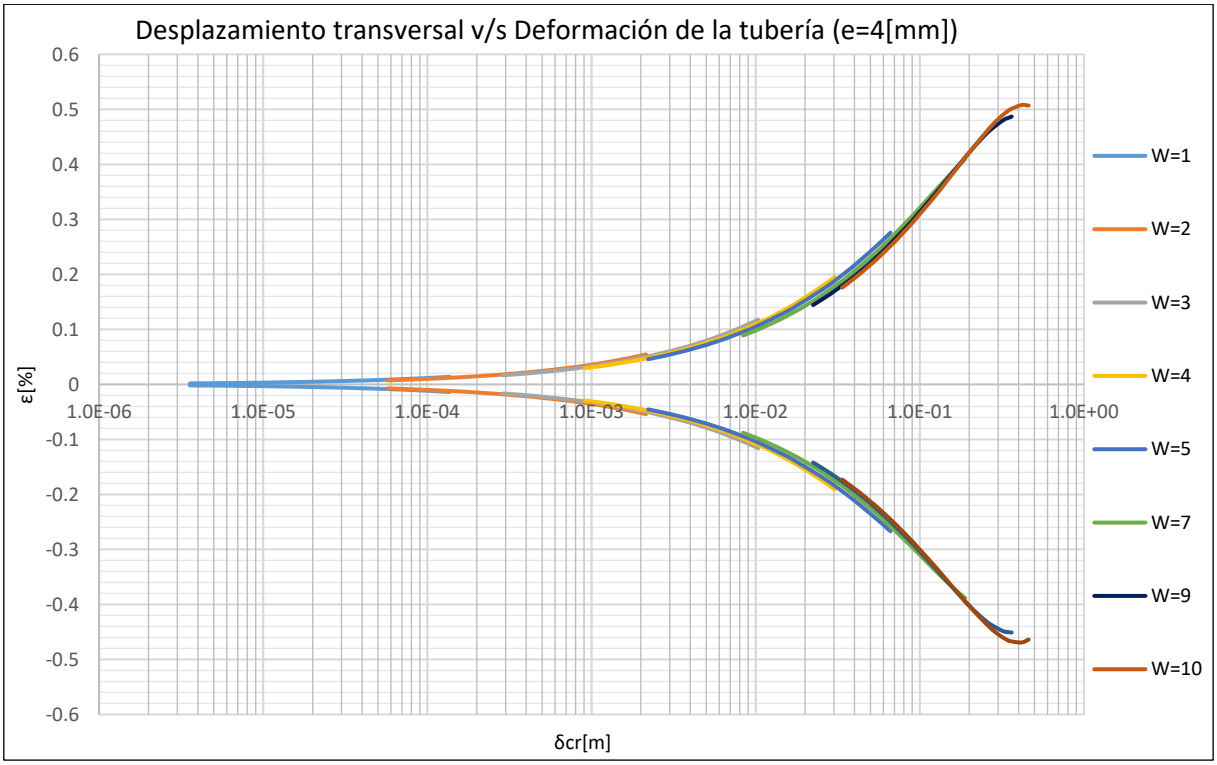


Gráfico 13-54: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

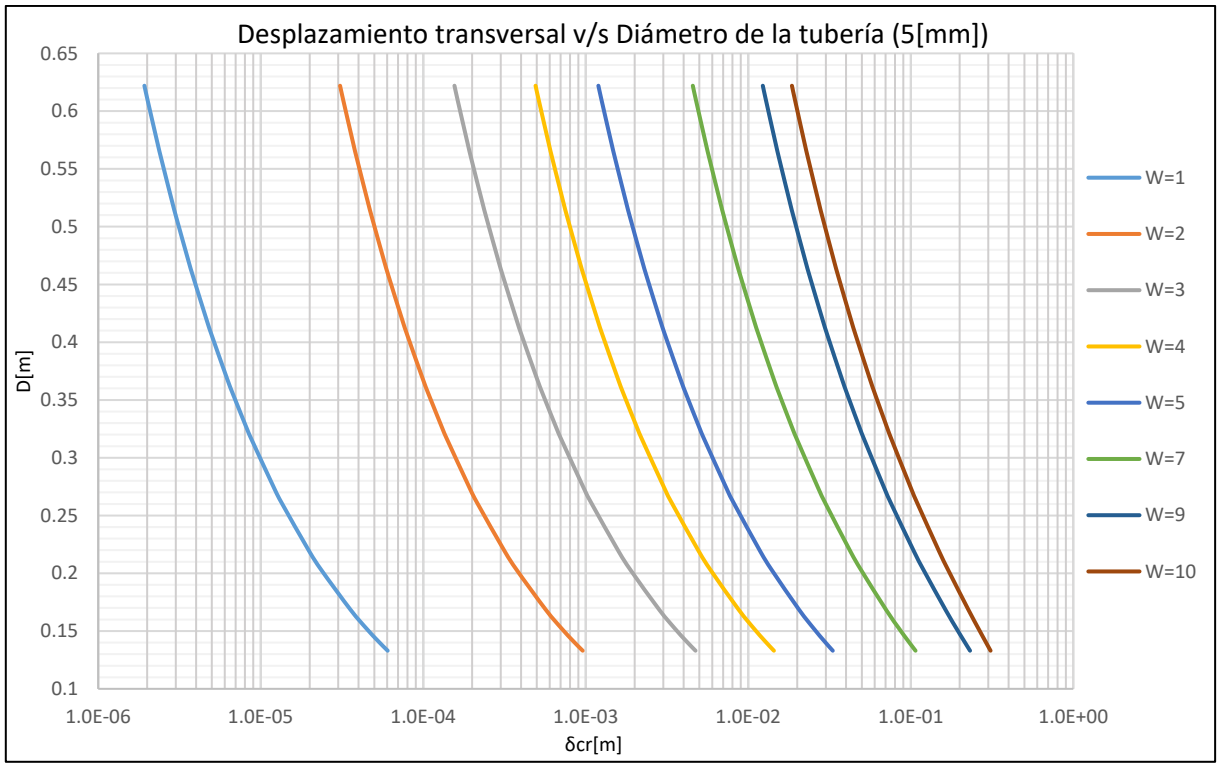


Gráfico 13-55: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

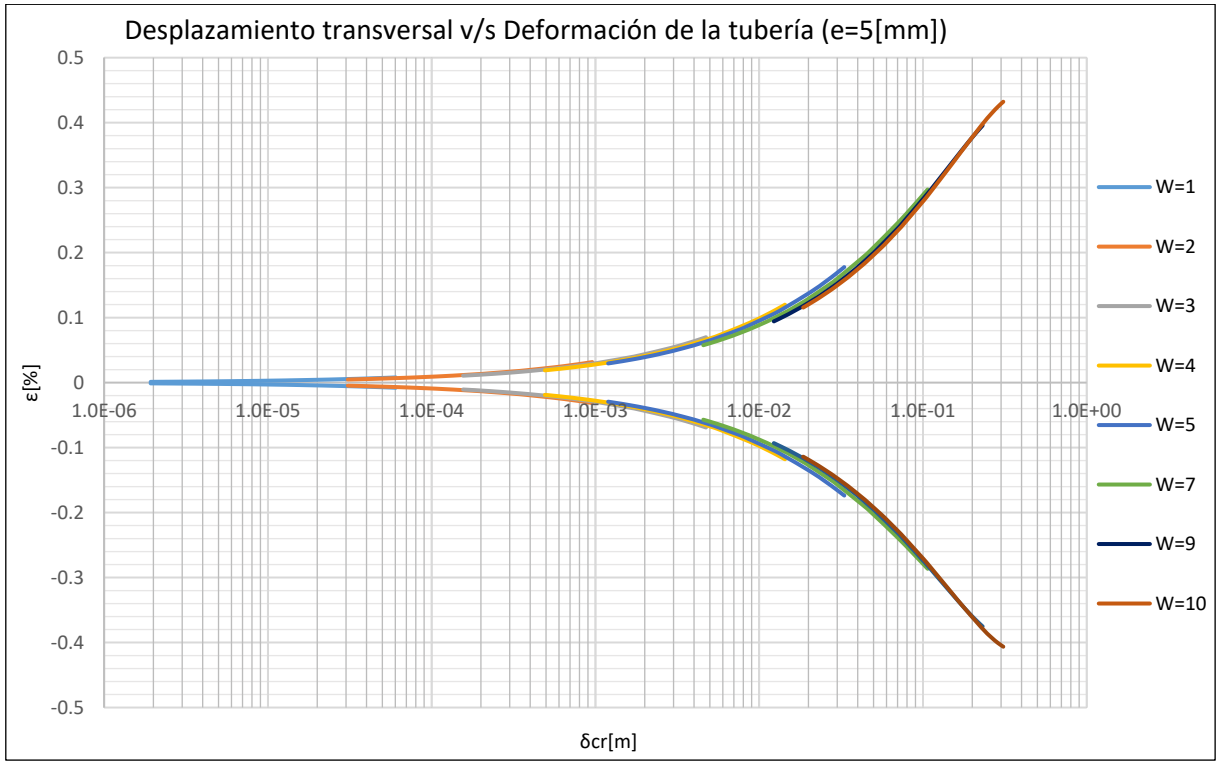


Gráfico 13-56: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

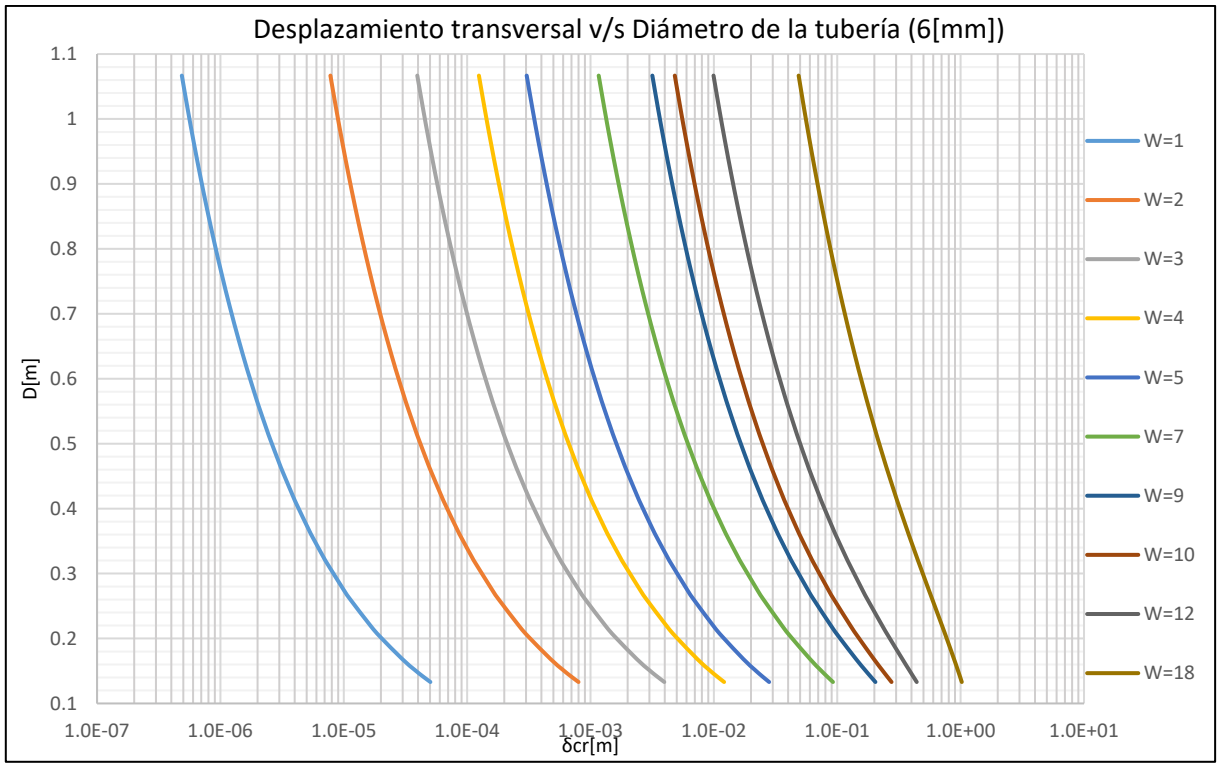


Gráfico 13-57: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

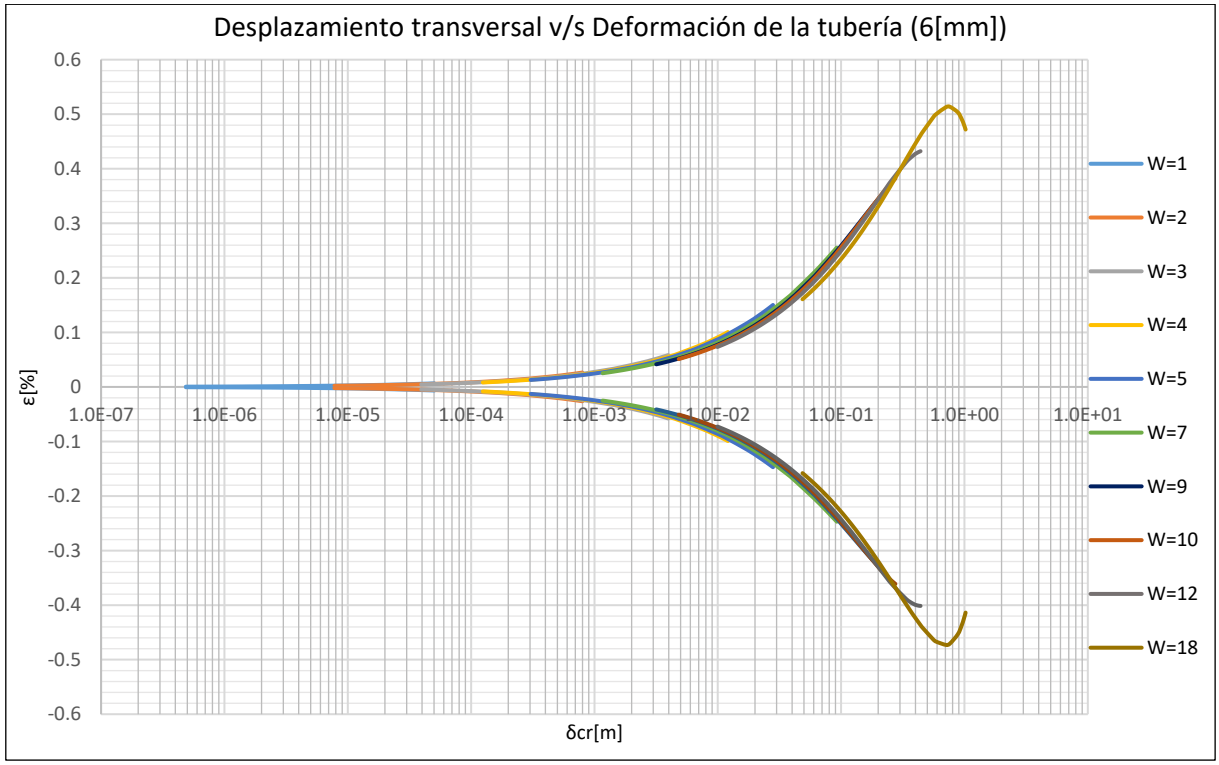


Gráfico 13-58: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

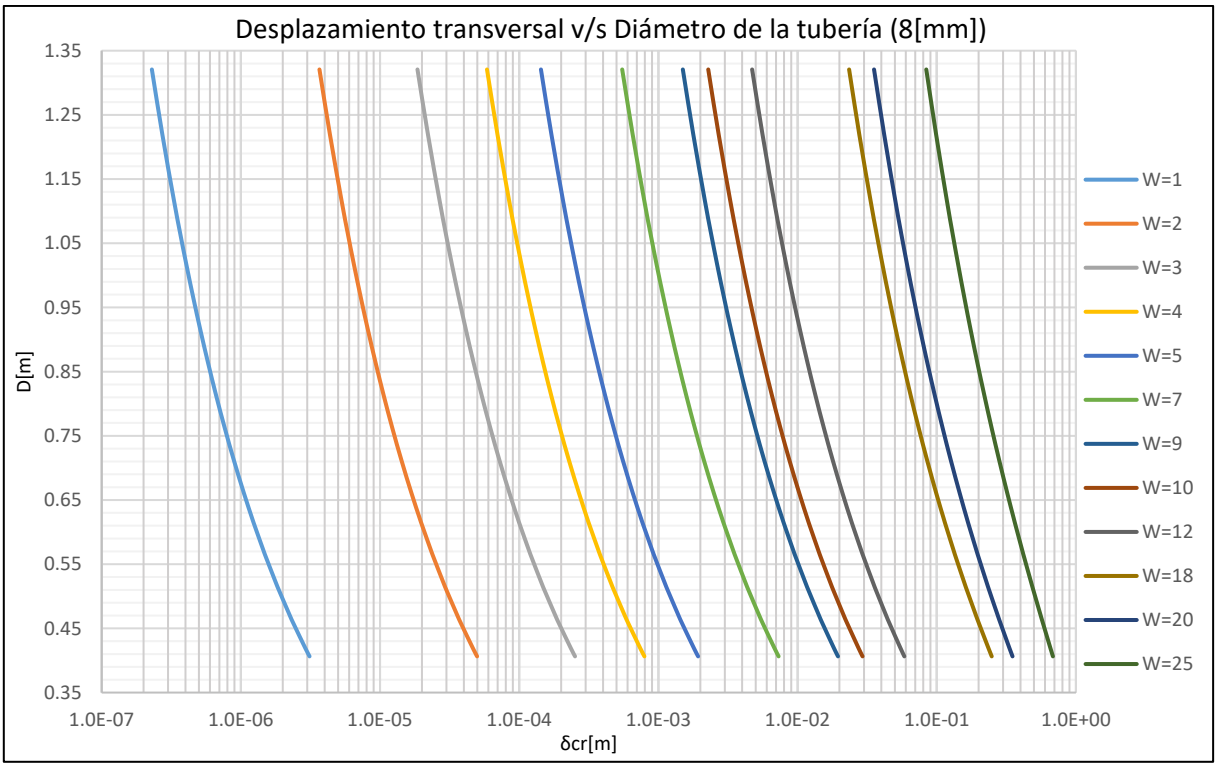


Gráfico 13-59: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

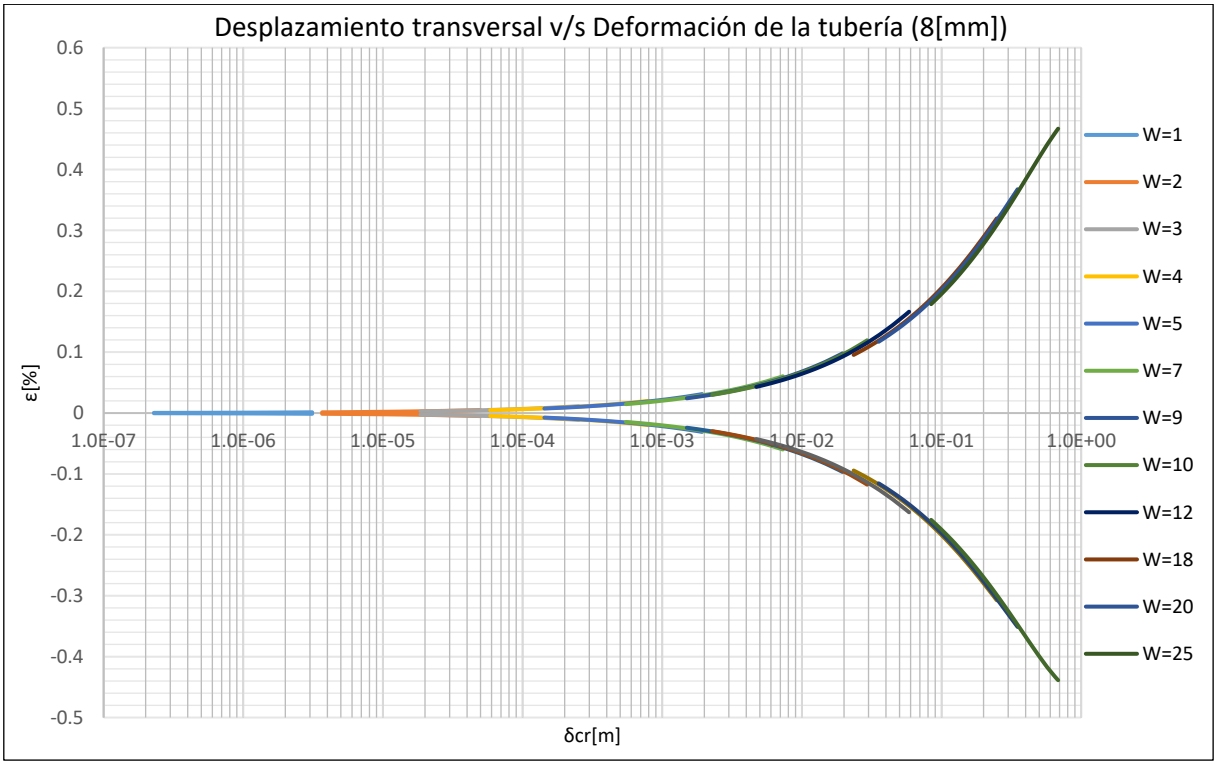


Gráfico 13-60: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

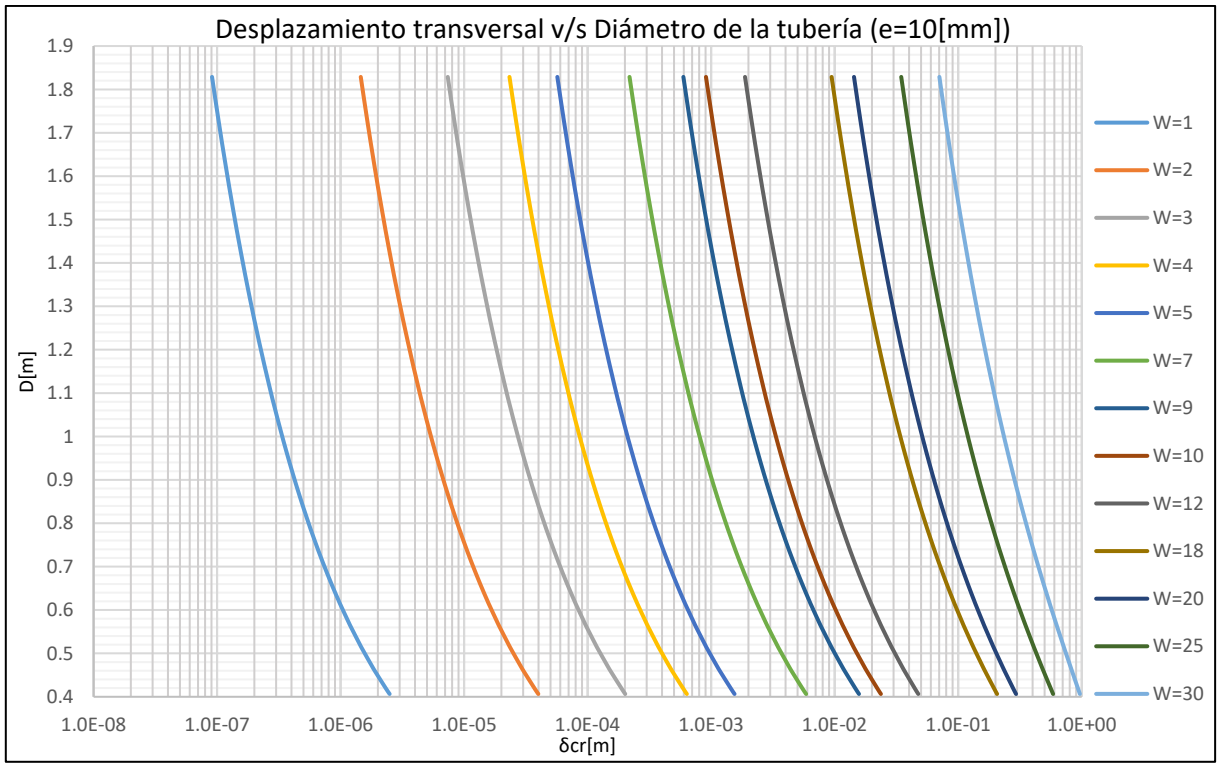


Gráfico 13-61: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

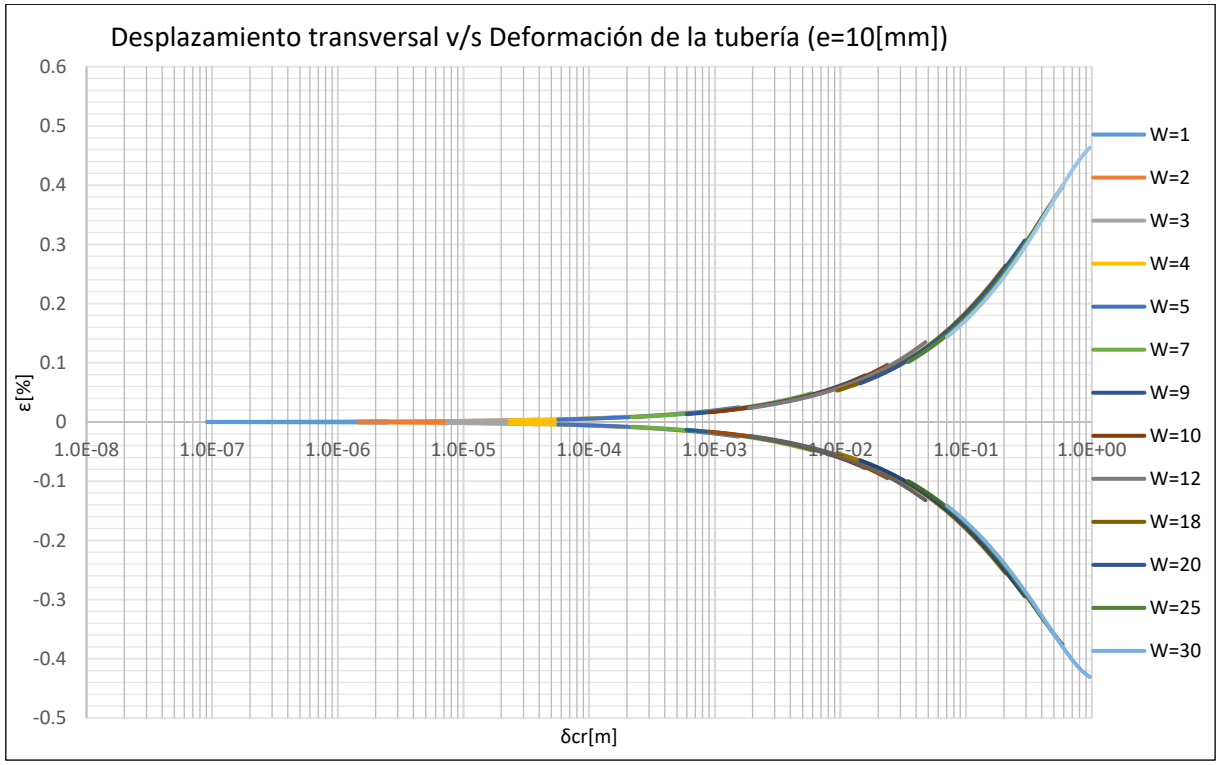


Gráfico 13-62: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

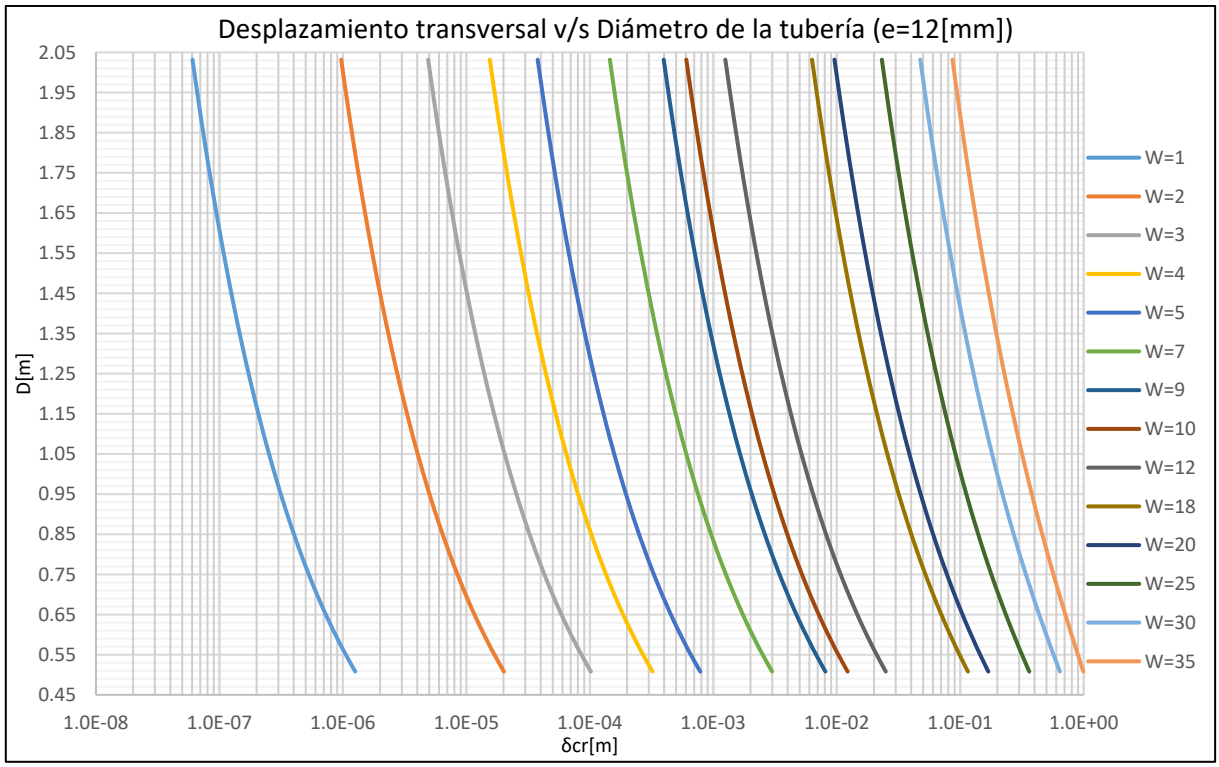


Gráfico 13-63: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

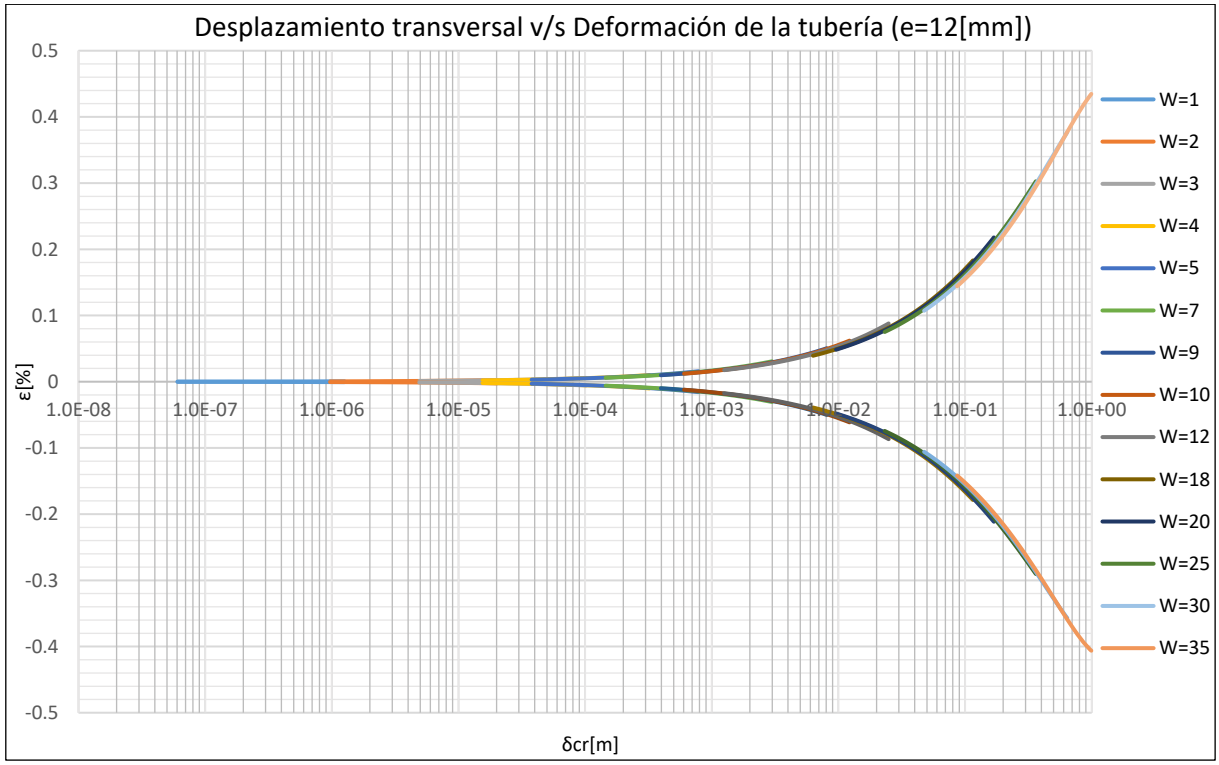


Gráfico 13-64: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

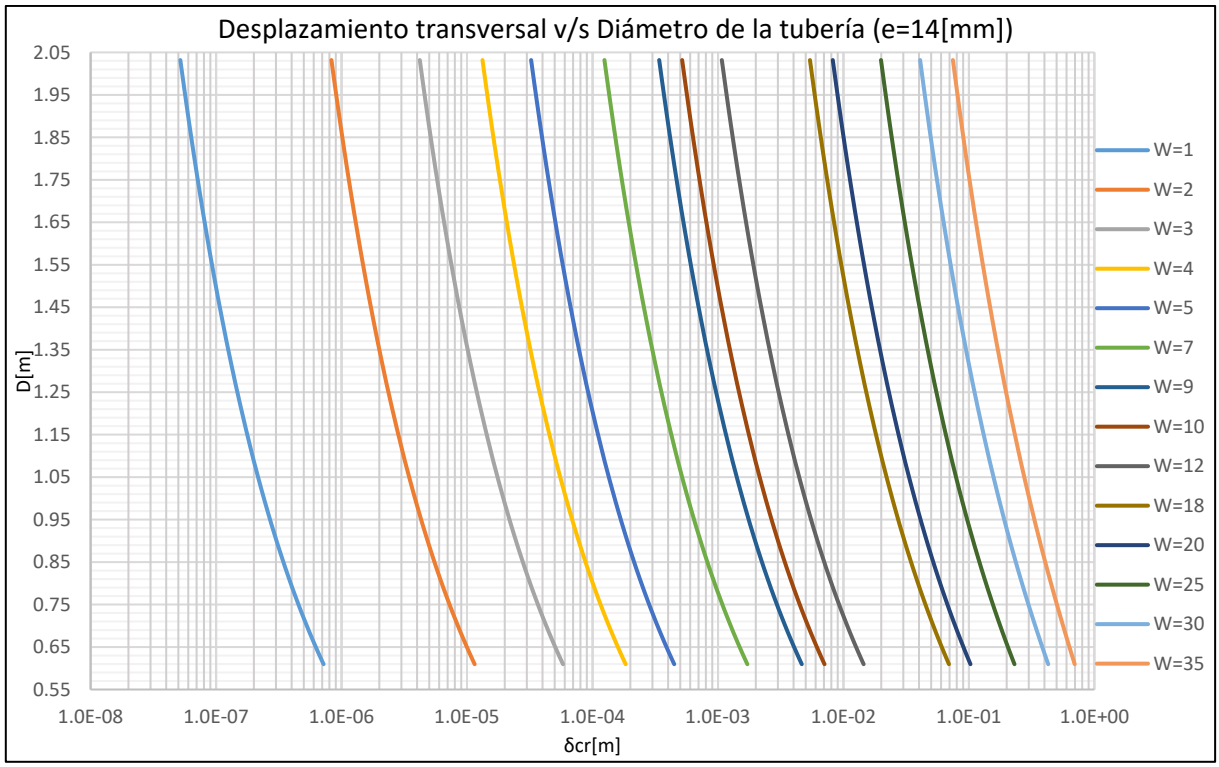


Gráfico 13-65: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

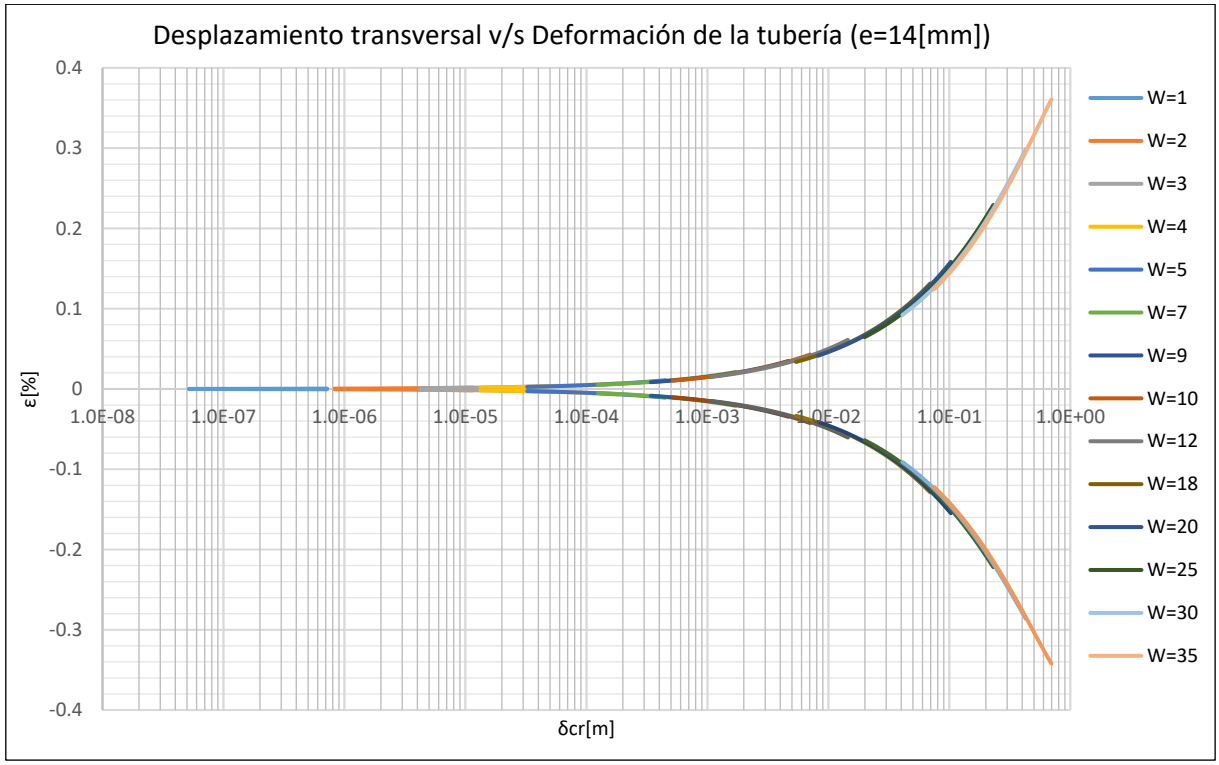


Gráfico 13-66: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

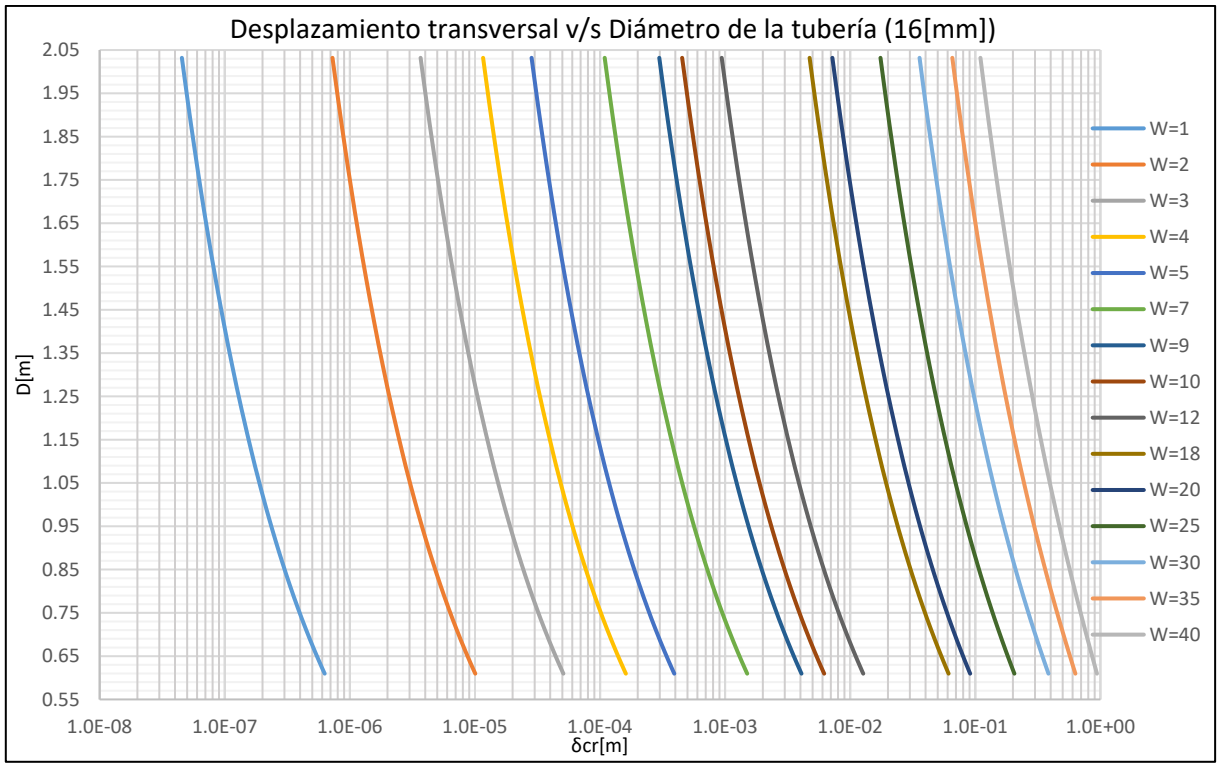


Gráfico 13-67: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

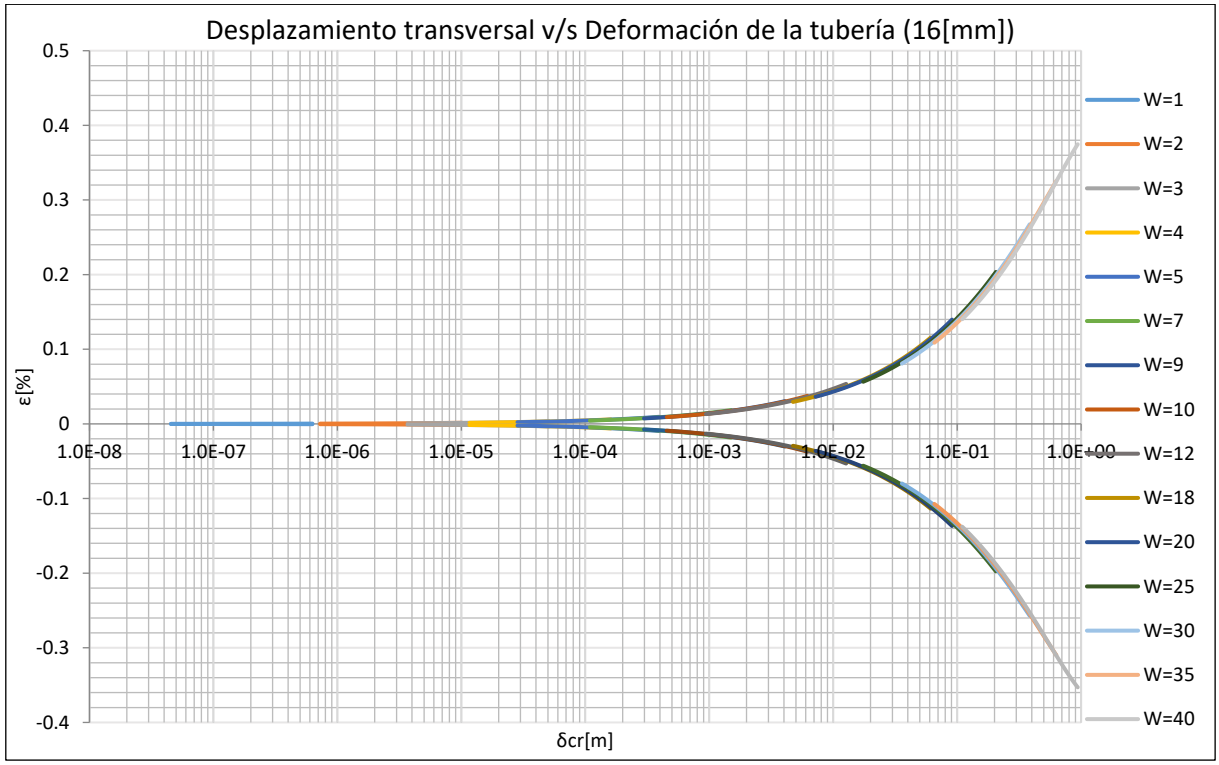


Gráfico 13-68: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

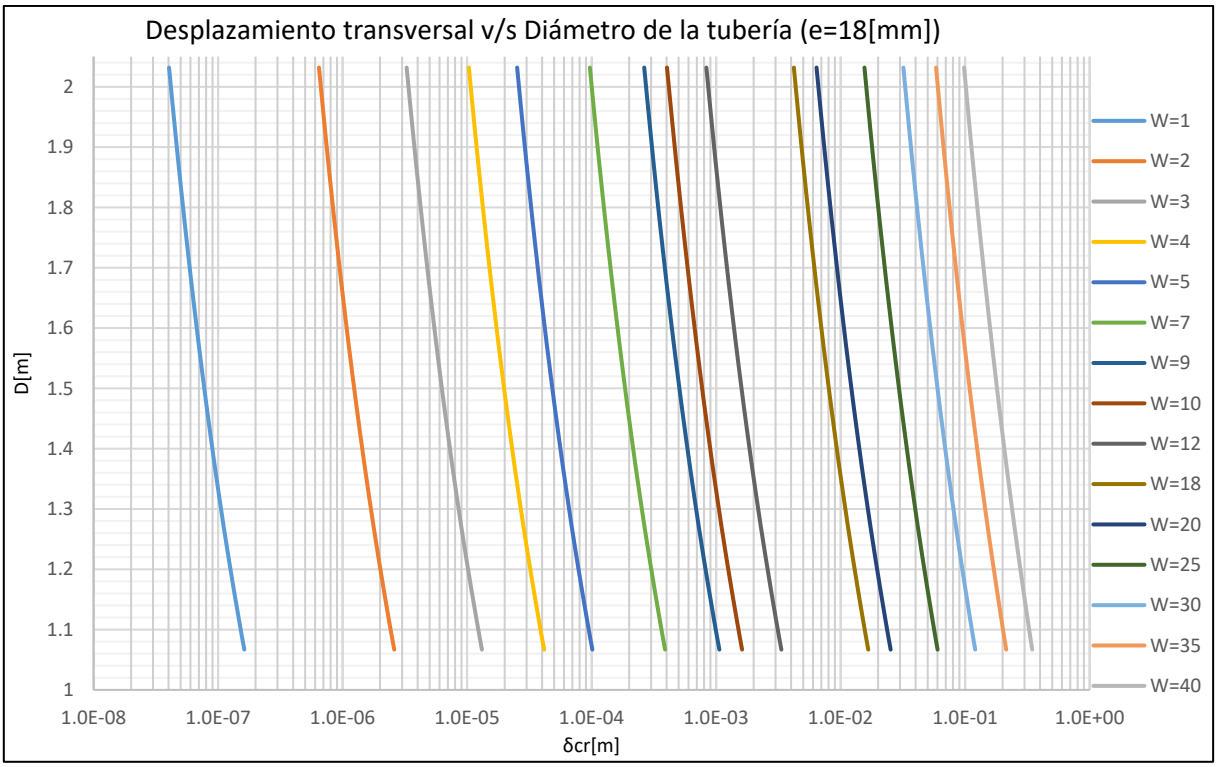


Gráfico 13-69: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

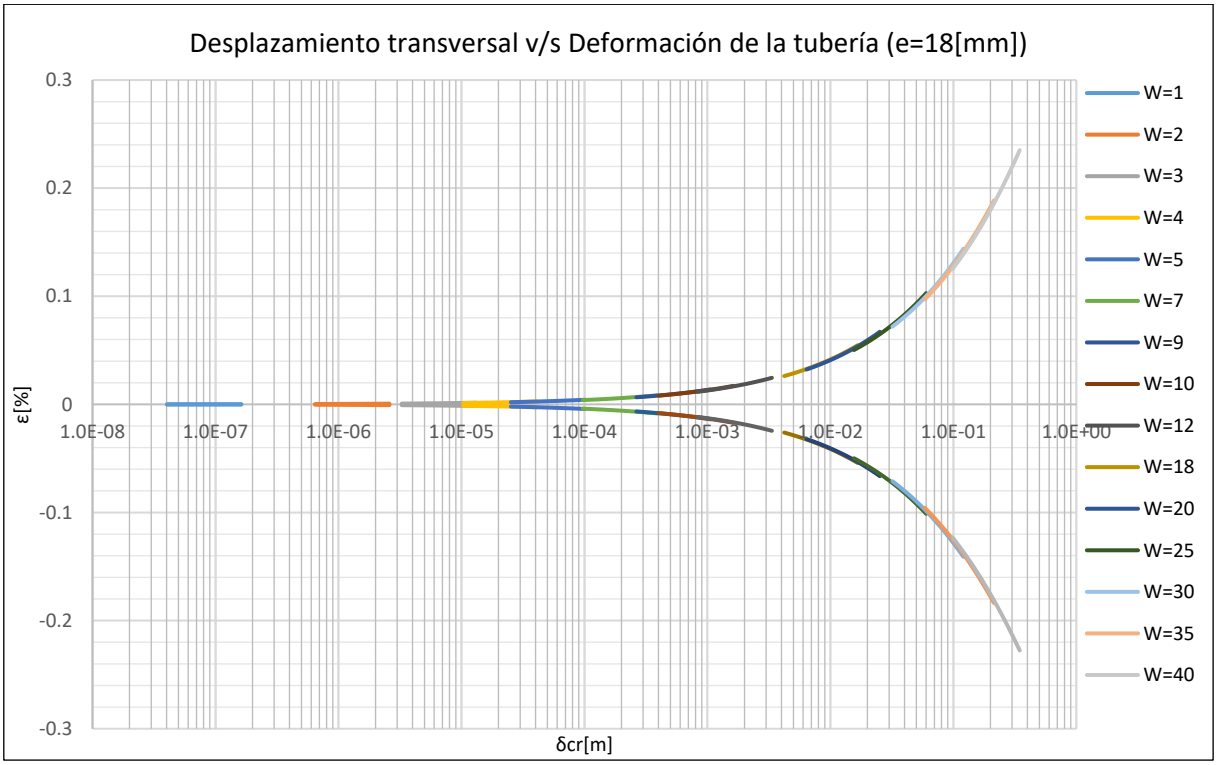


Gráfico 13-70: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

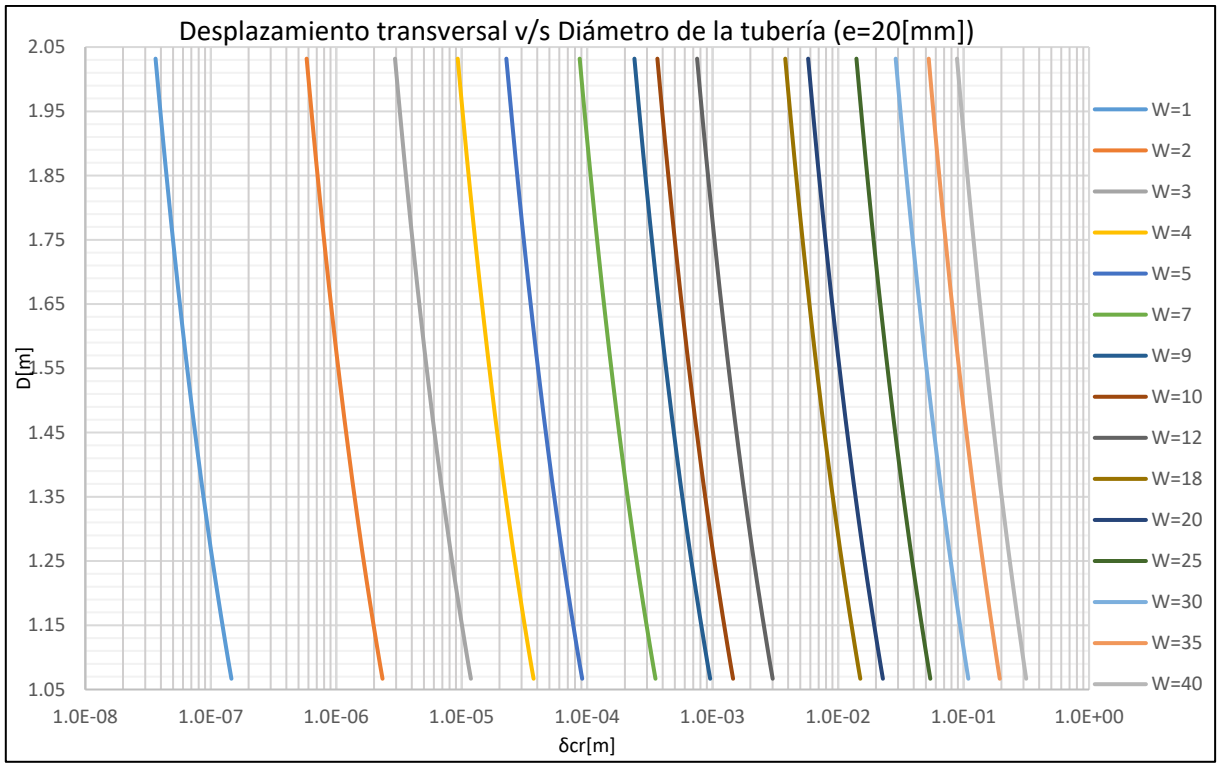


Gráfico 13-71: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

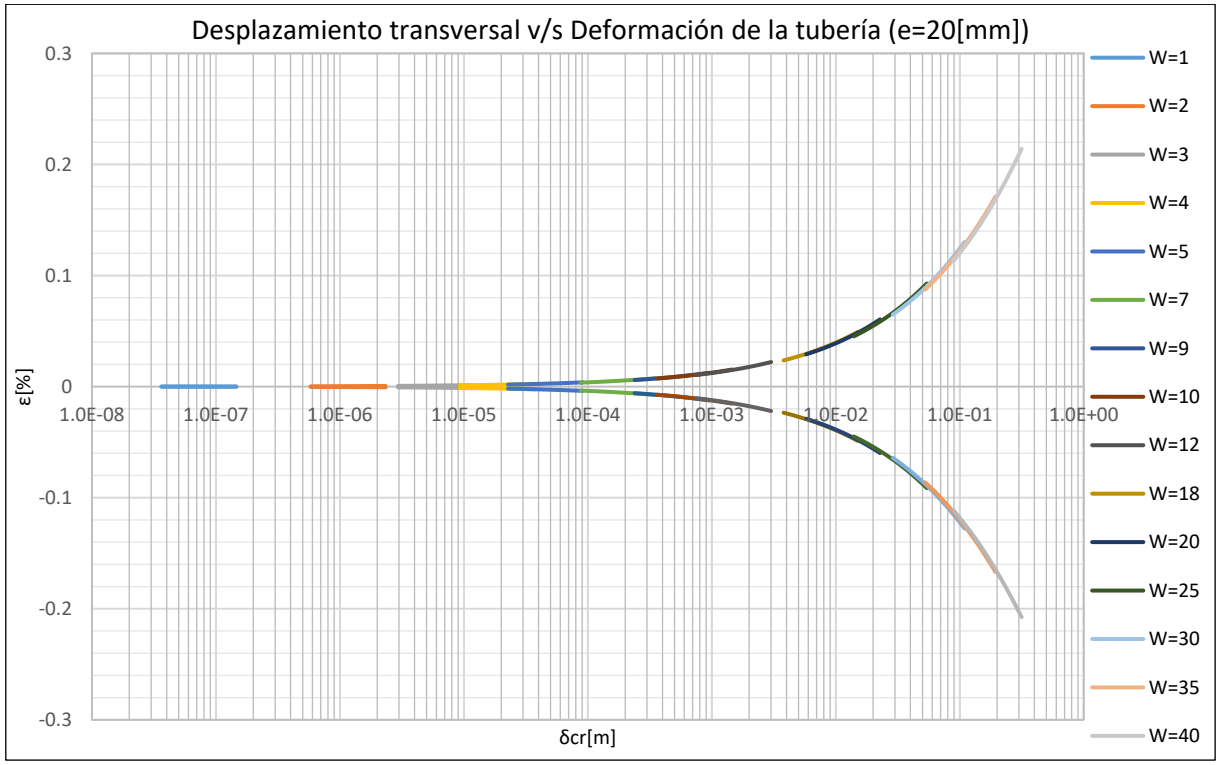


Gráfico 13-72: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

k.2. Tuberías de HDPE

k.2.1. Tuberías de densidad PE80

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

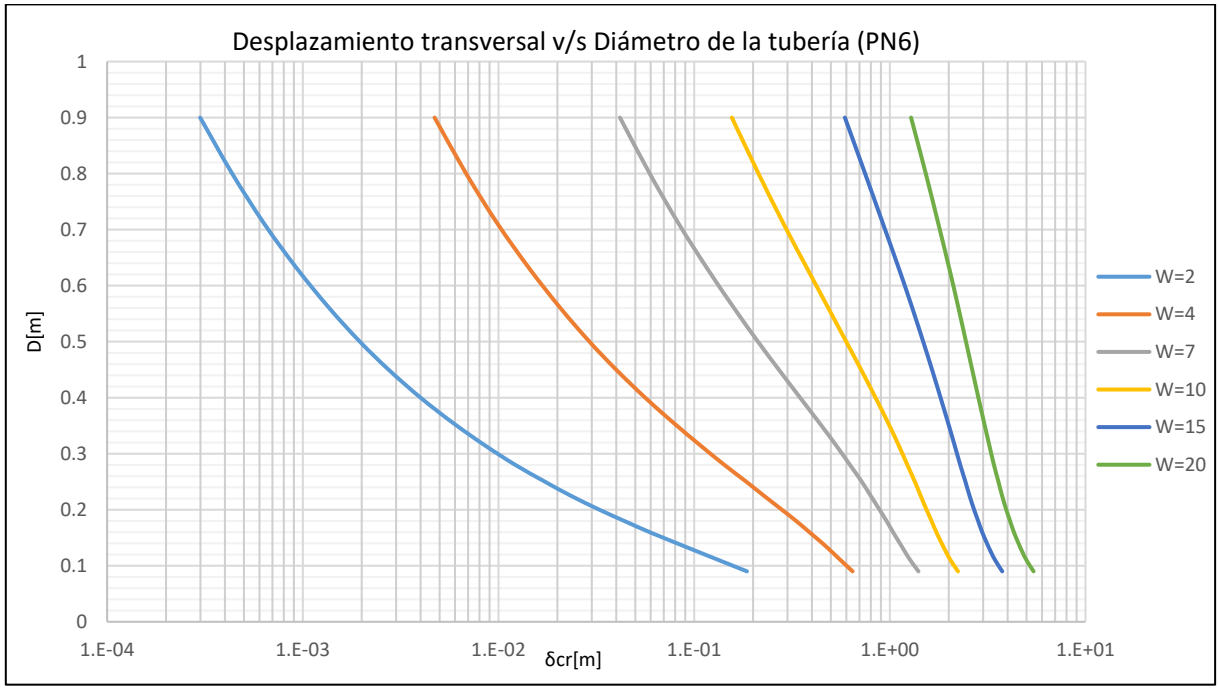


Gráfico 13-73: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena Fina.

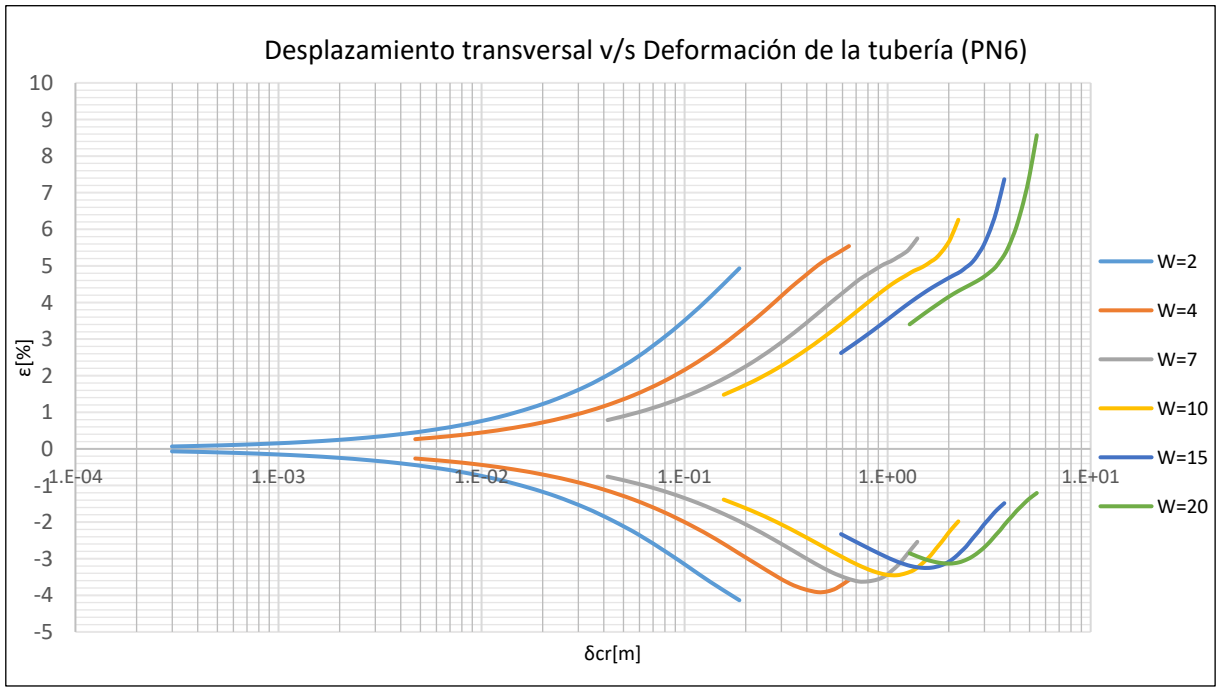


Grafico 13-74: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena Fina.

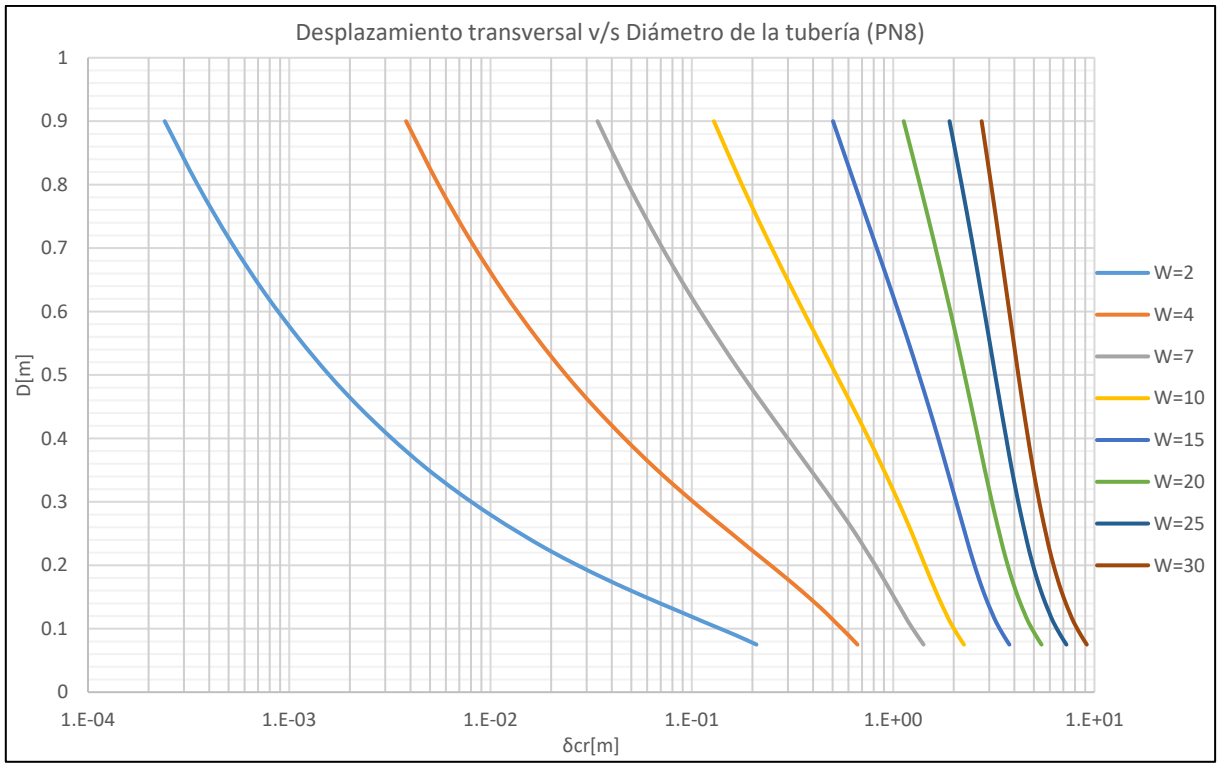


Gráfico 13-75: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena Fina.

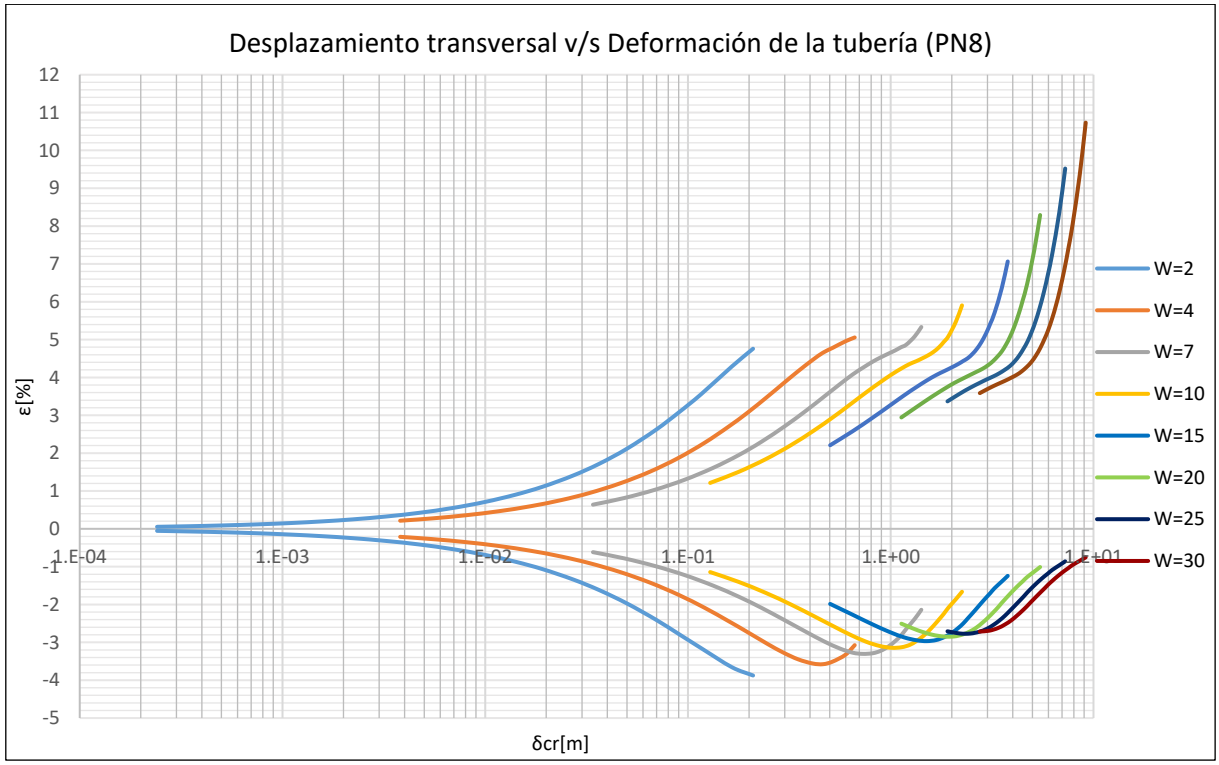


Gráfico 13-76: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena Fina.

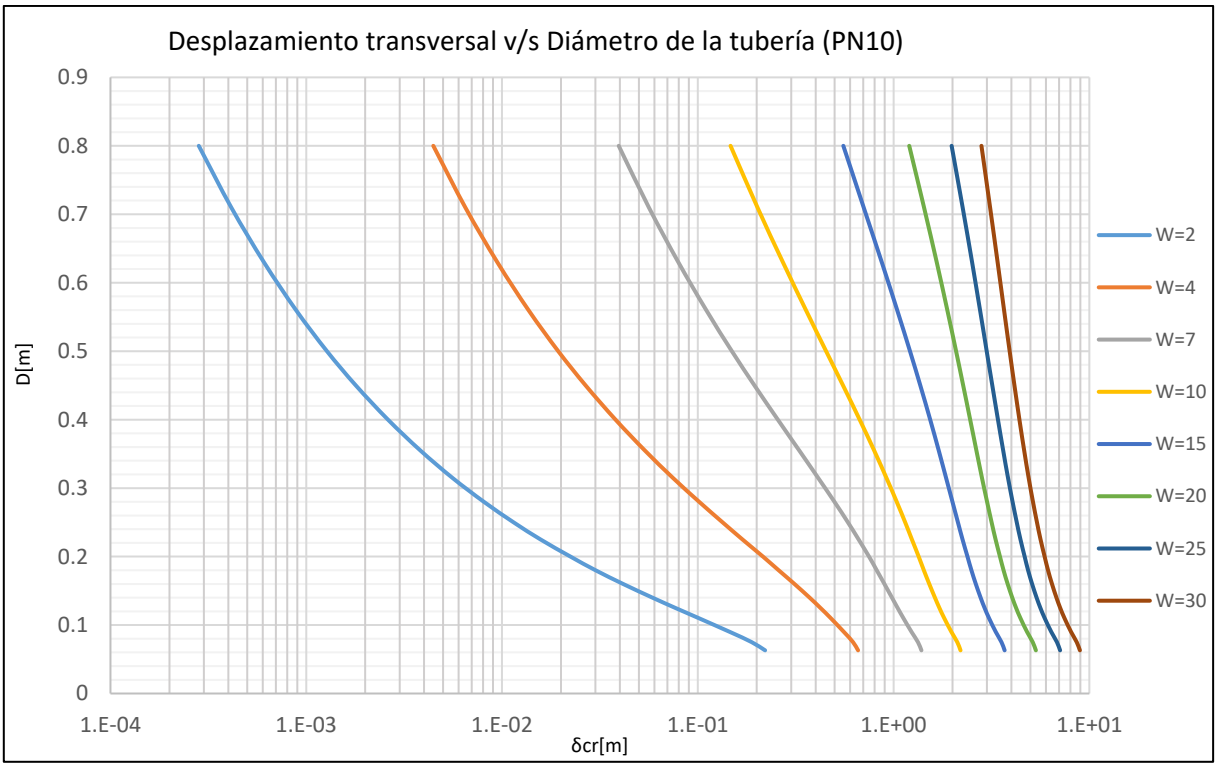


Gráfico 13-77: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena Fina.

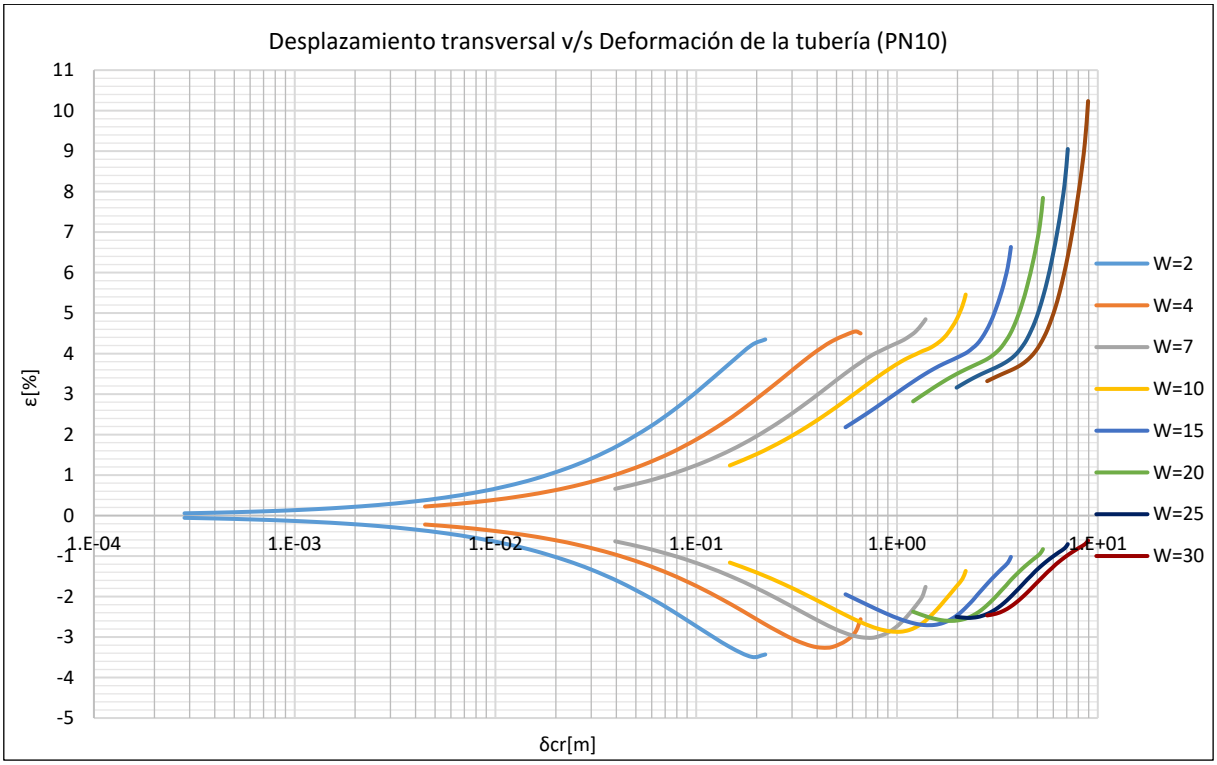


Gráfico 13-78: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena Fina.

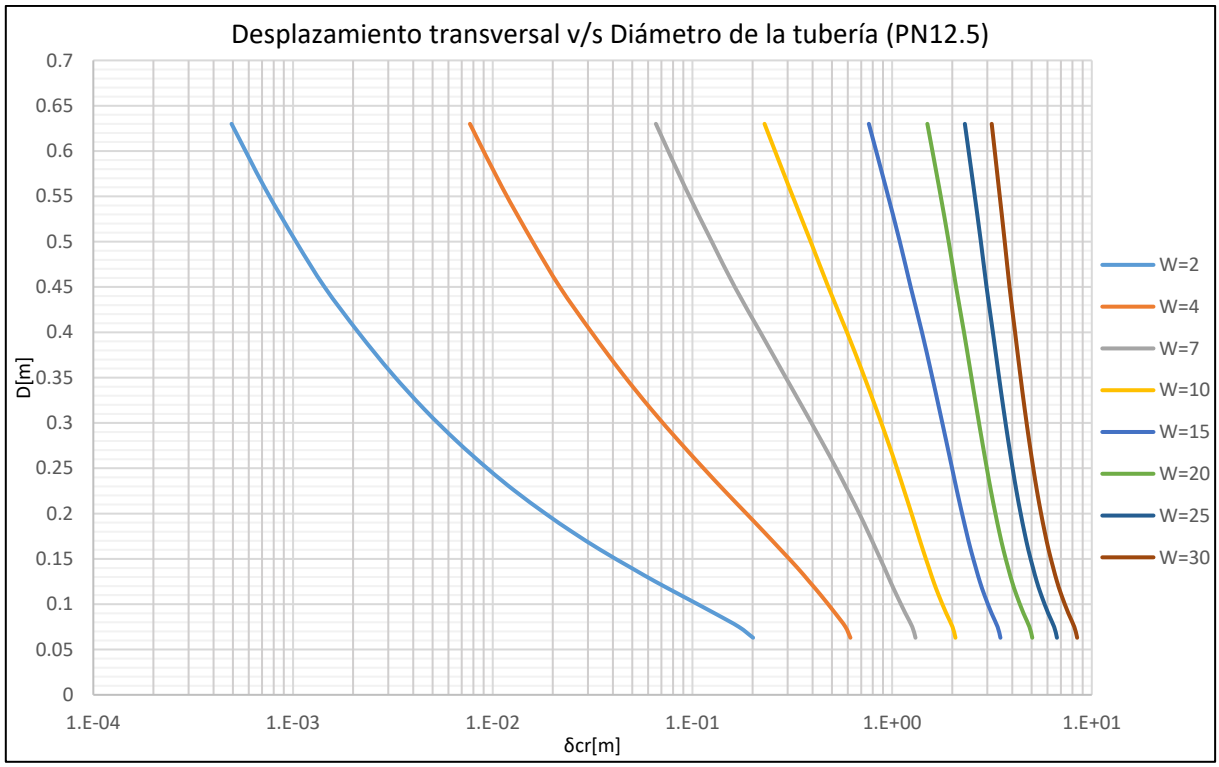


Gráfico 13-79: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena Fina.

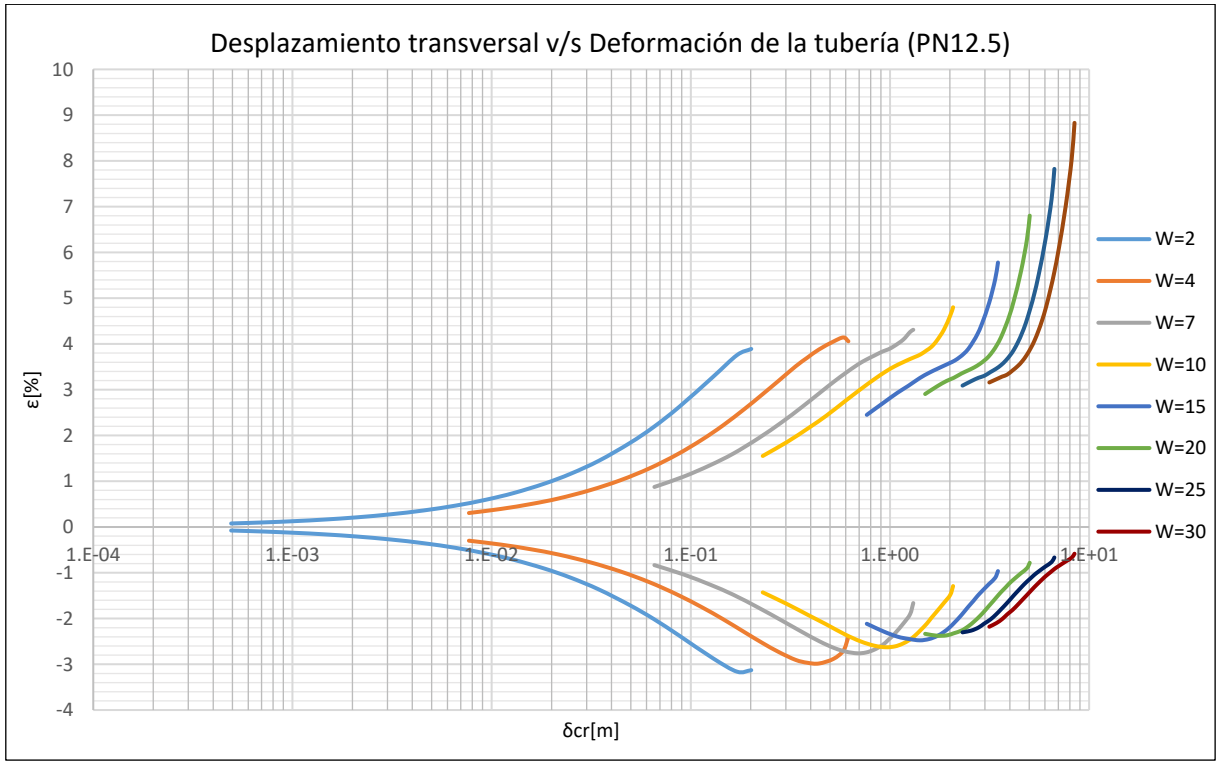


Gráfico 13-80: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena Fina.

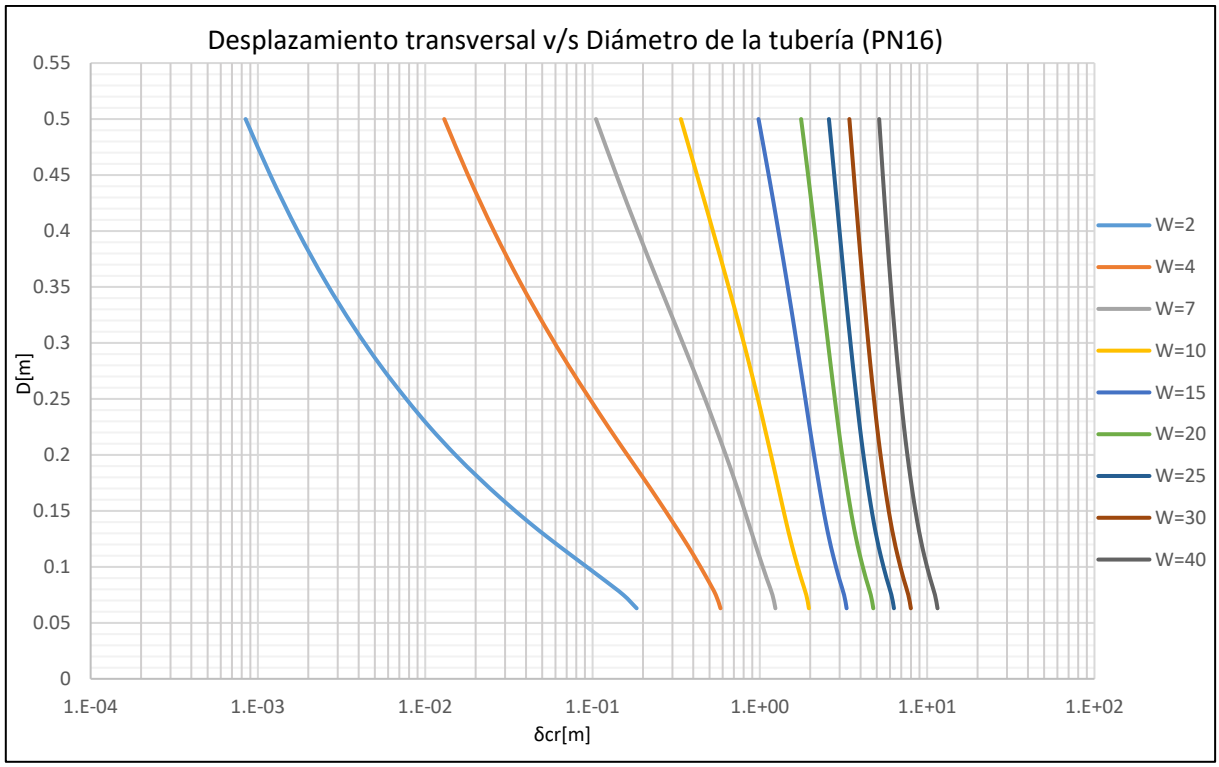


Gráfico 13-81: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena Fina.

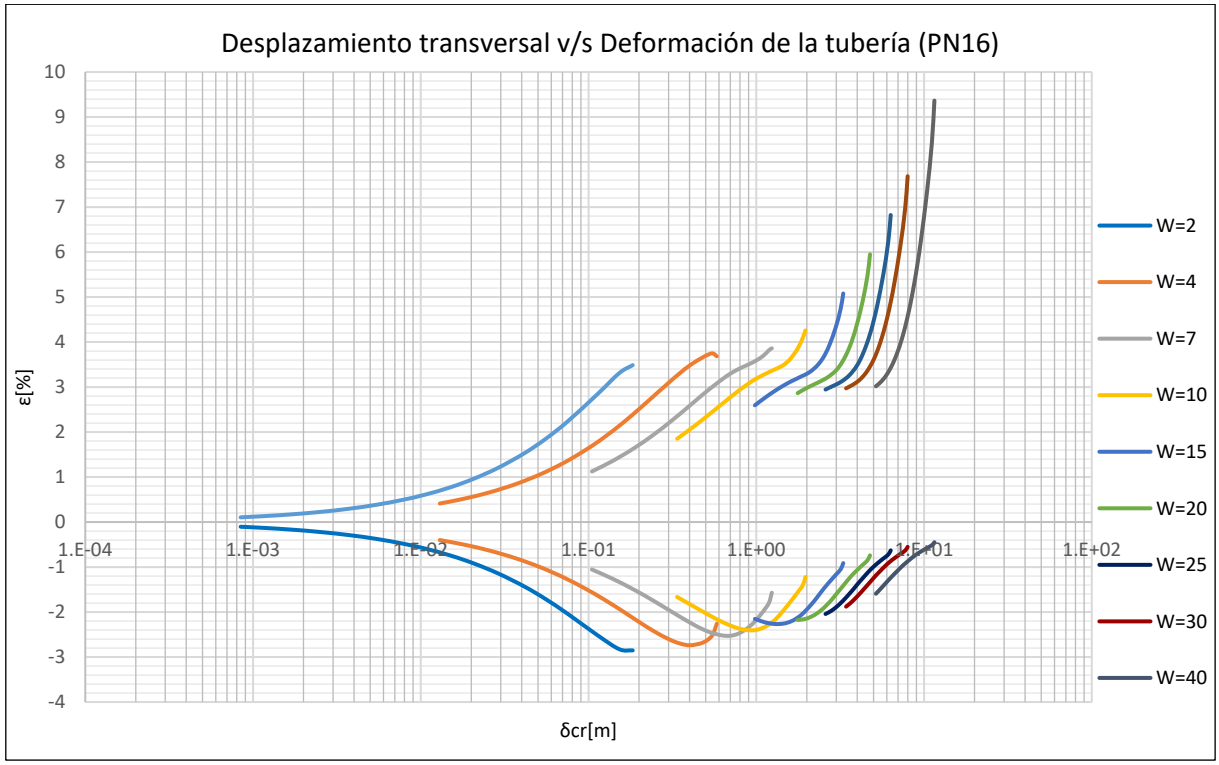


Gráfico 13-82: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

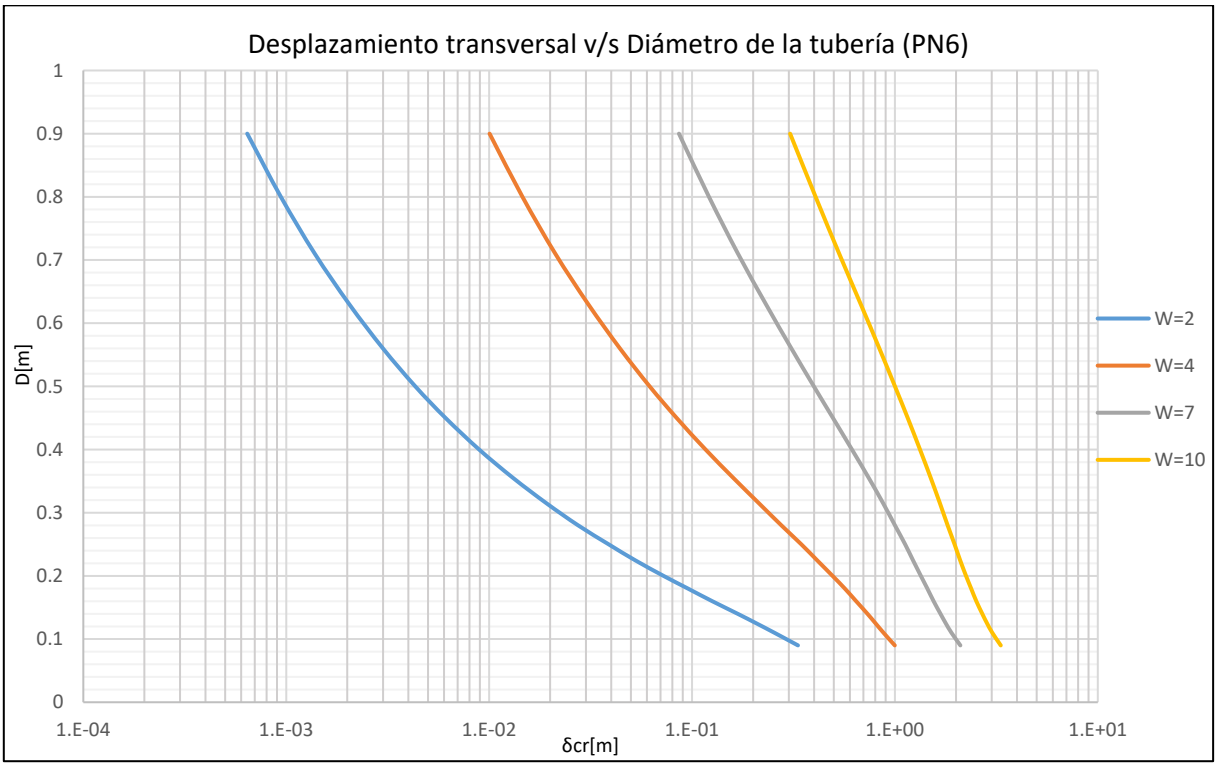


Gráfico 13-83: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena gruesa.

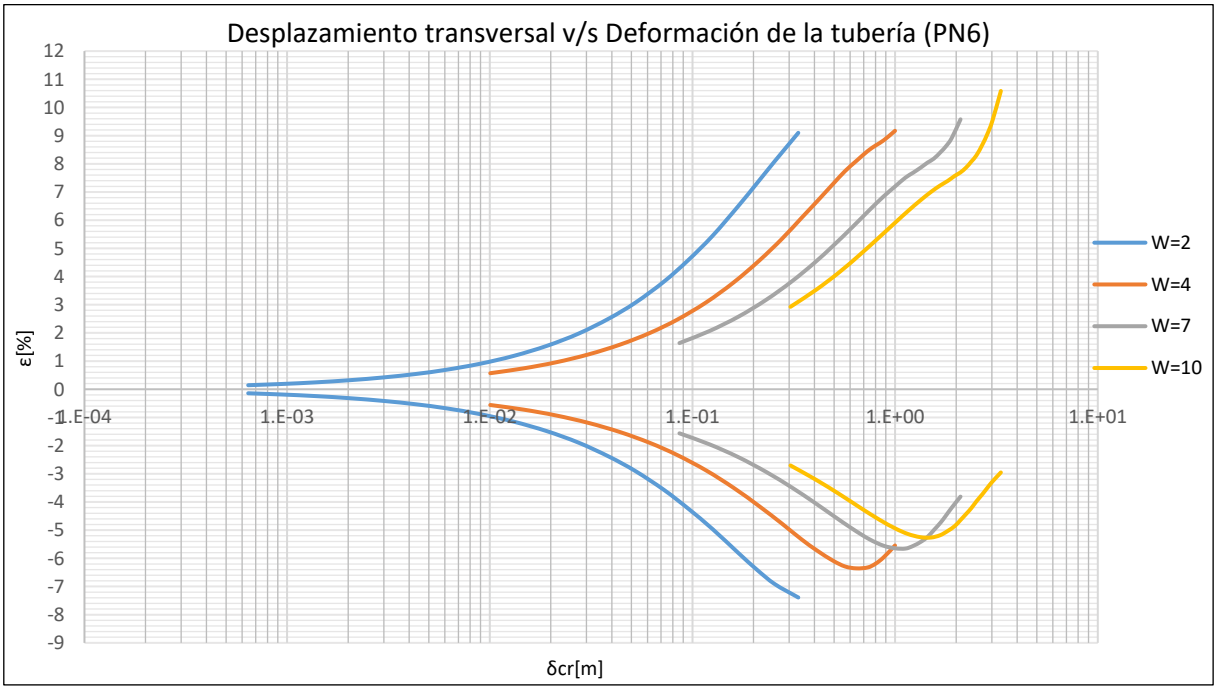


Gráfico 13-84: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena gruesa.

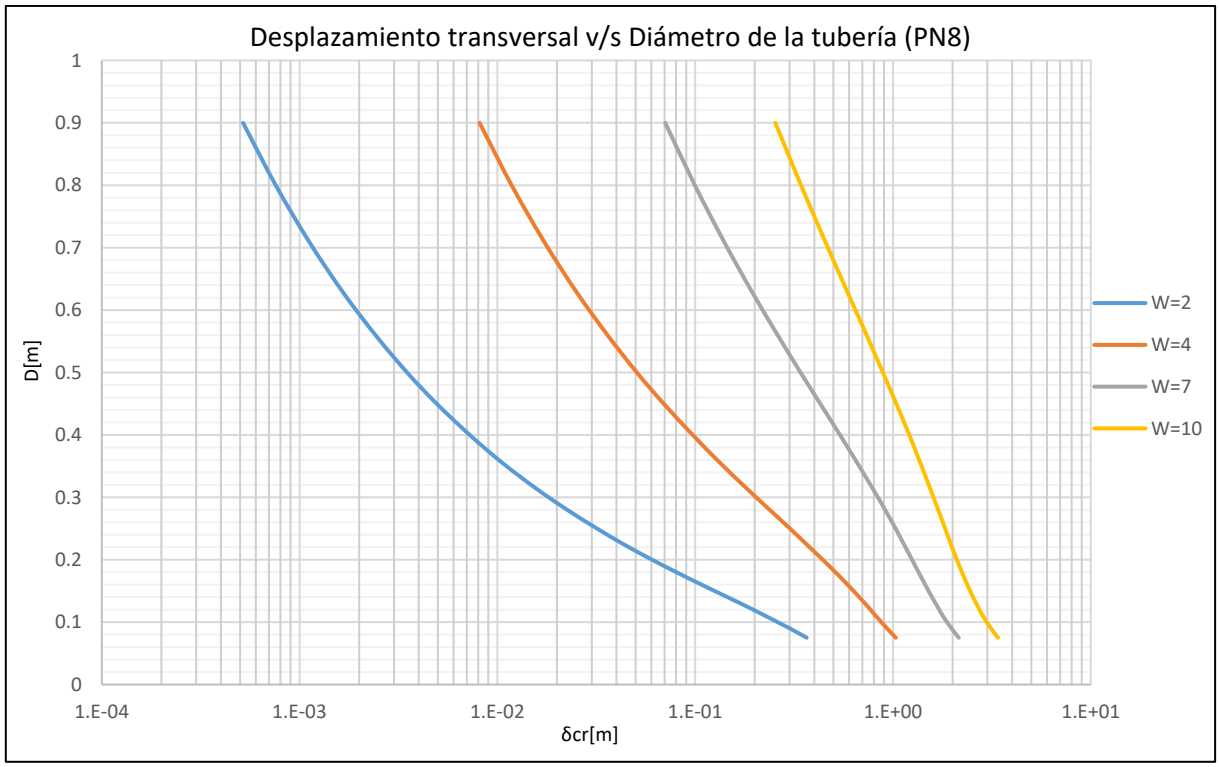


Gráfico 13-85: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena gruesa.

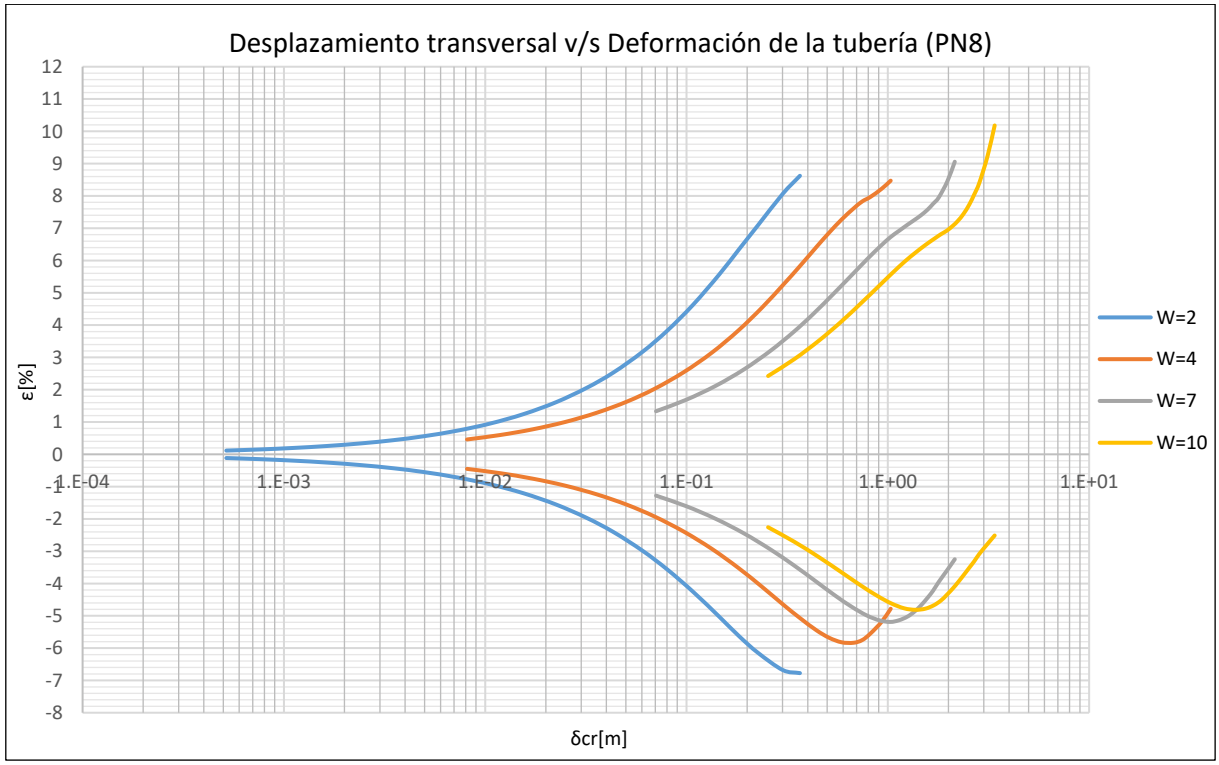


Gráfico 13-86: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena gruesa..

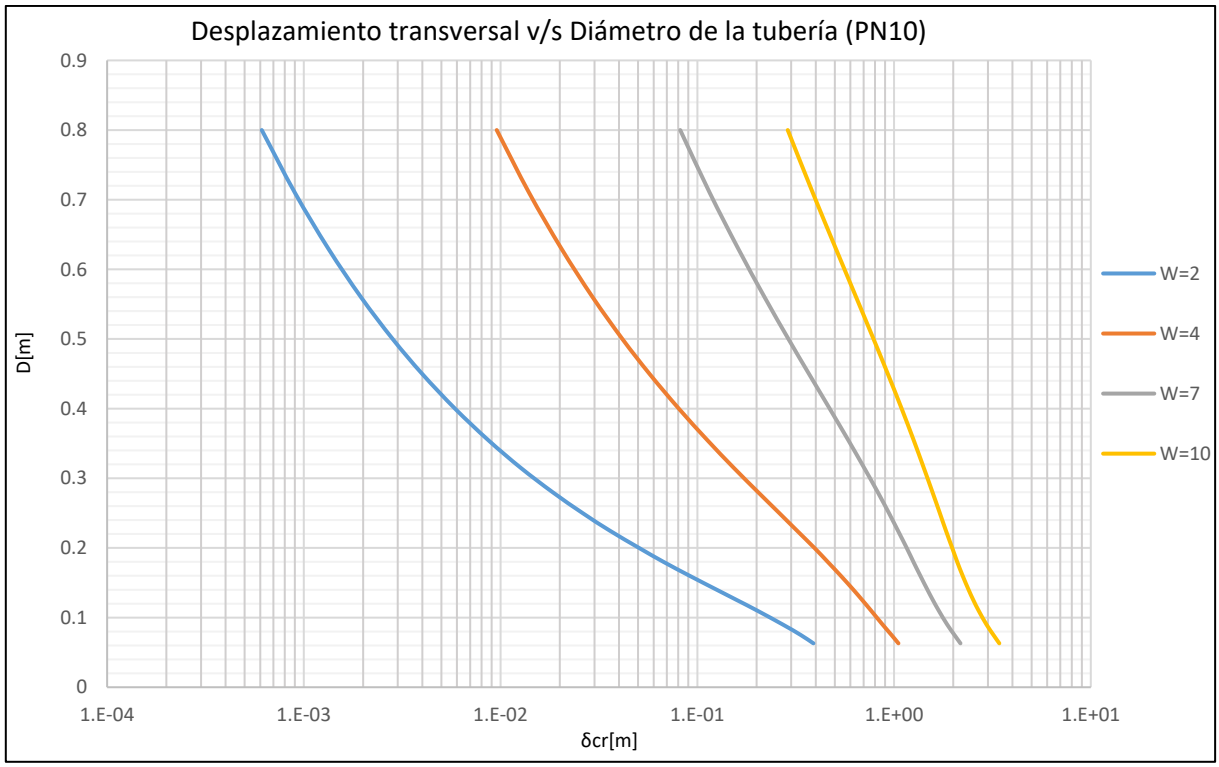


Gráfico 13-87: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena gruesa.

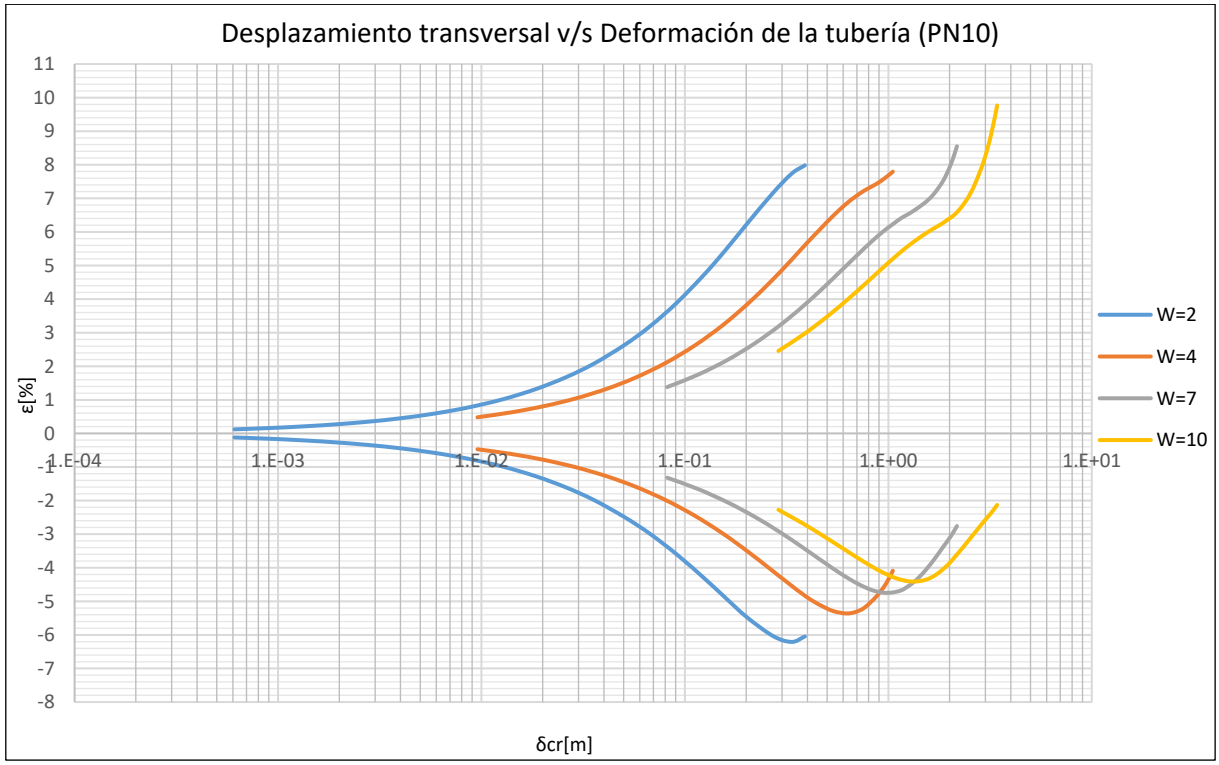


Gráfico 13-88: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena gruesa.

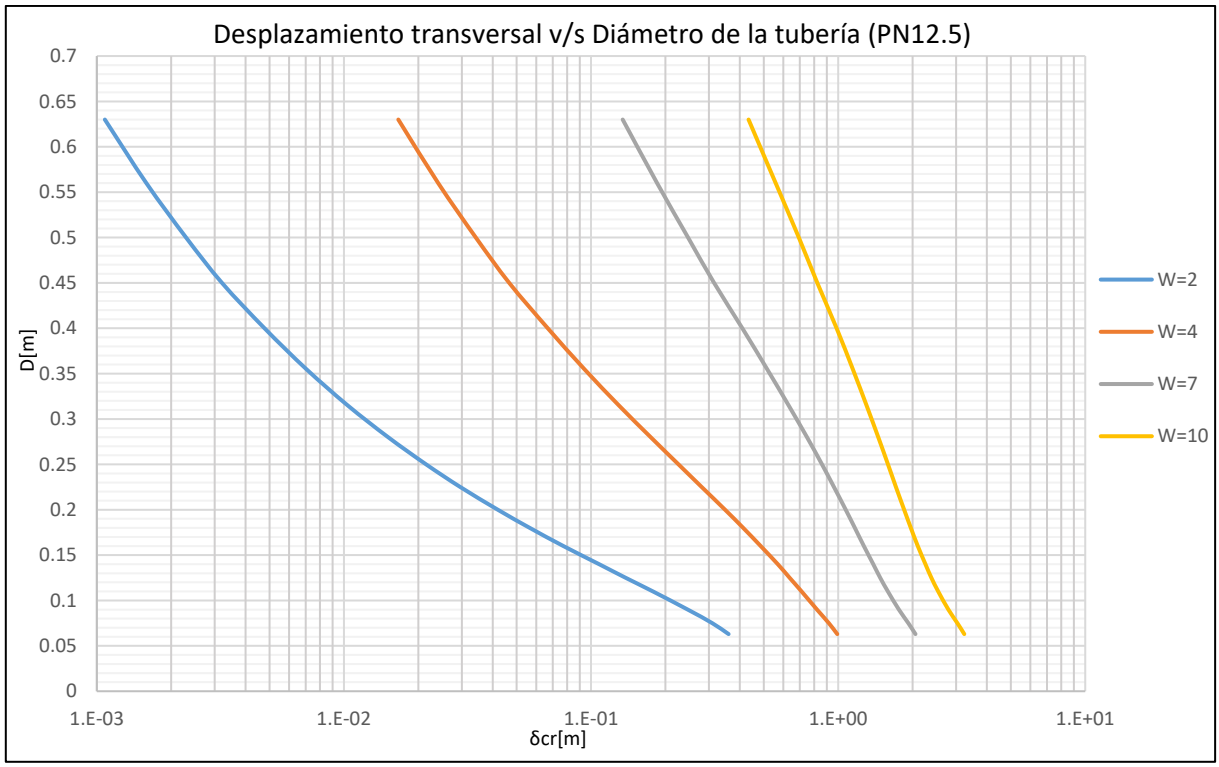


Gráfico 13-89: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena gruesa.

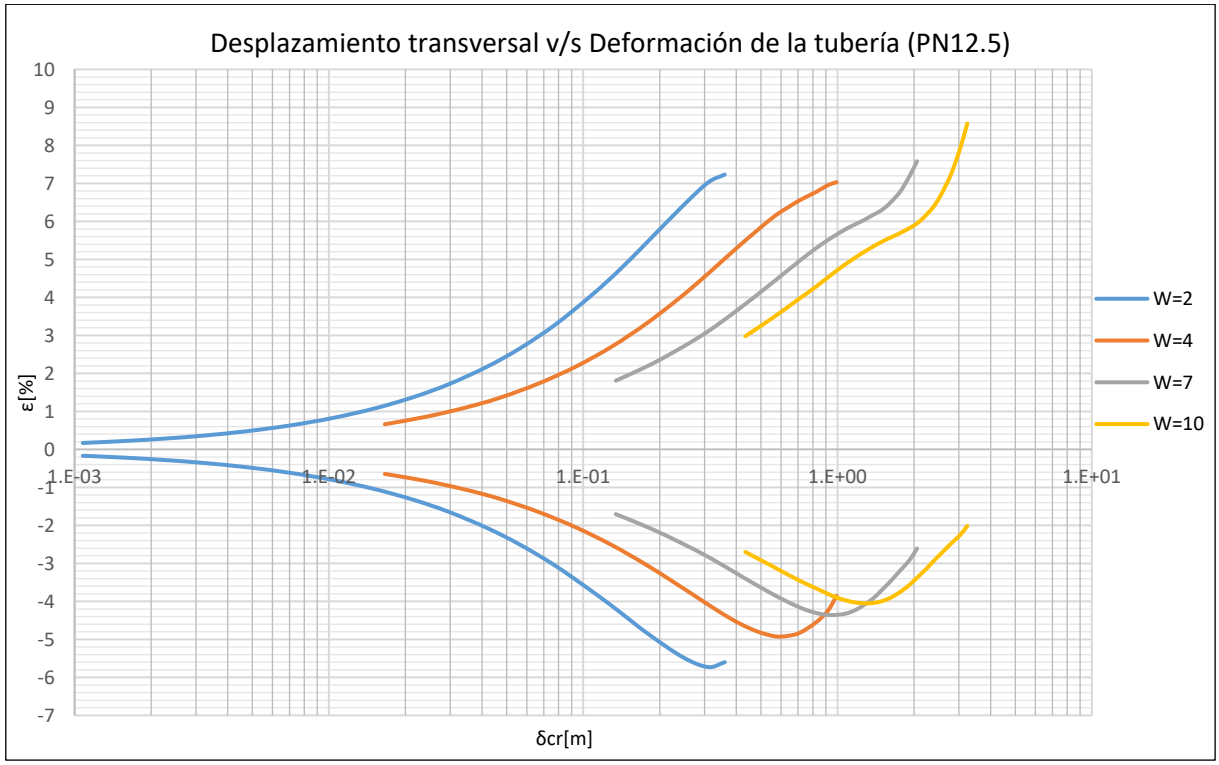


Gráfico 13-90: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena gruesa.

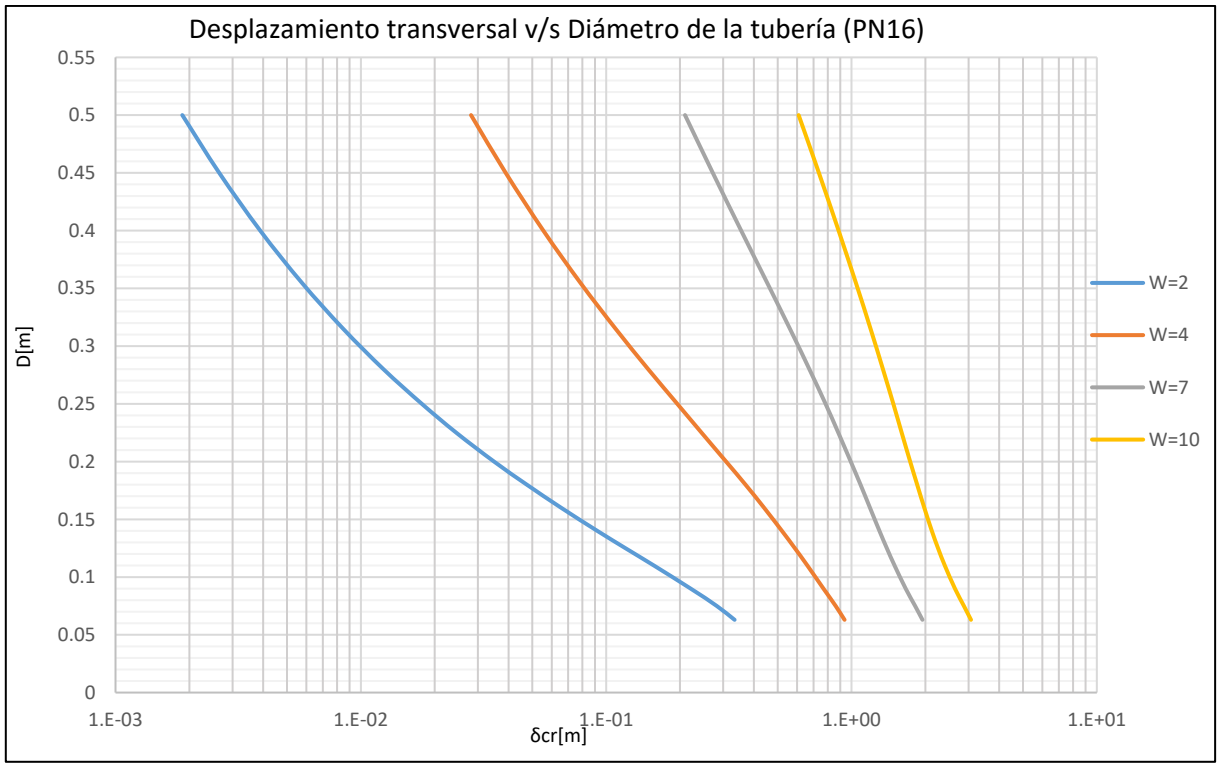


Gráfico 13-91: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena gruesa.

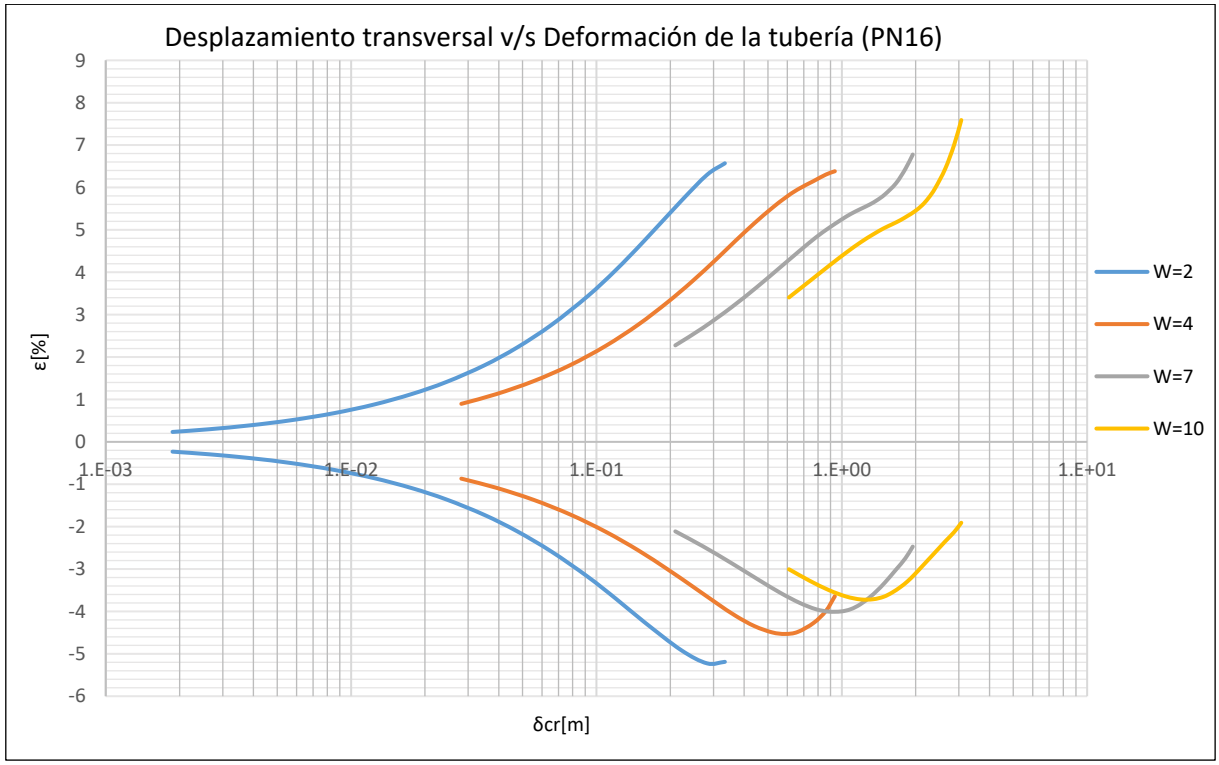


Gráfico 13-92: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

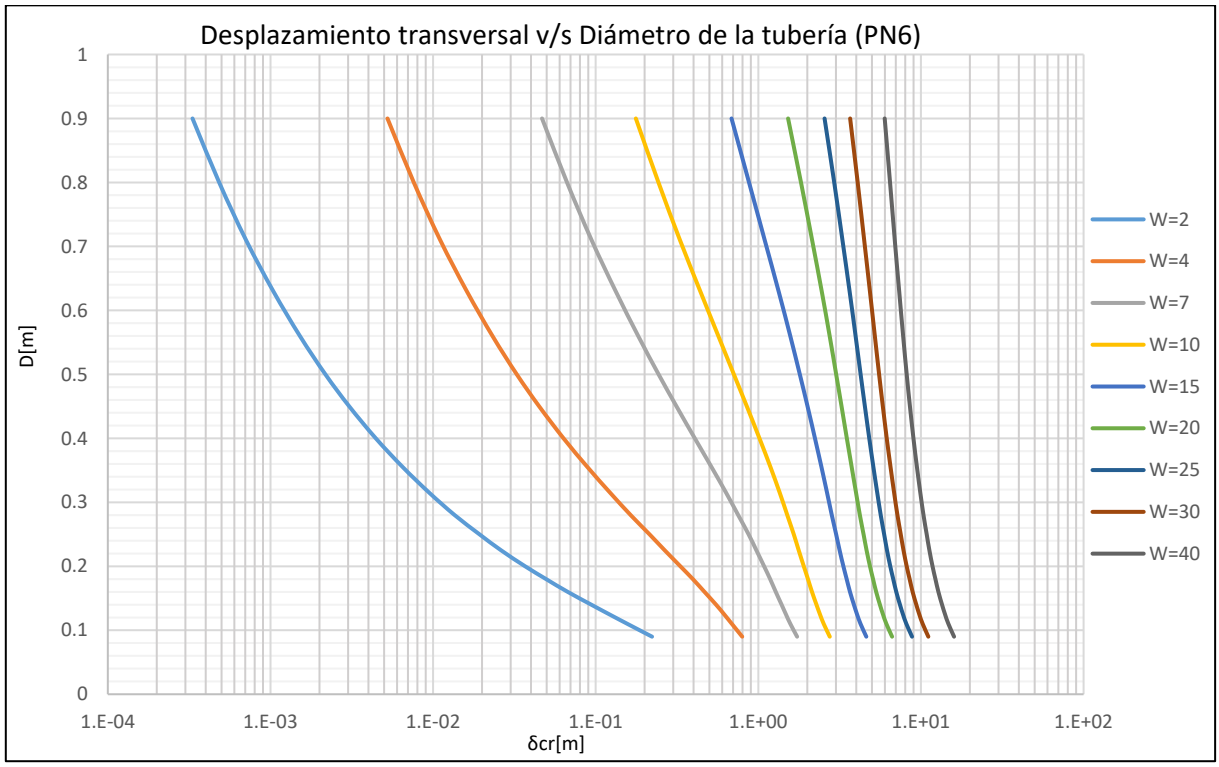


Gráfico 13-93: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

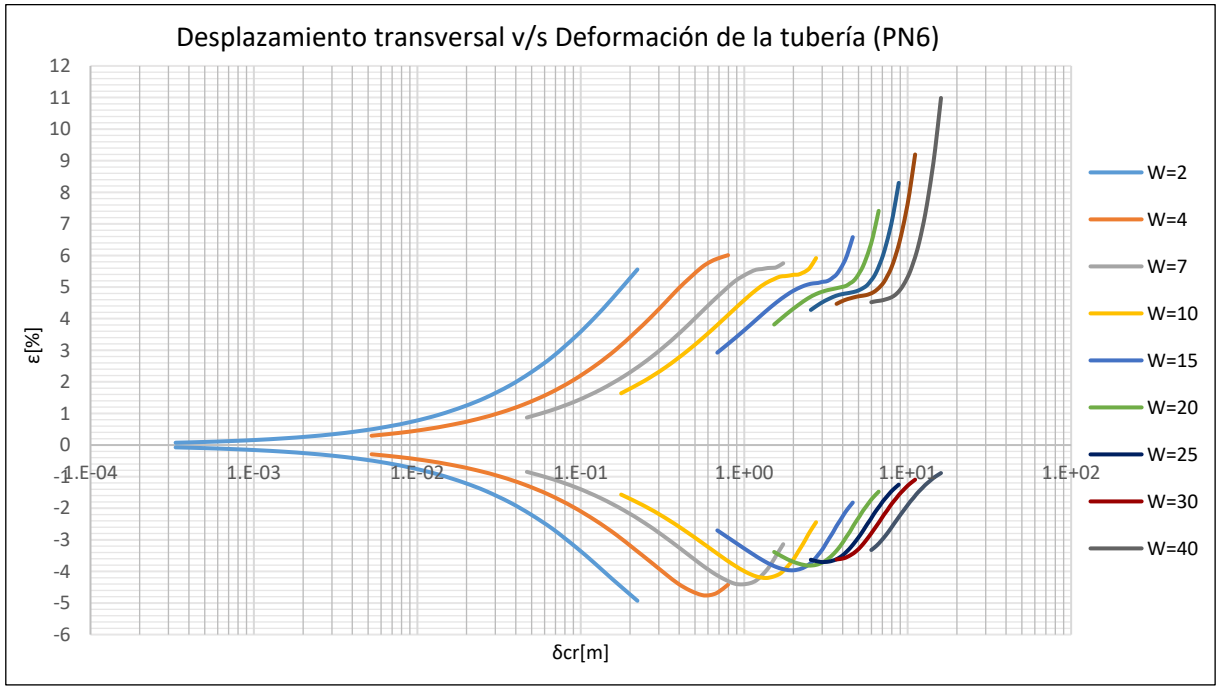


Gráfico 13-94: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

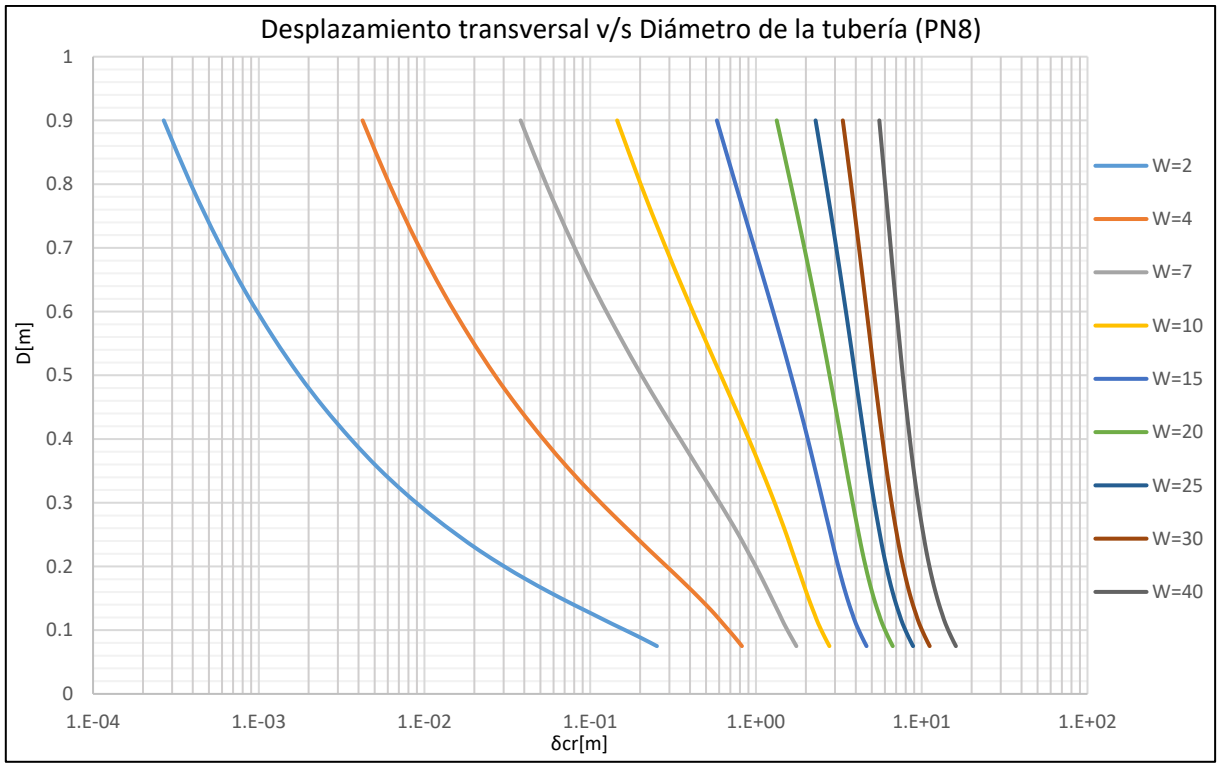


Gráfico 13-95: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN8, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

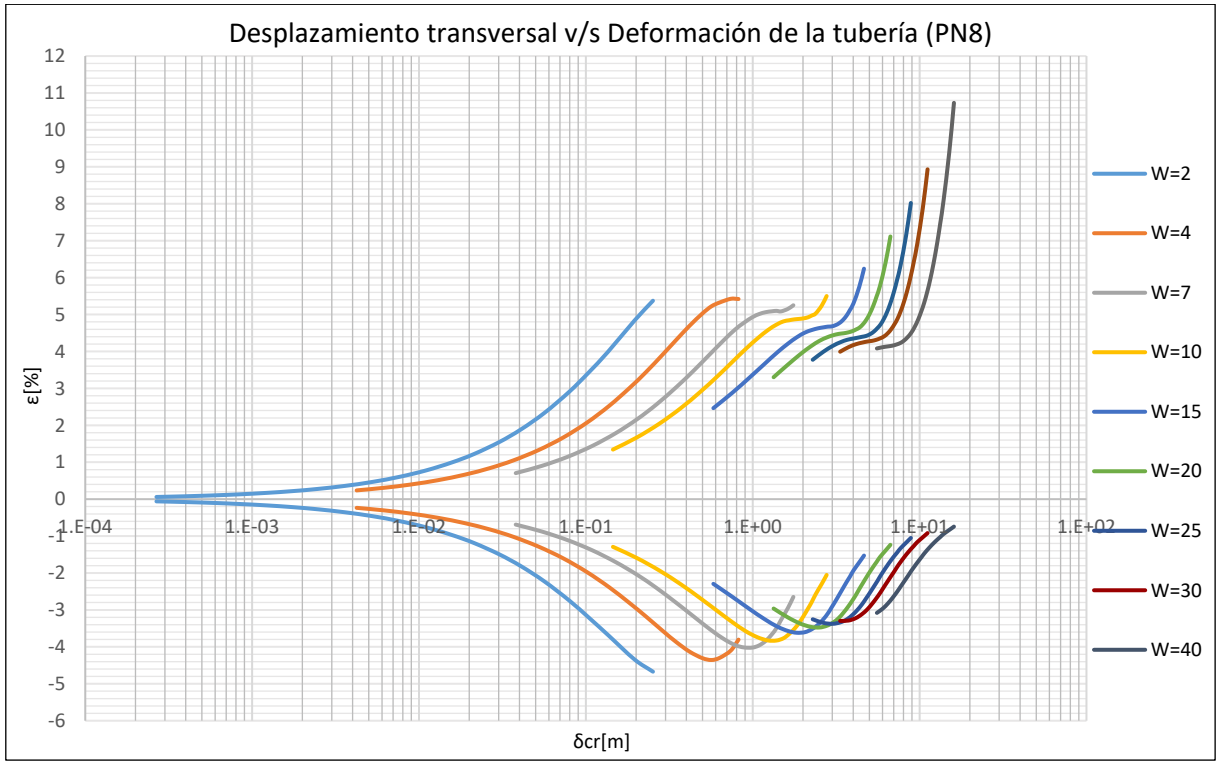


Gráfico 13-96: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN8, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

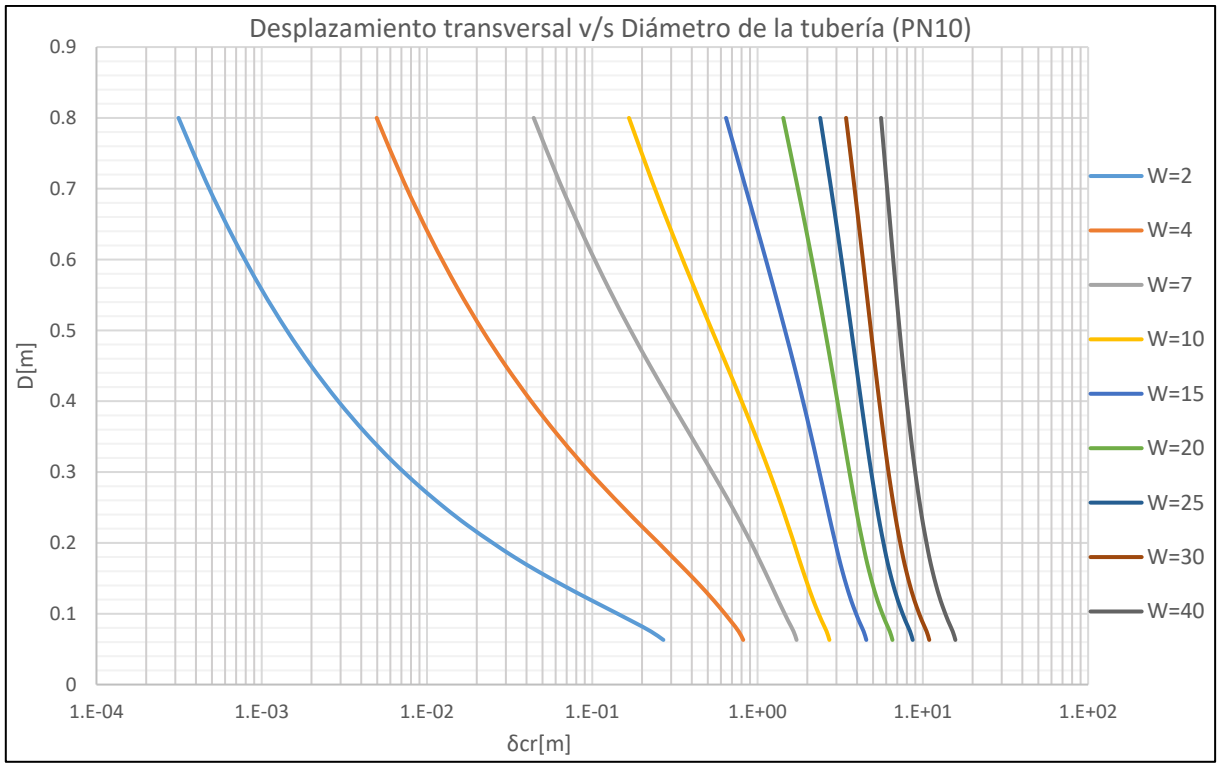


Gráfico 13-97: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

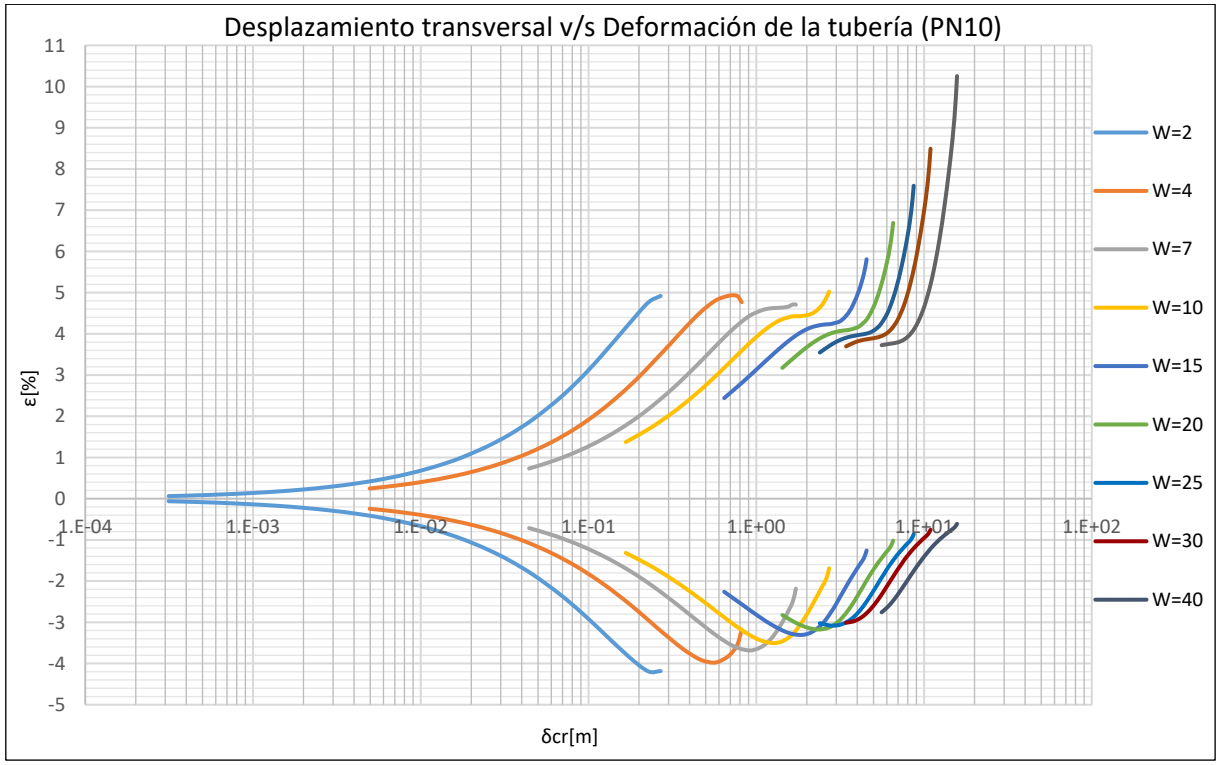


Gráfico 13-98: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

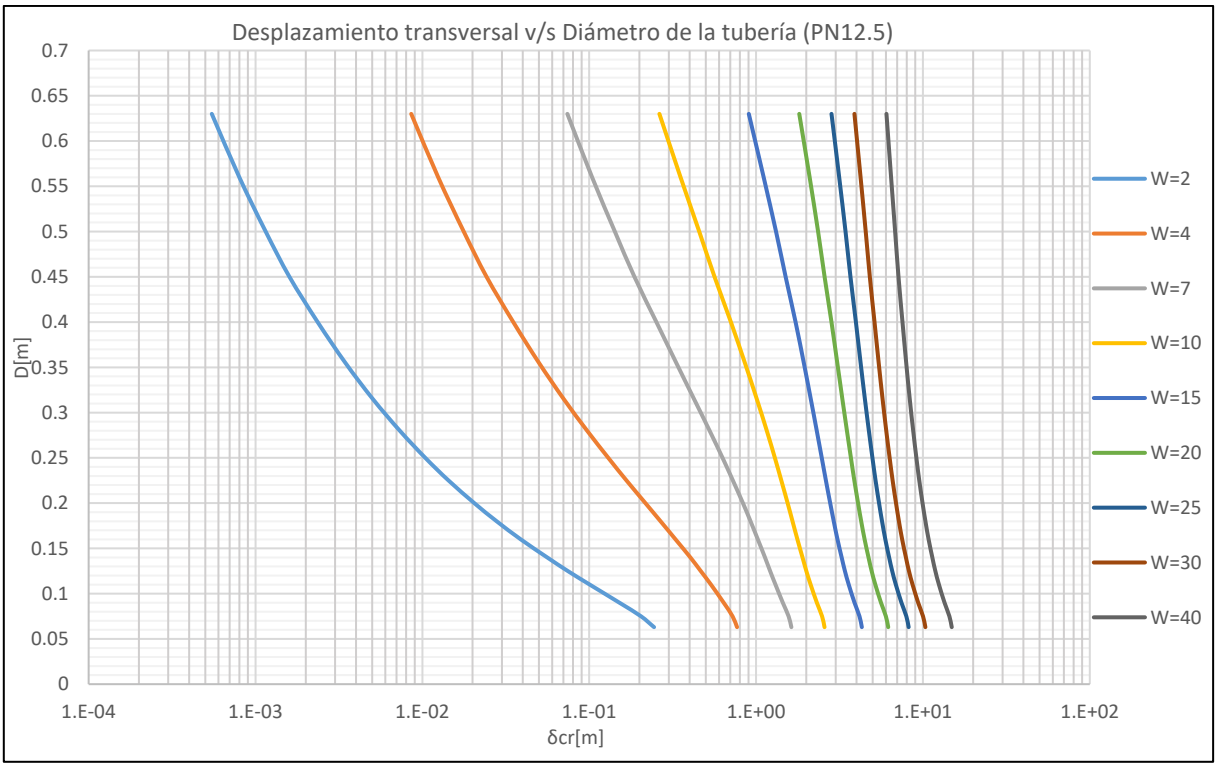


Gráfico 13-99: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

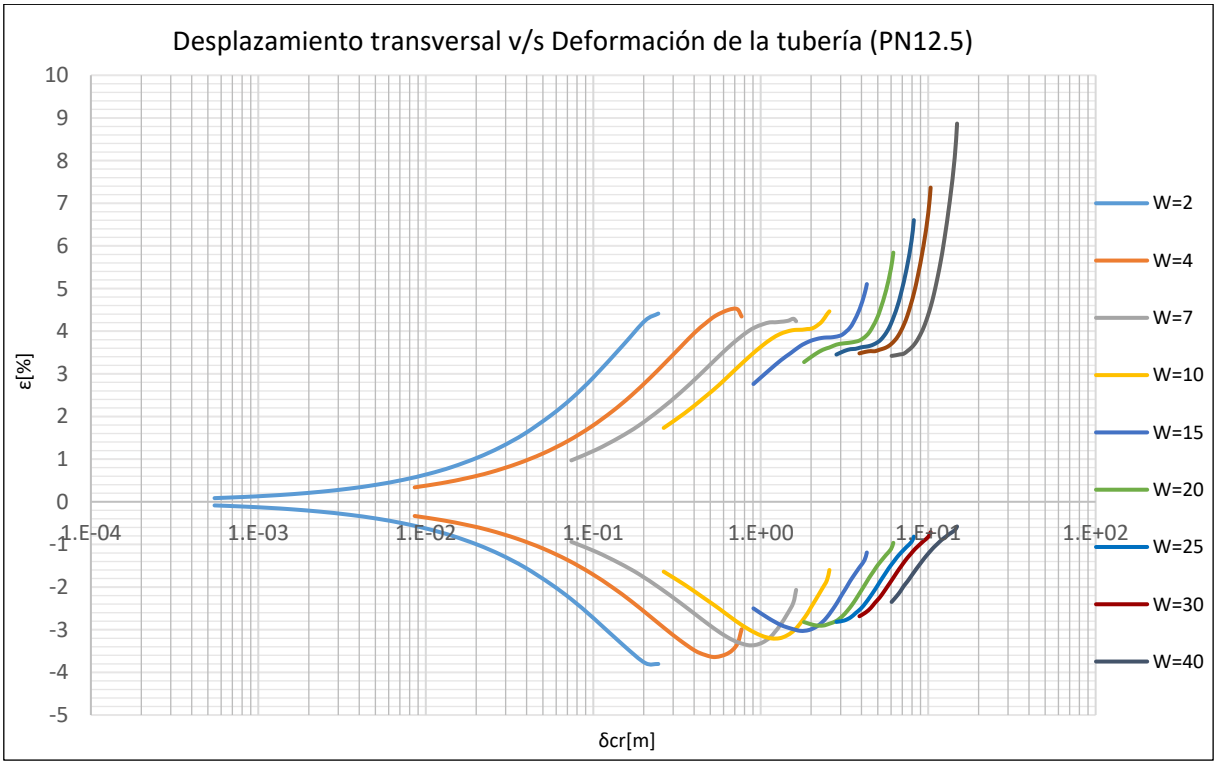


Gráfico 13-100: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

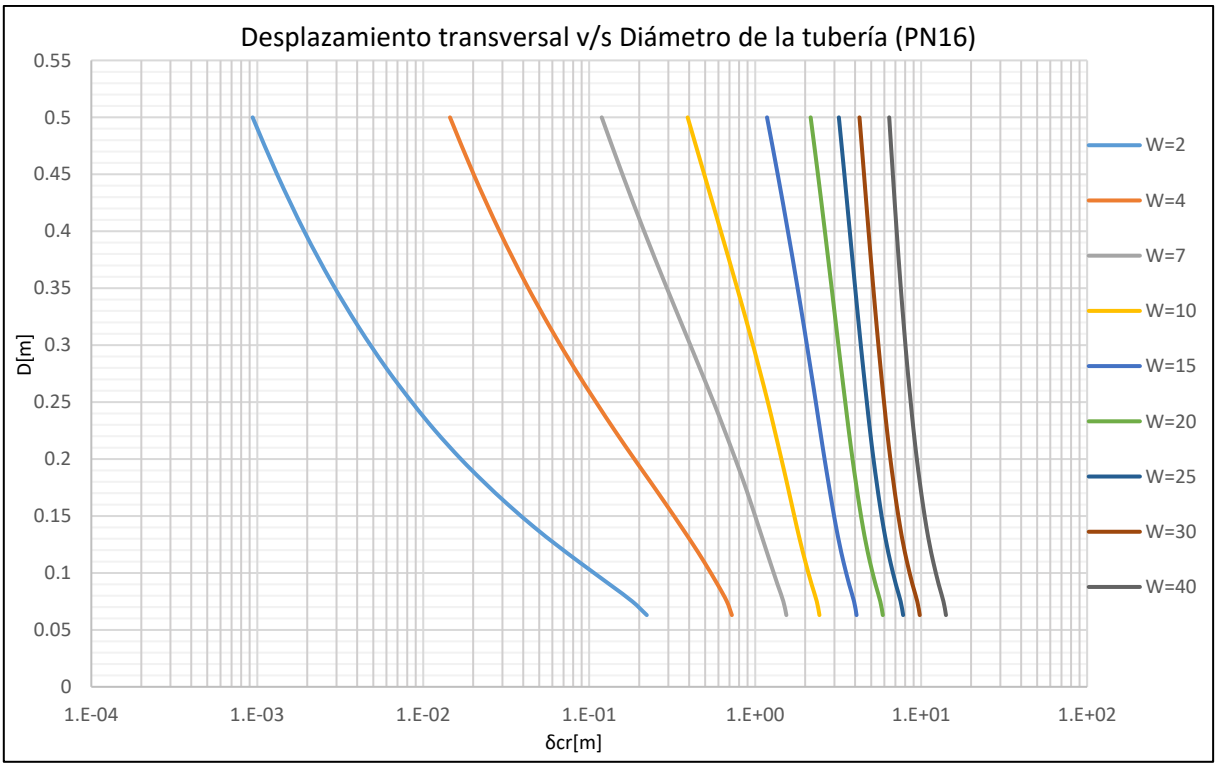


Gráfico 13-101: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

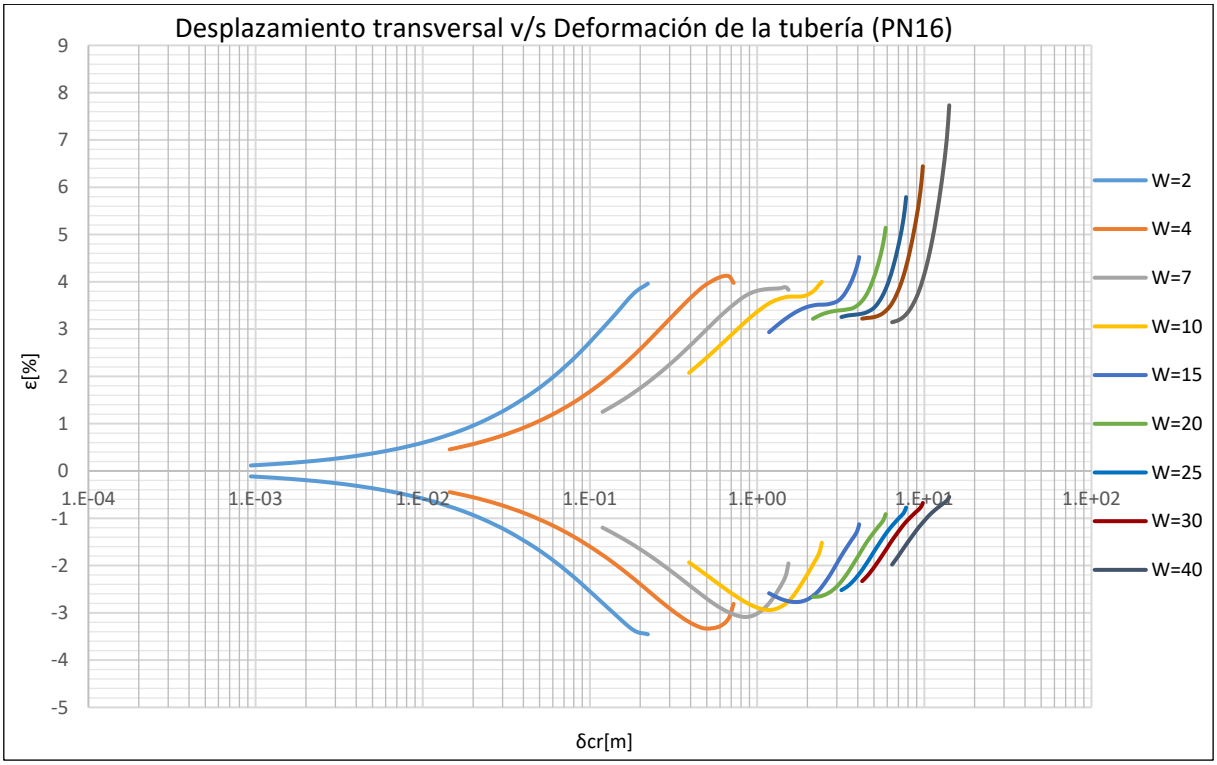


Gráfico 13-102: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE80 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso Baja Plasticidad.

k.2.2. Tuberías de densidad PE100

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

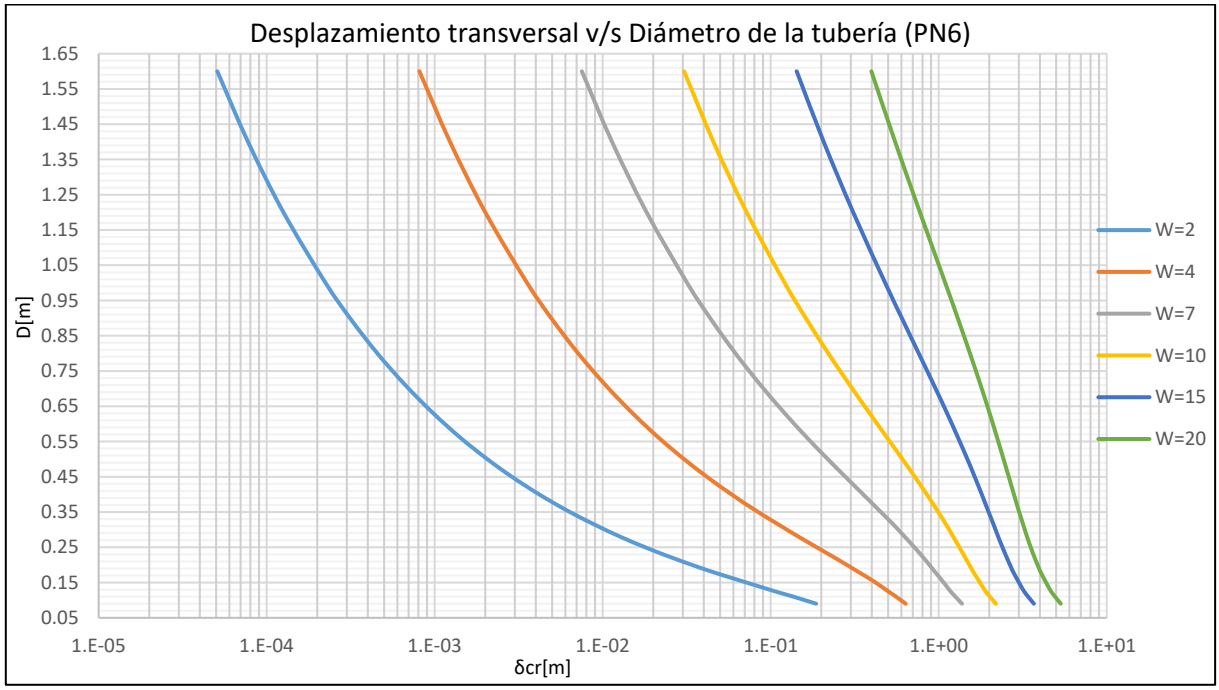


Gráfico 13-103: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena Fina.

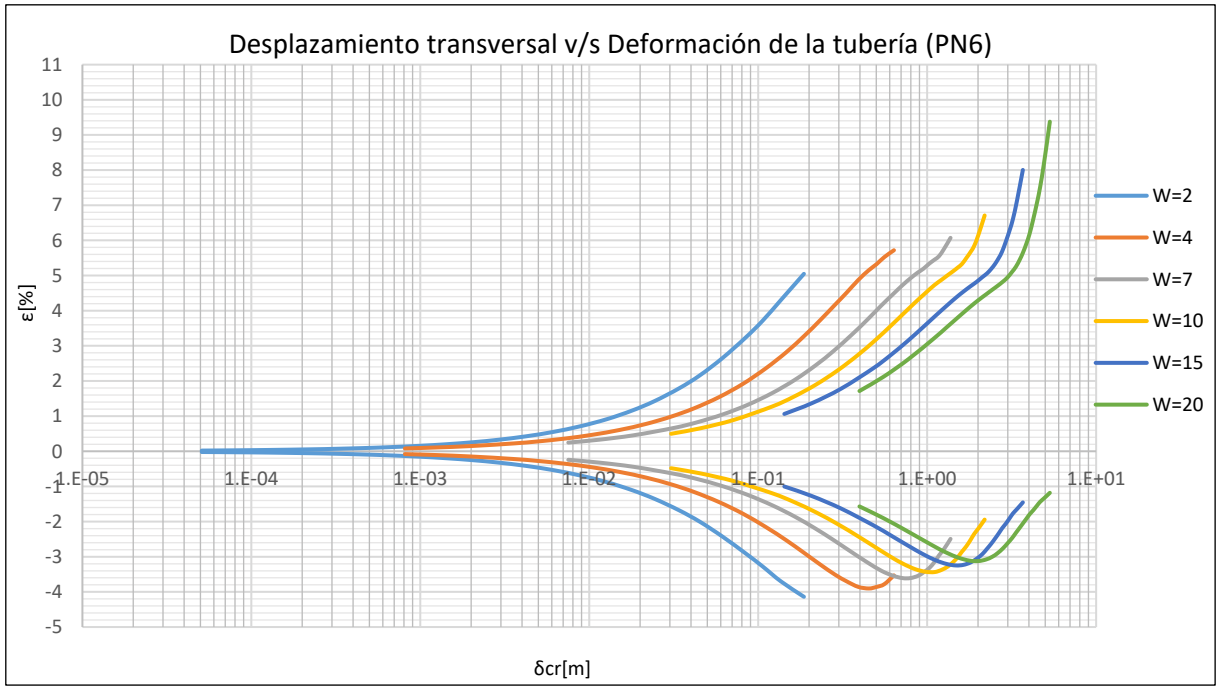


Gráfico 13-104: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena Fina.

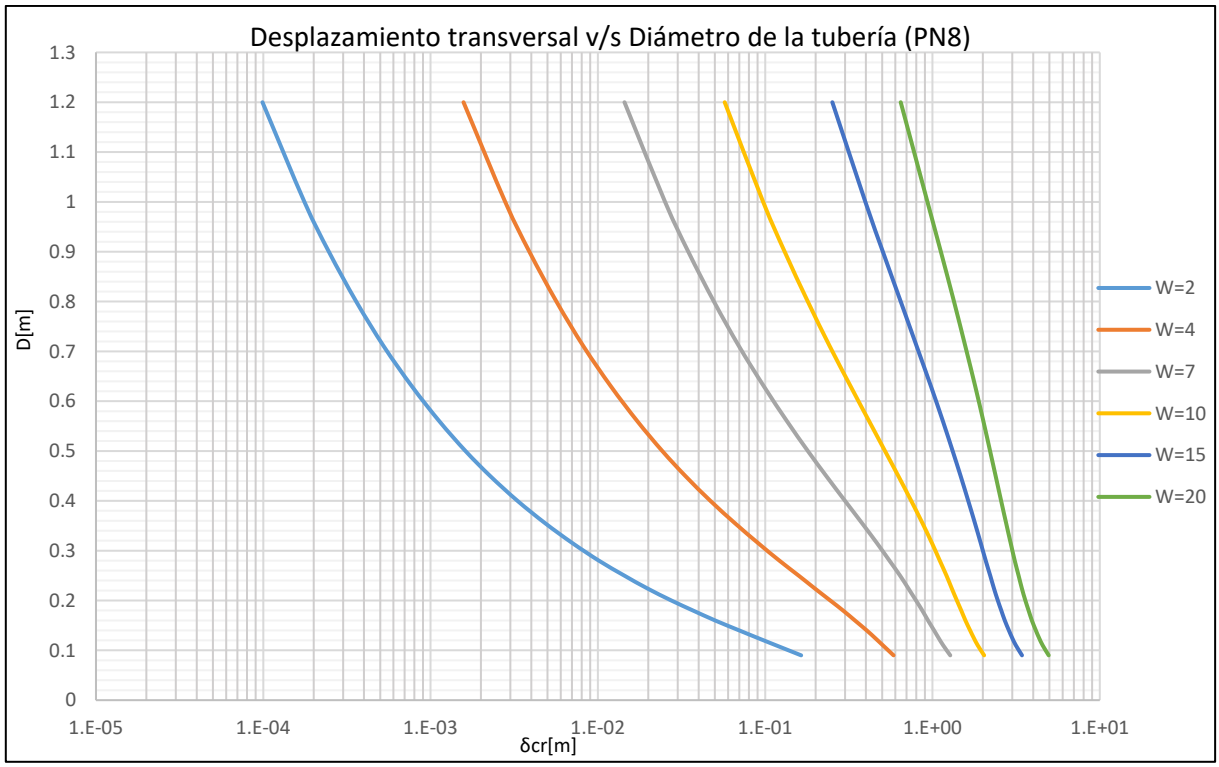


Gráfico 13-105: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena Fina.

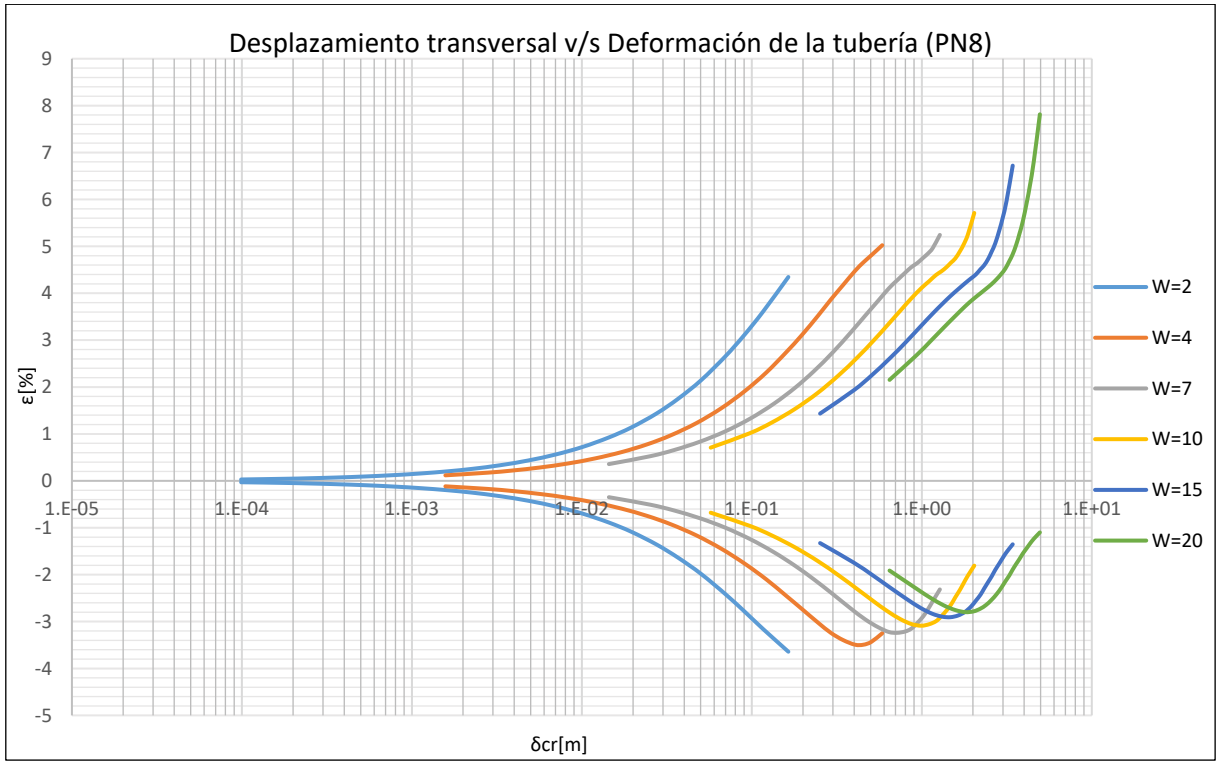


Gráfico 13-106: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena Fina.

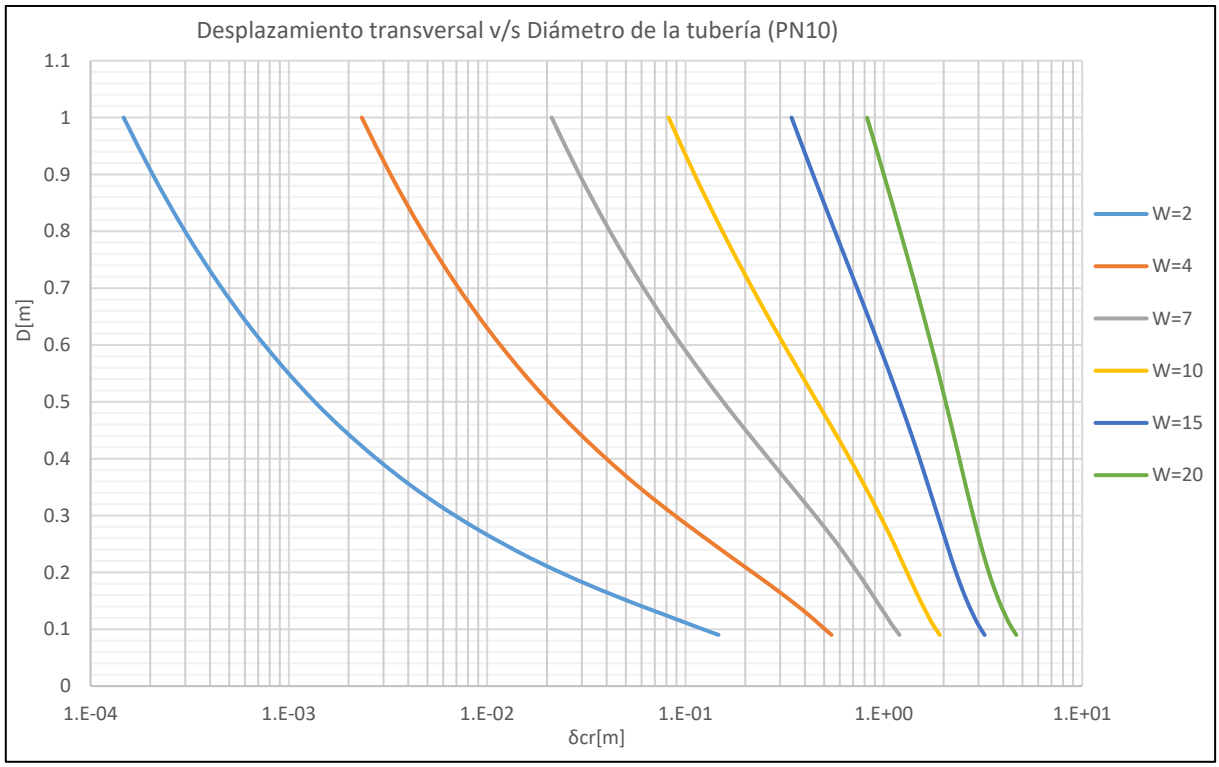


Gráfico 13-107: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena Fina.

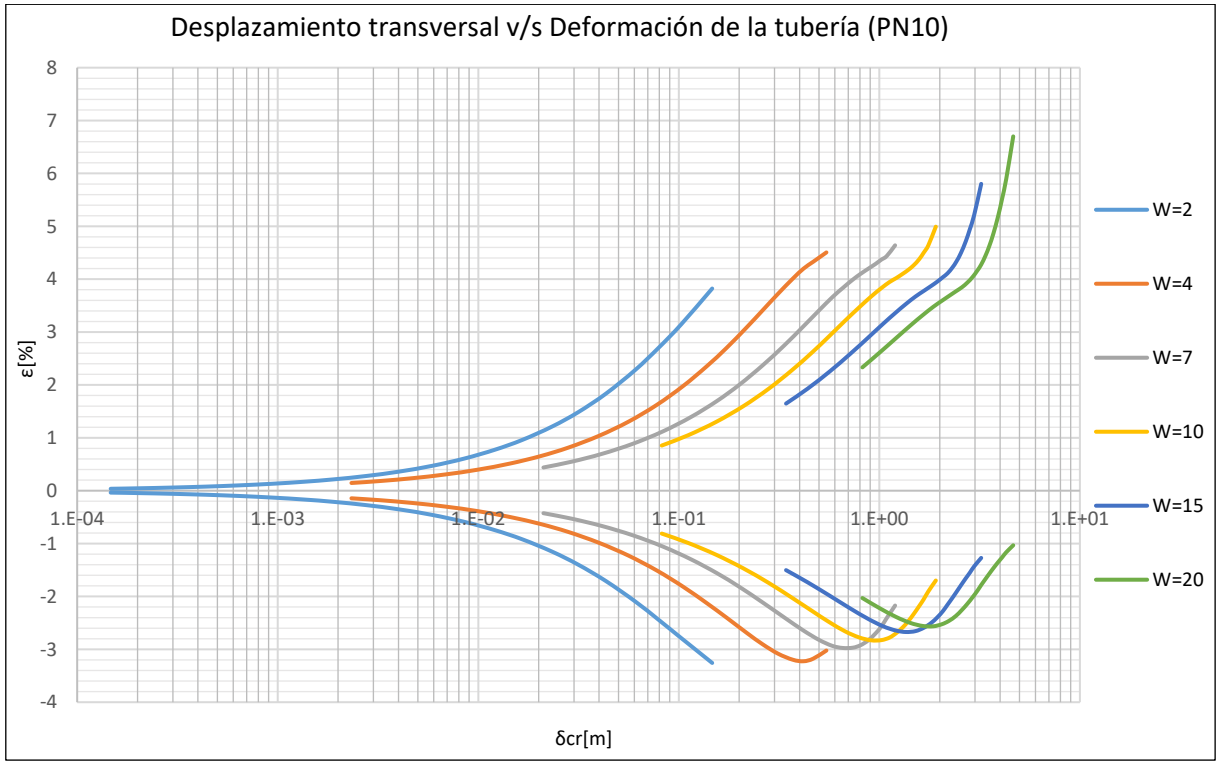


Gráfico 13-108: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena Fin.

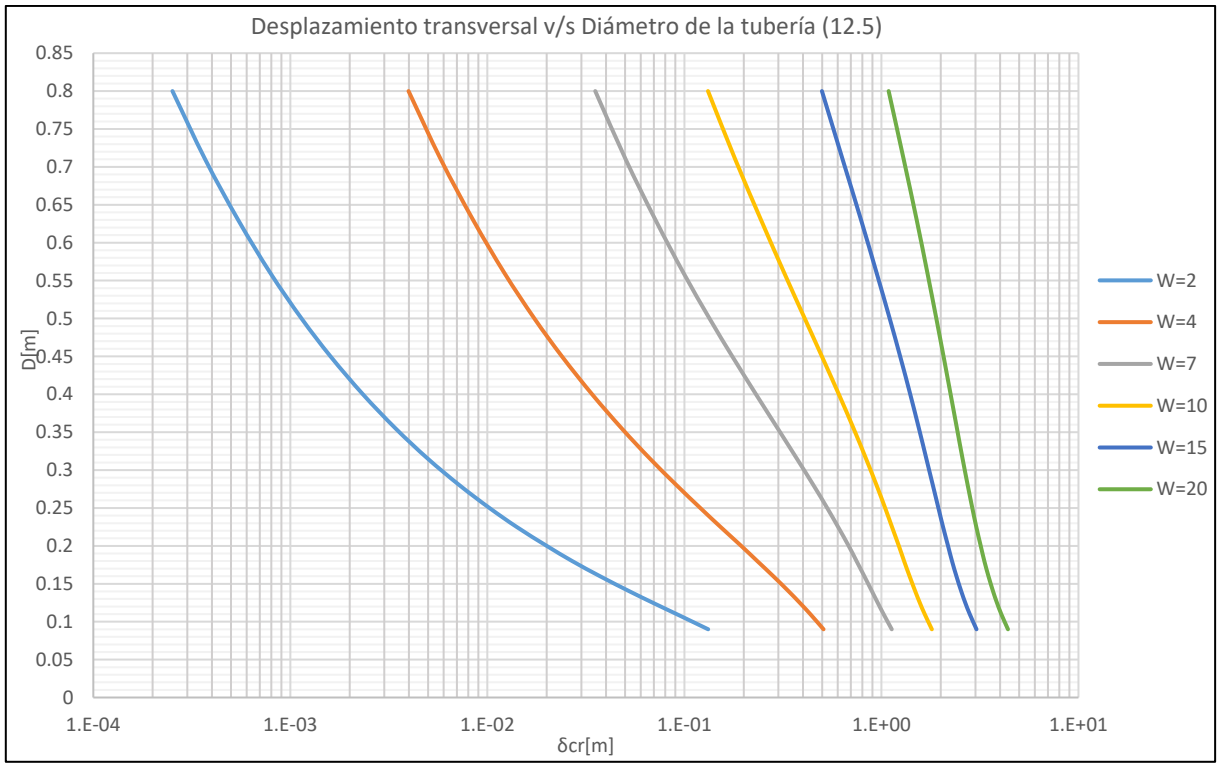


Gráfico 13-109: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena Fina.

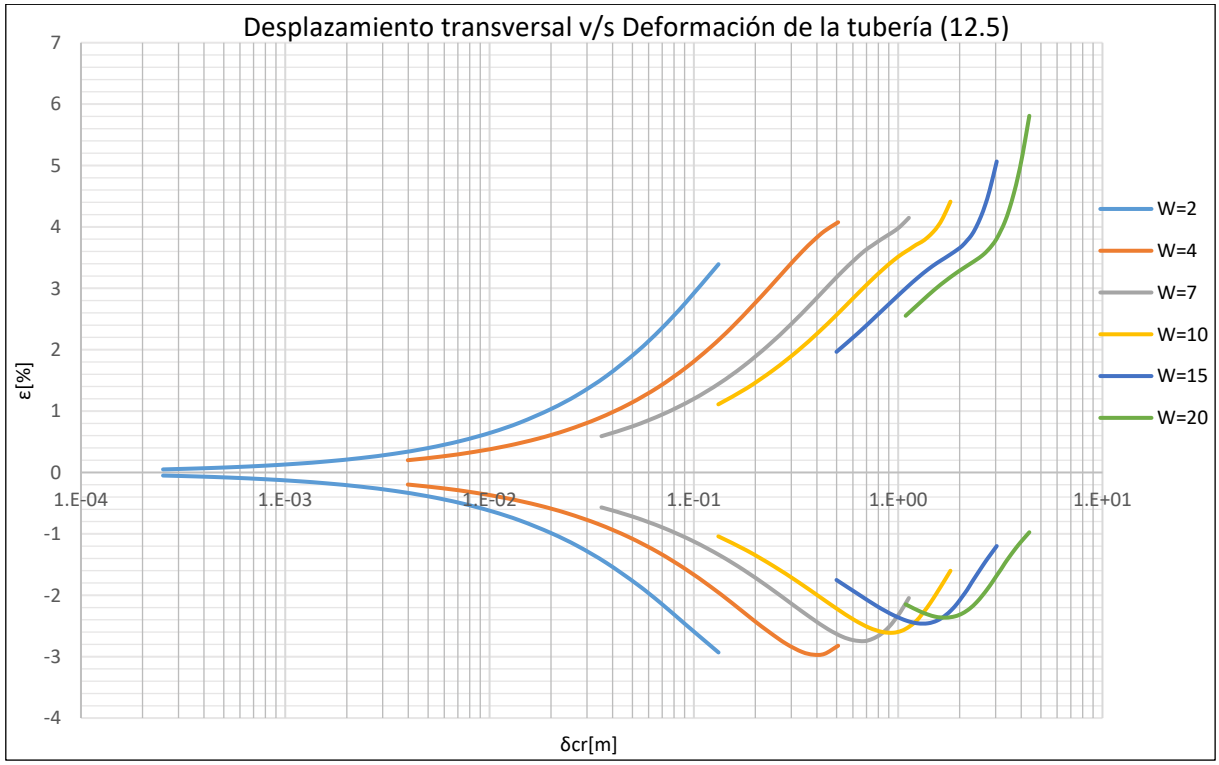


Gráfico 13-110: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena Fina.

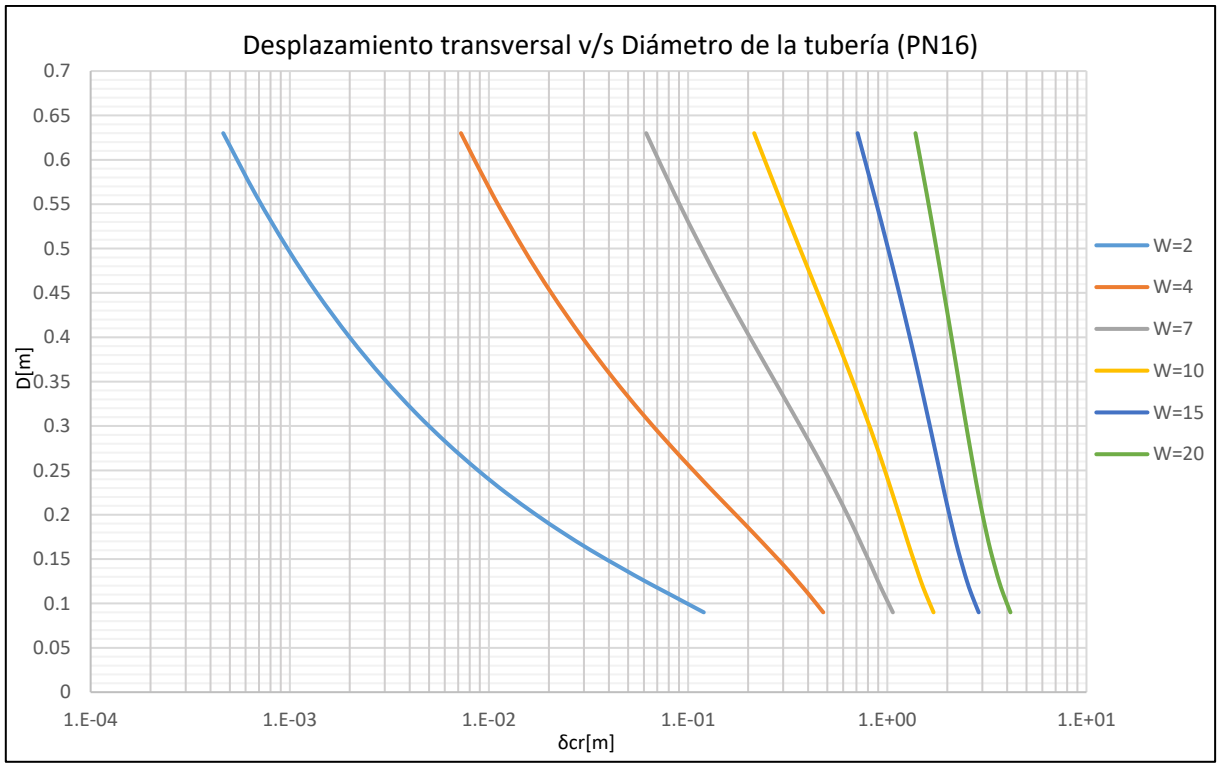


Gráfico 13-111: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena Fina.

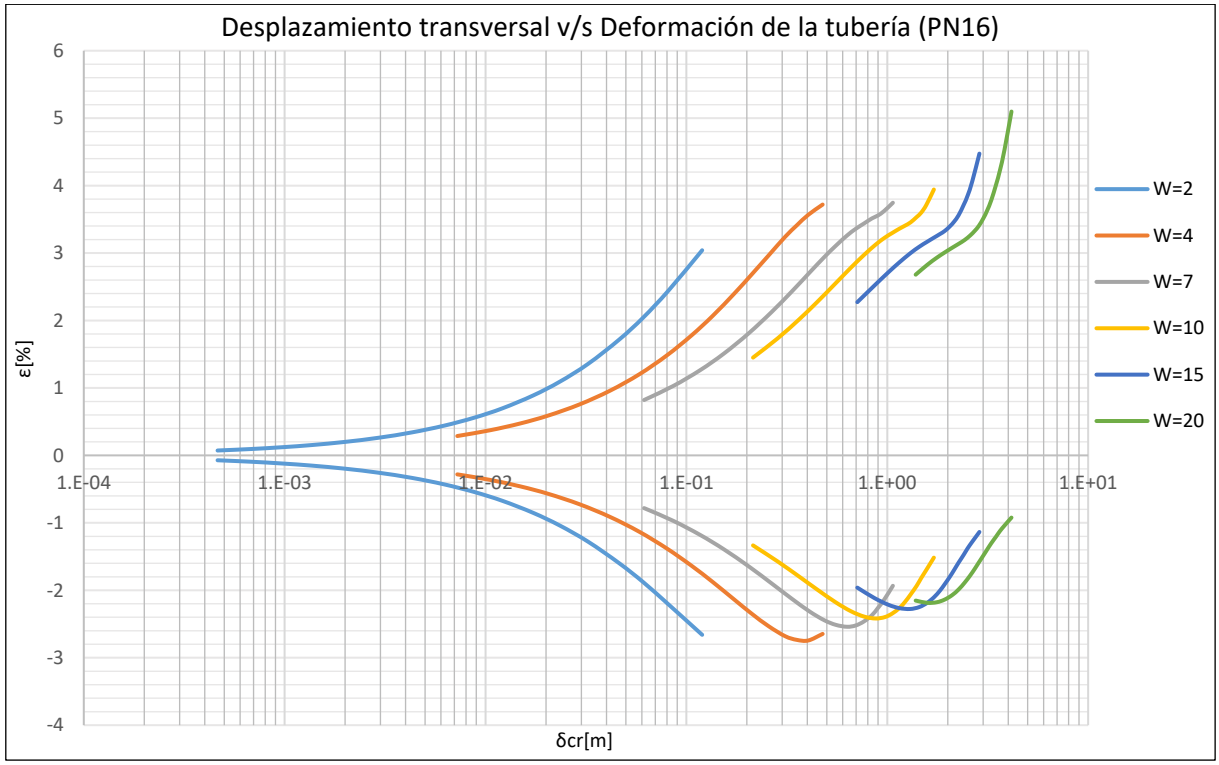


Gráfico 13-112: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena Fina.

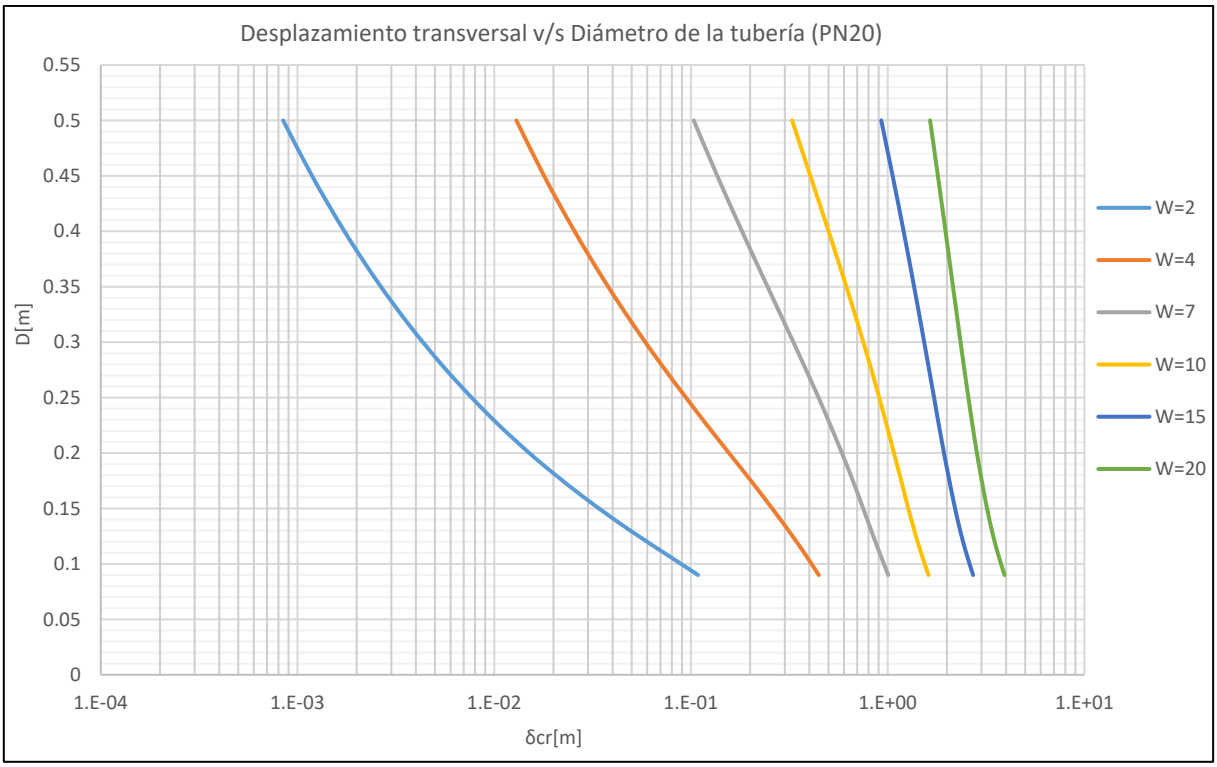


Gráfico 13-113: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN20, Suelo de Arena Fina.

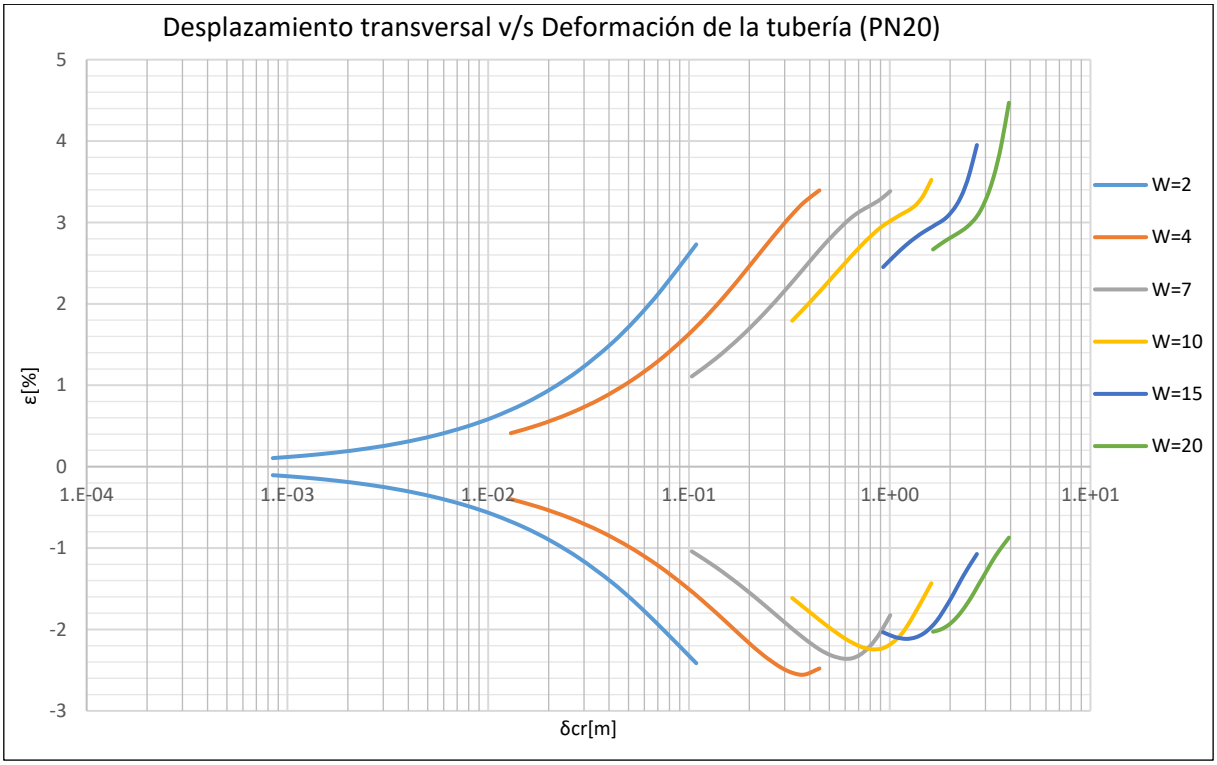


Gráfico 13-114: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN20, Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

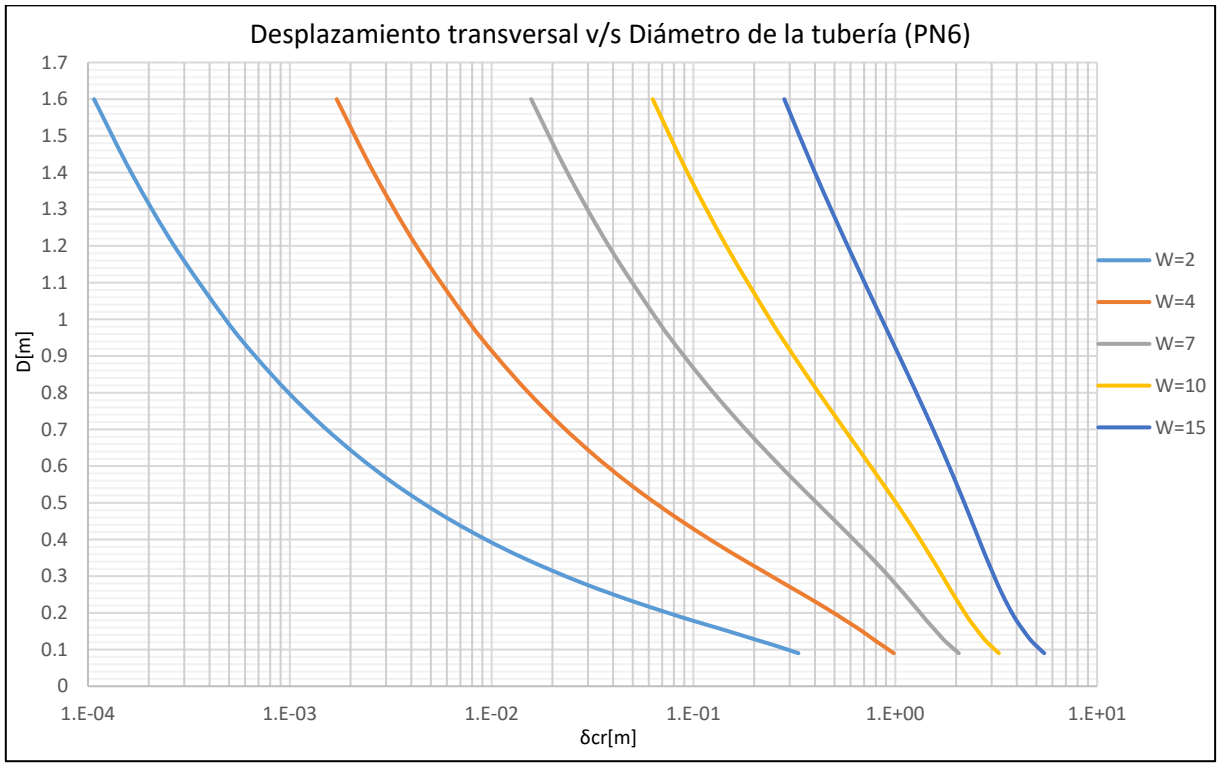


Gráfico 13-115: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena gruesa.

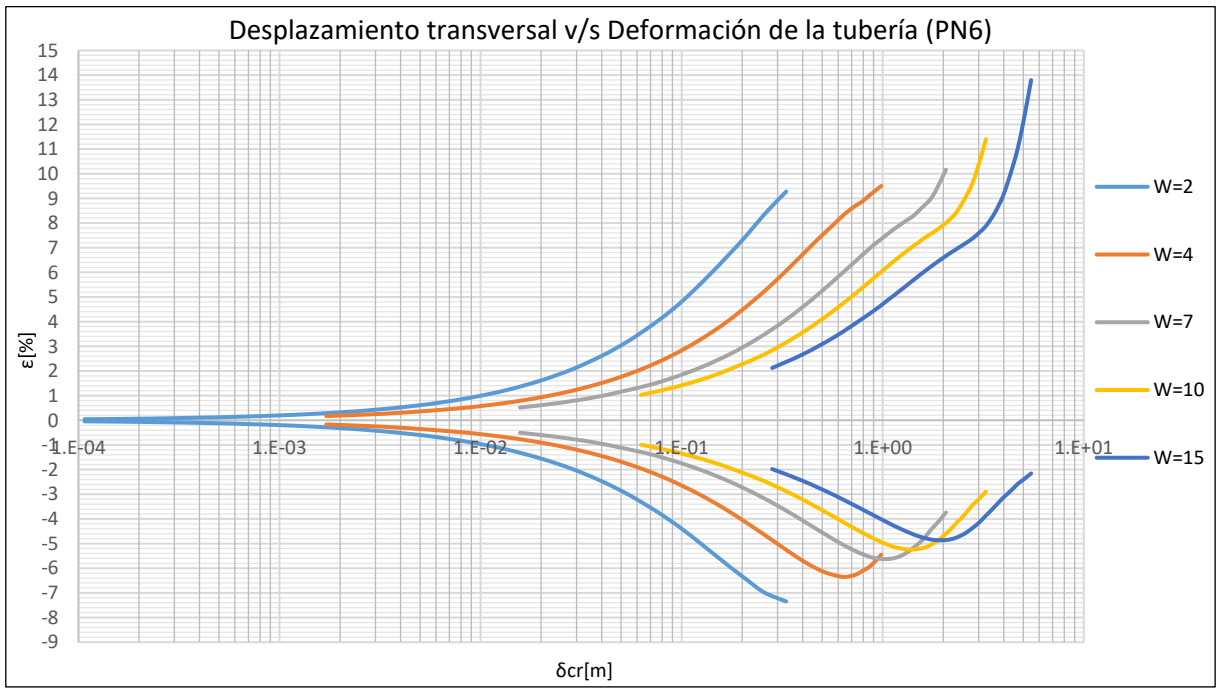


Gráfico 13-116: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN6, Suelo de Arena gruesa.

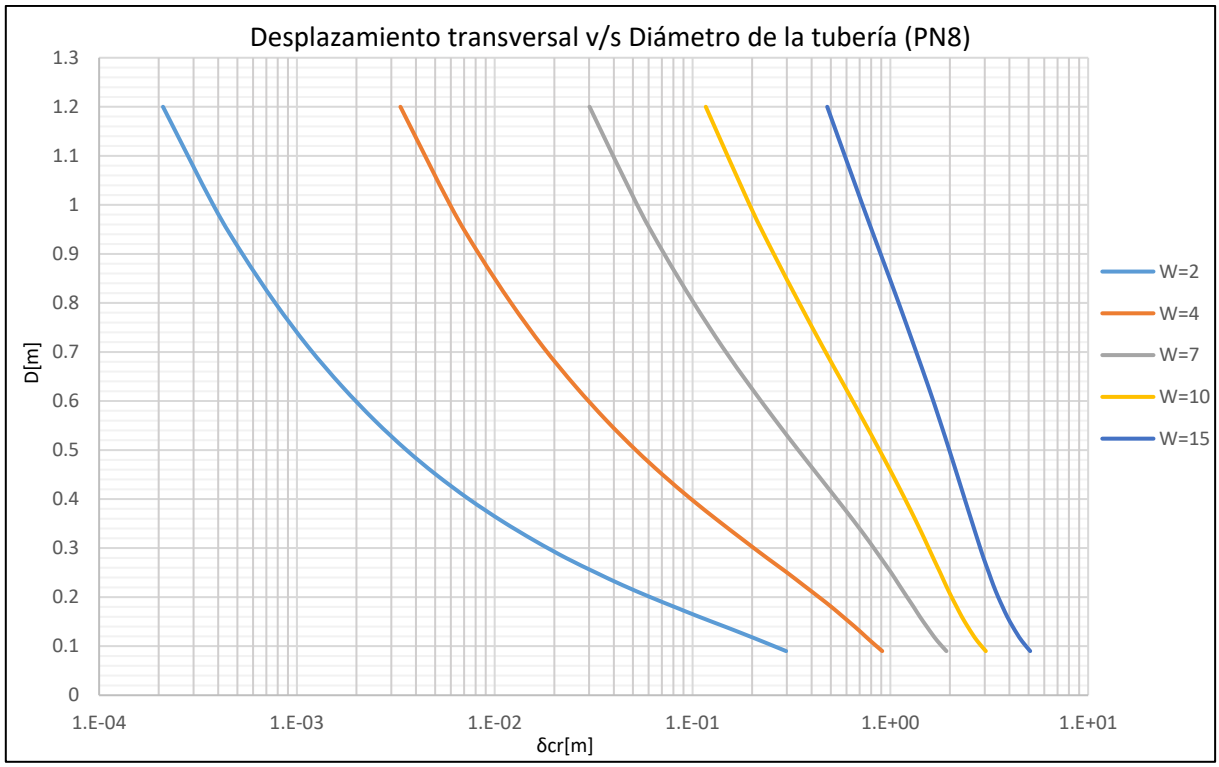


Gráfico 13-117: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena gruesa.

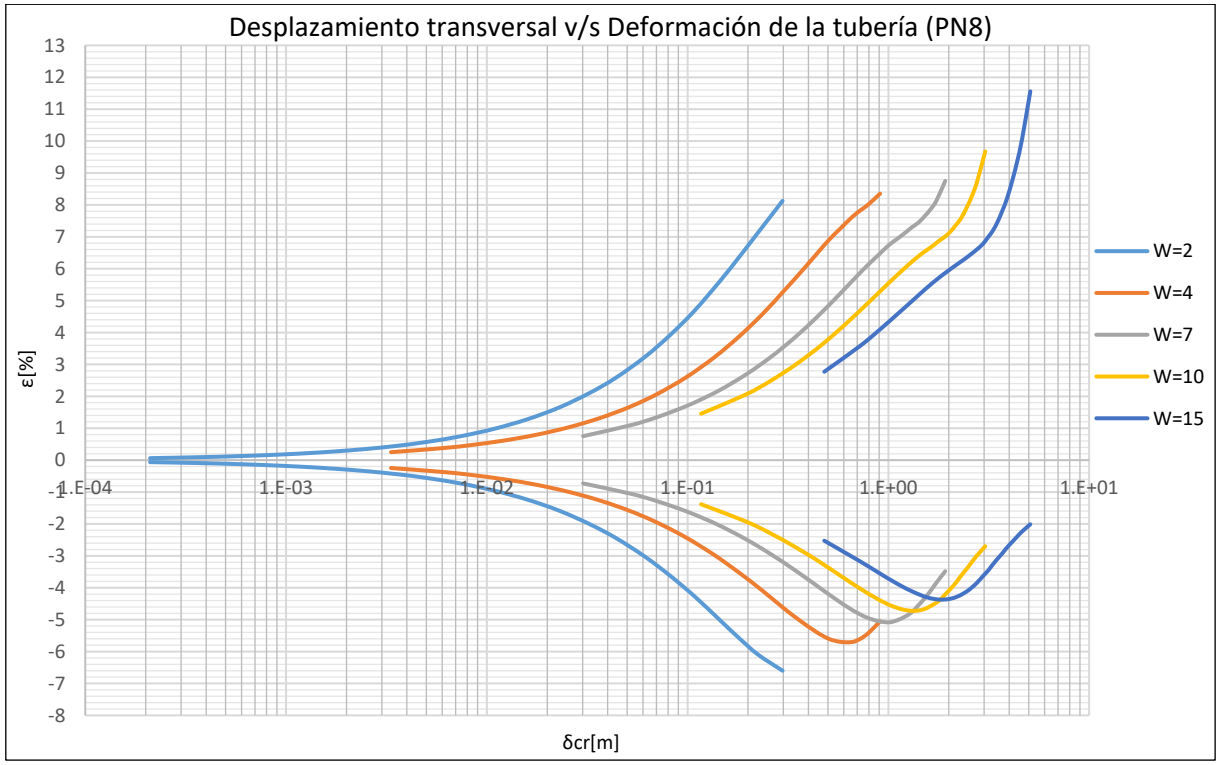


Gráfico 13-118: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN8, Suelo de Arena gruesa.

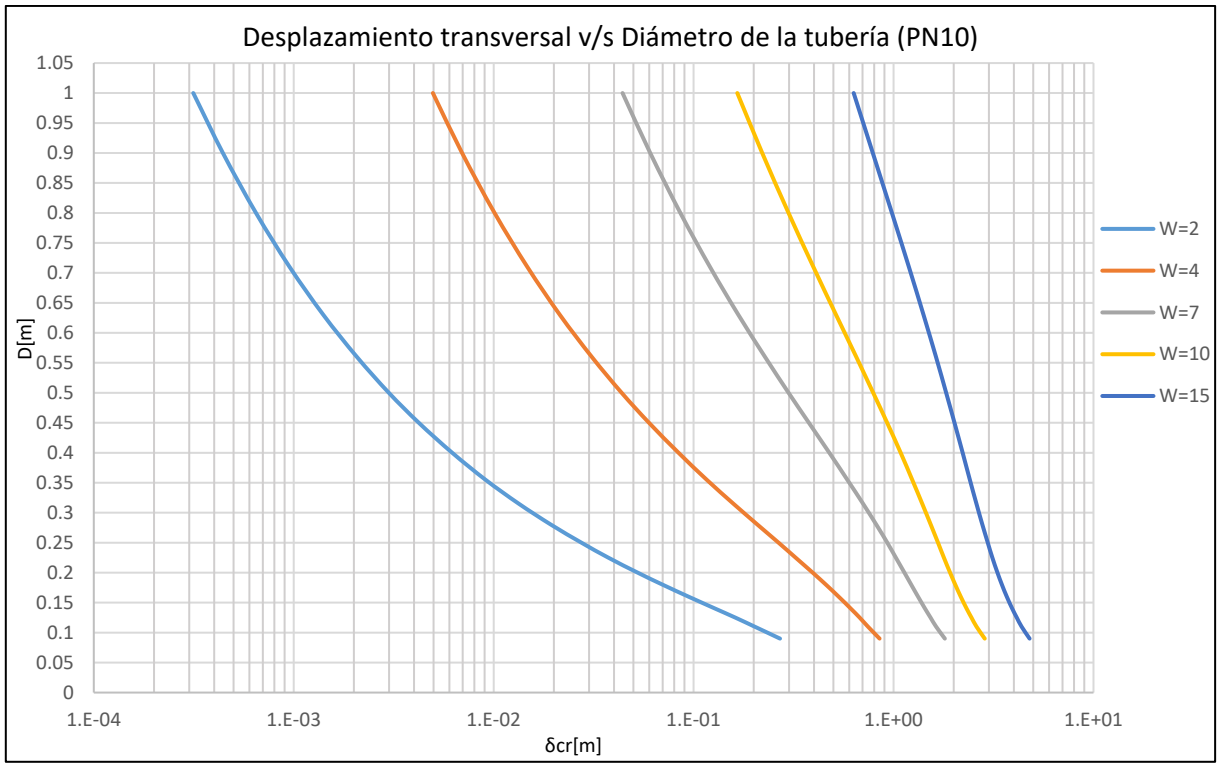


Gráfico 13-119: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena gruesa.

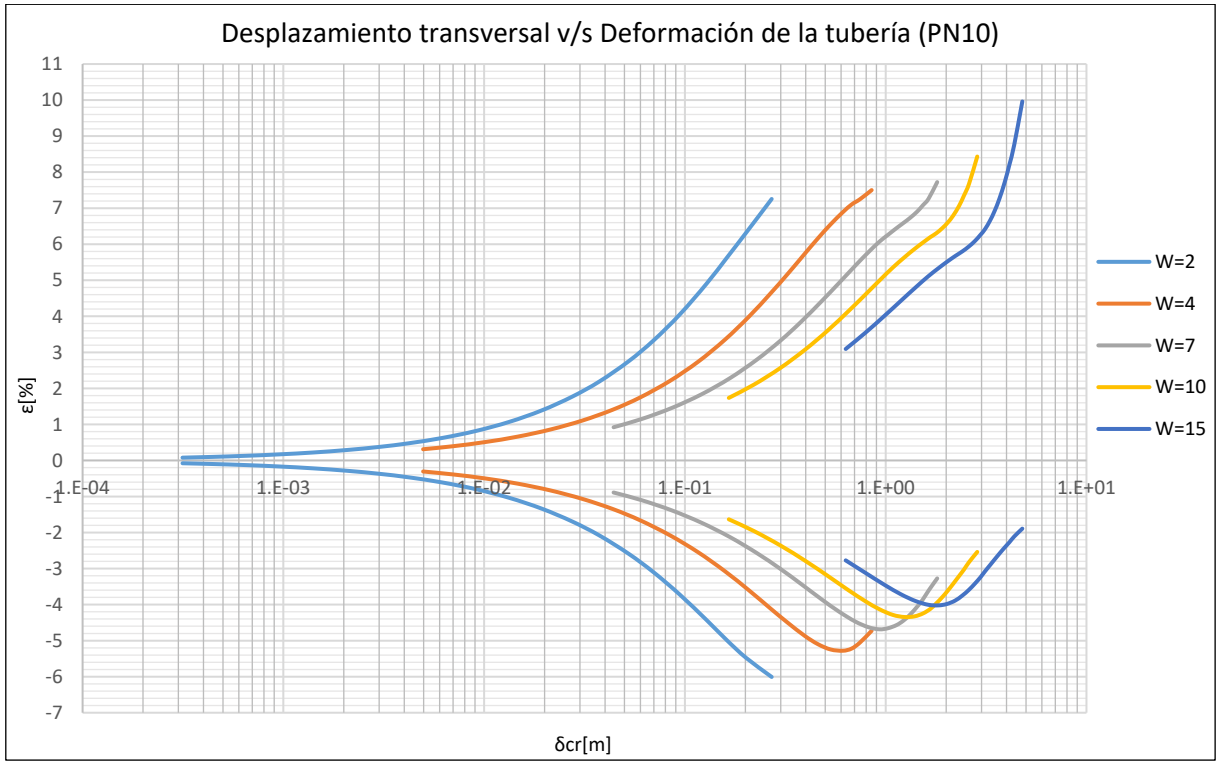


Gráfico 13-120: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN10, Suelo de Arena gruesa.

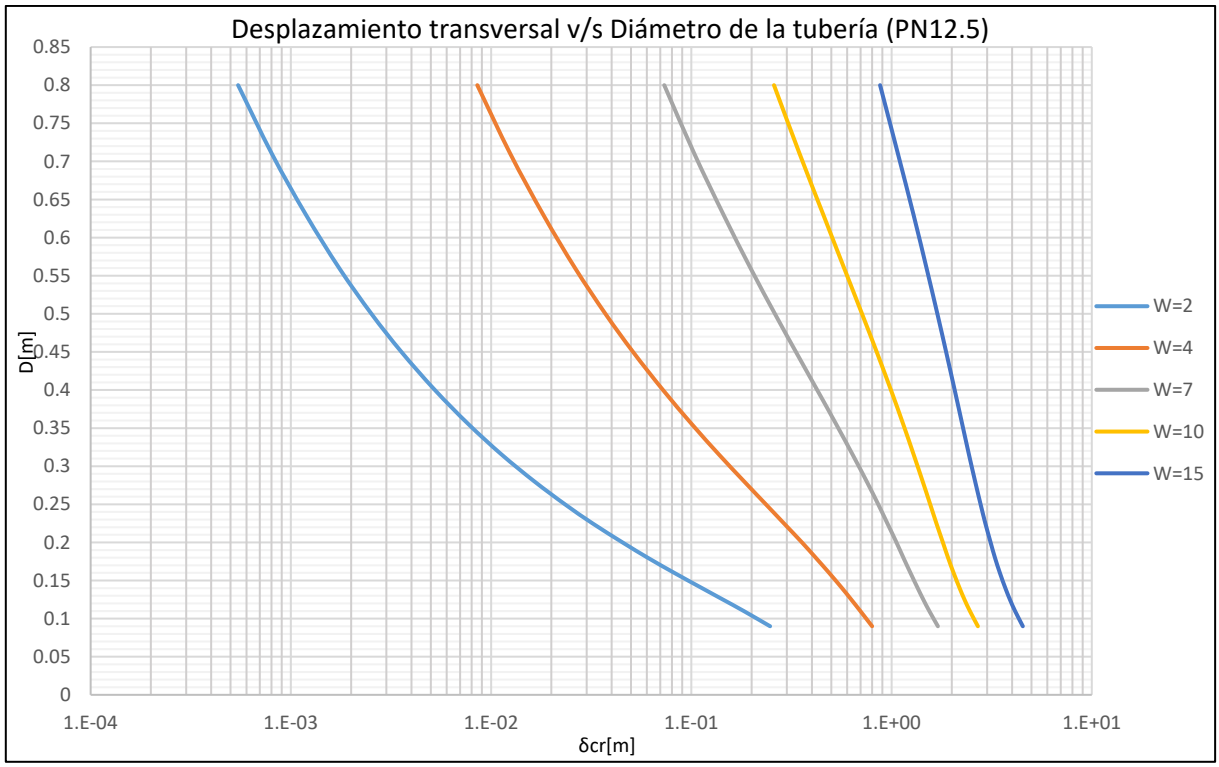


Gráfico 13-121: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena gruesa.

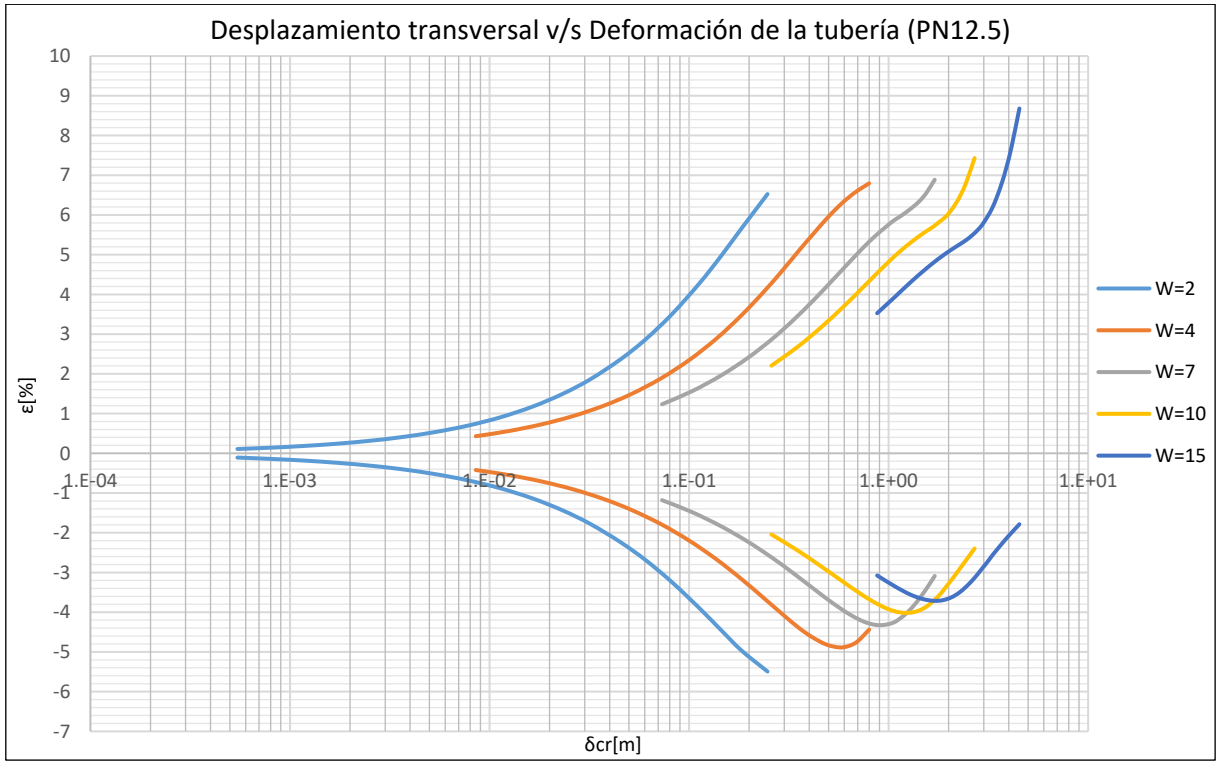


Gráfico 13-122: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo de Arena gruesa.

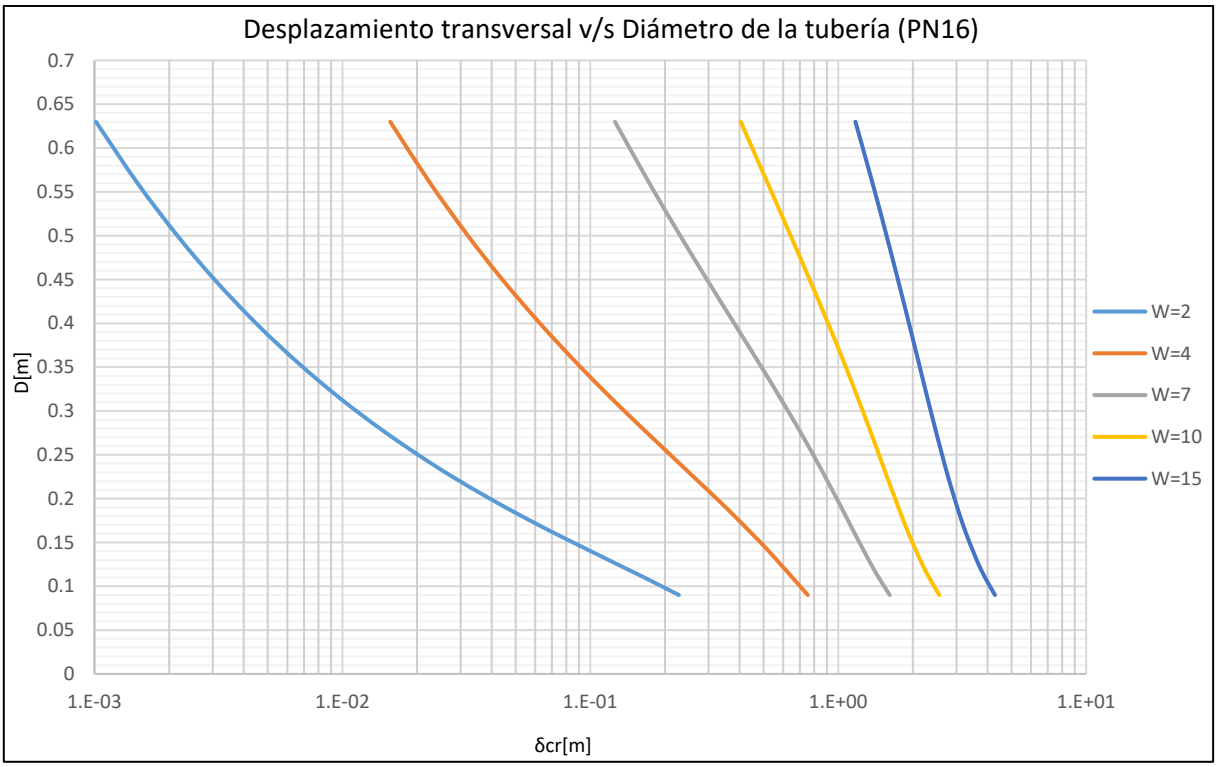


Gráfico 13-123: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena gruesa.

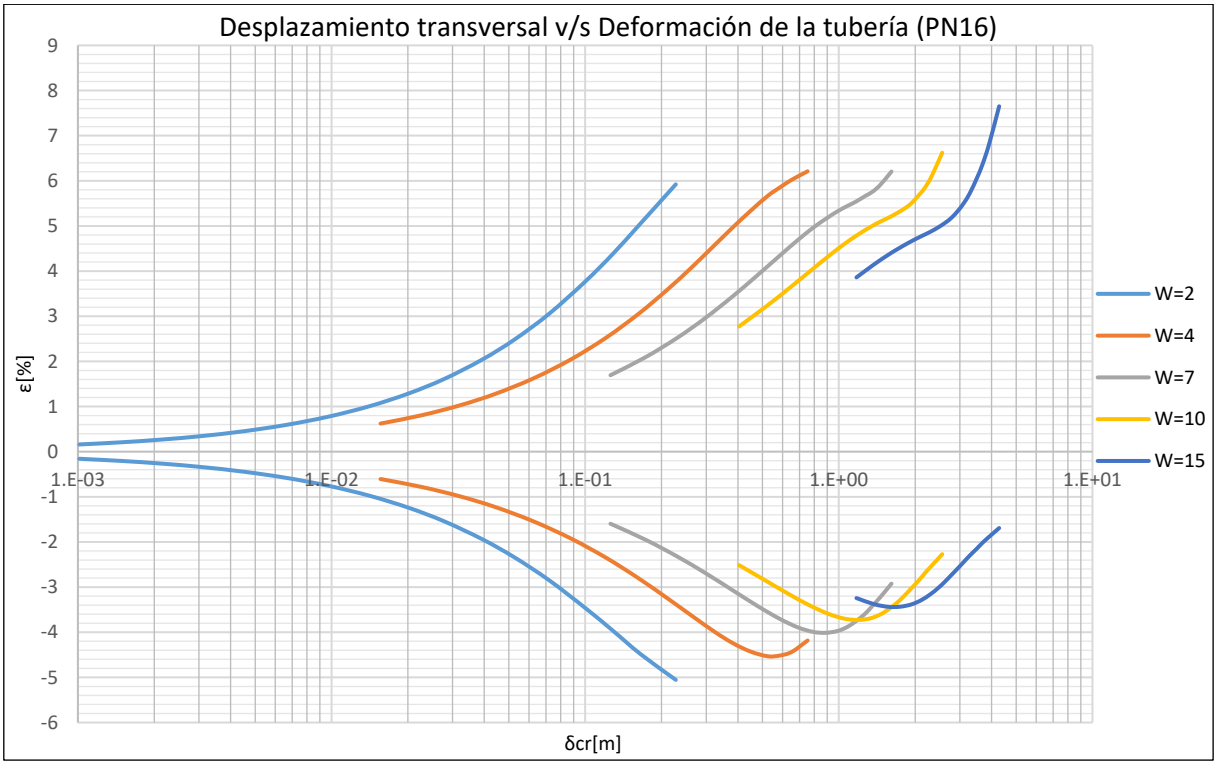


Gráfico 13-124: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo de Arena gruesa.

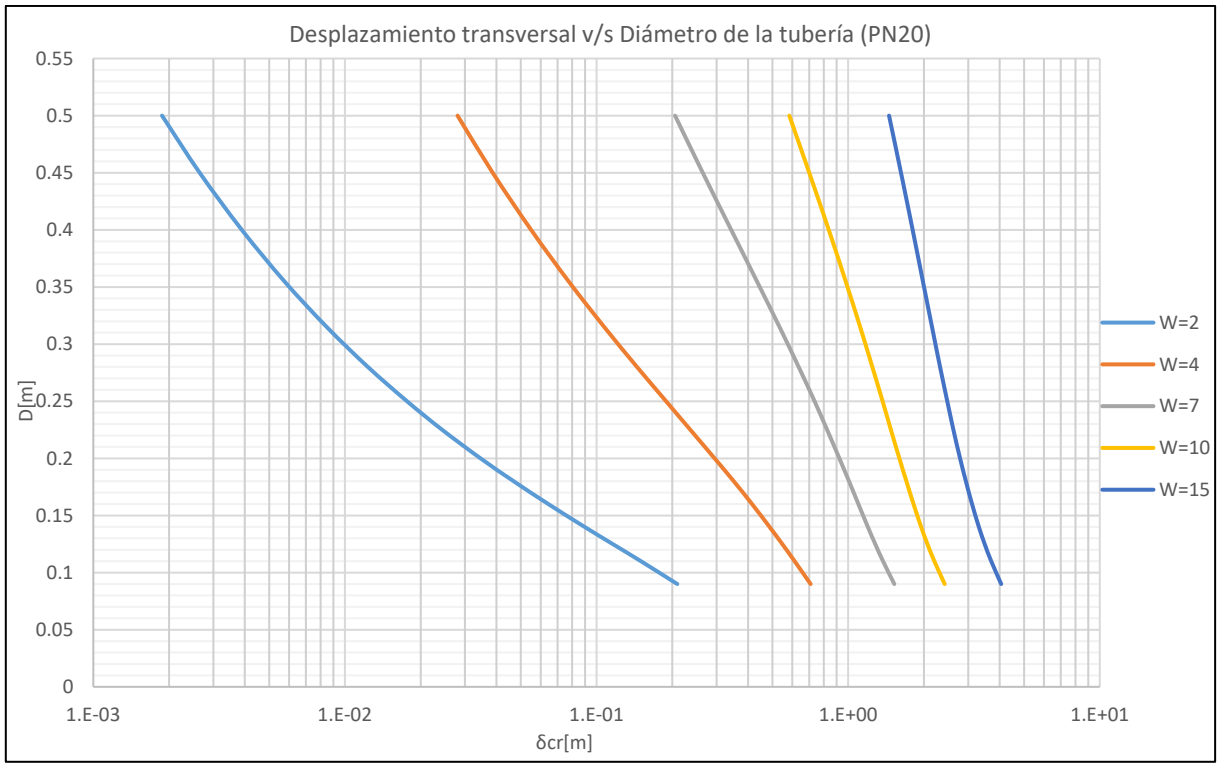


Gráfico 13-125: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN20, Suelo de Arena gruesa.

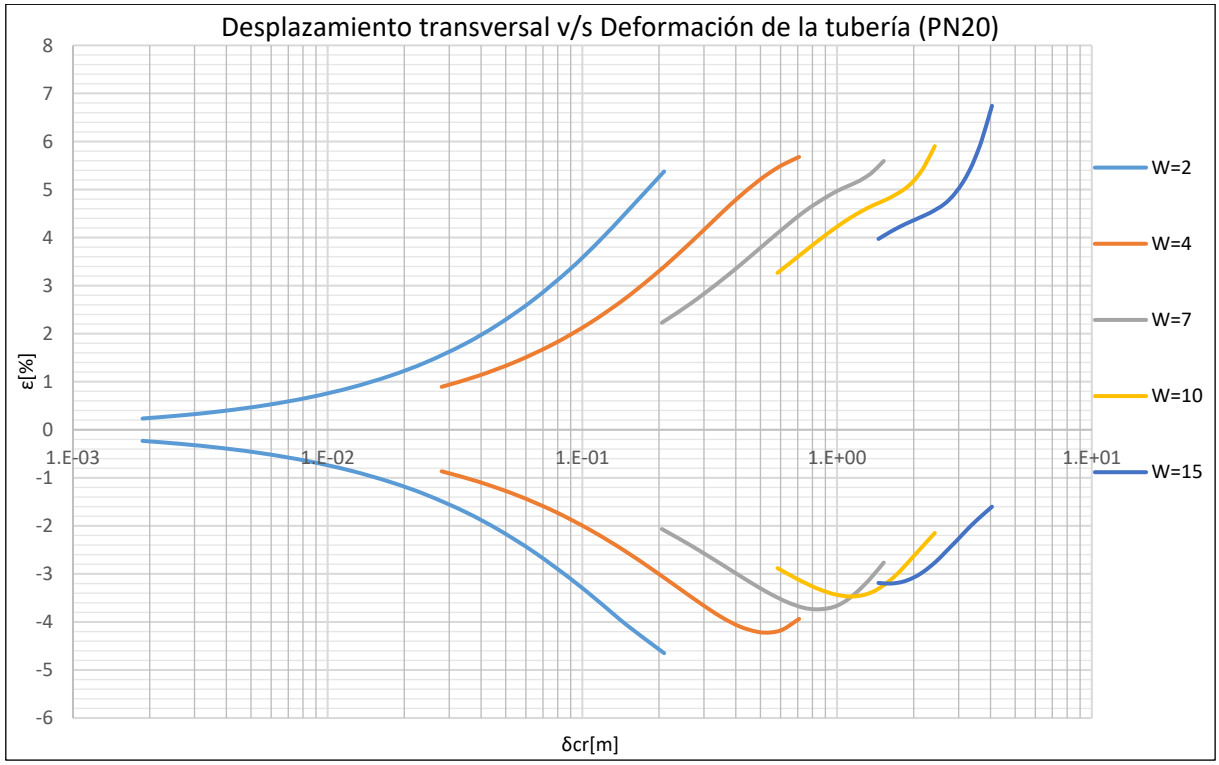


Gráfico 13-126: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN20, Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

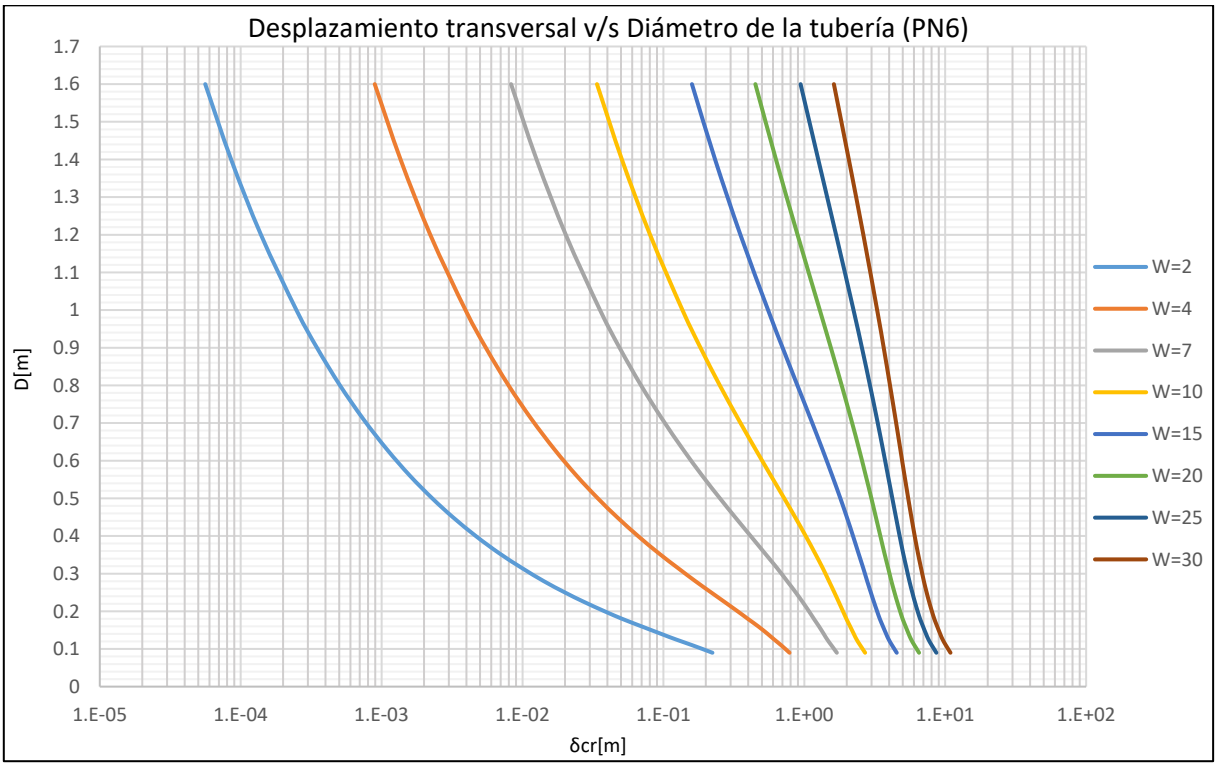


Gráfico 13-127: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

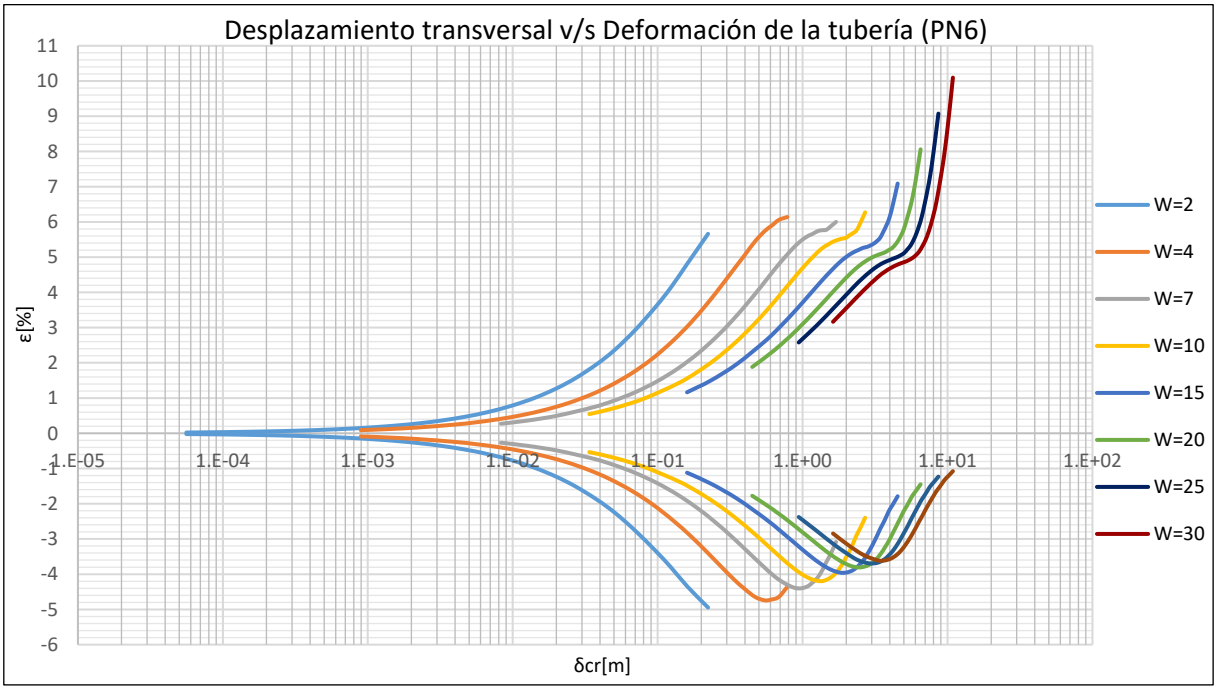


Gráfico 13-128: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

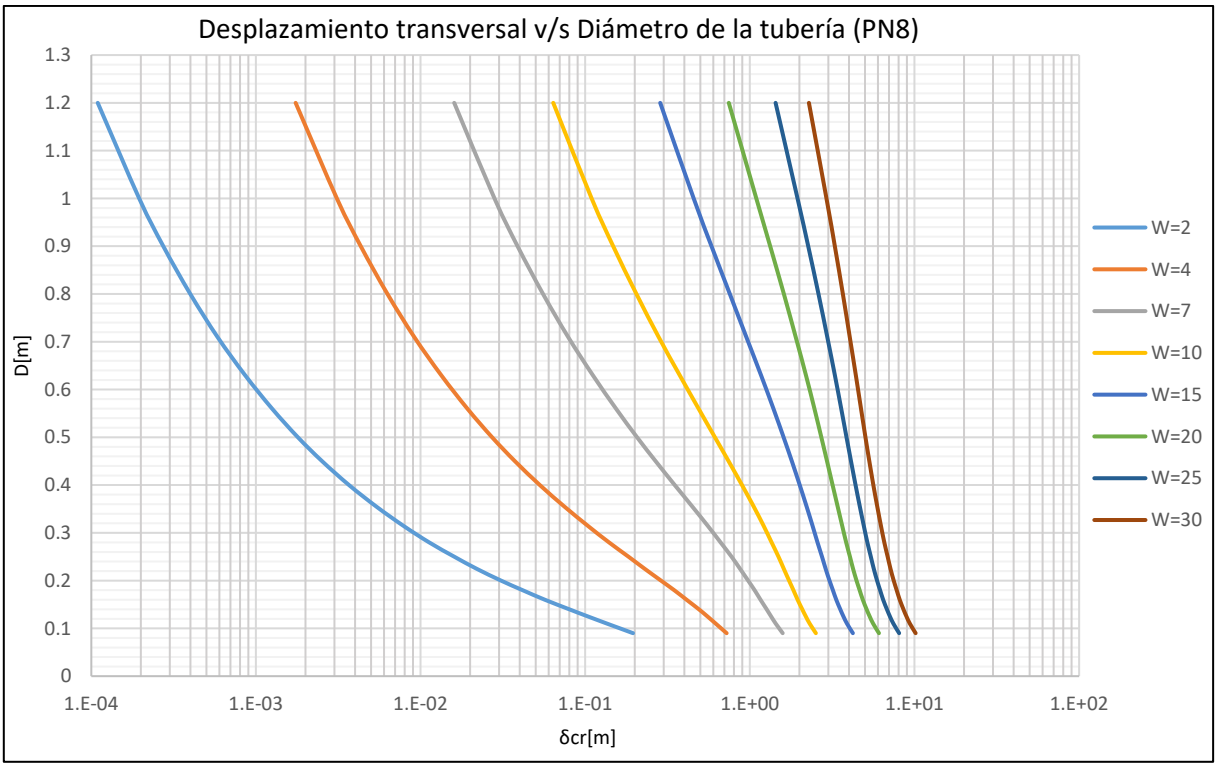


Gráfico 13-129: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN8, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

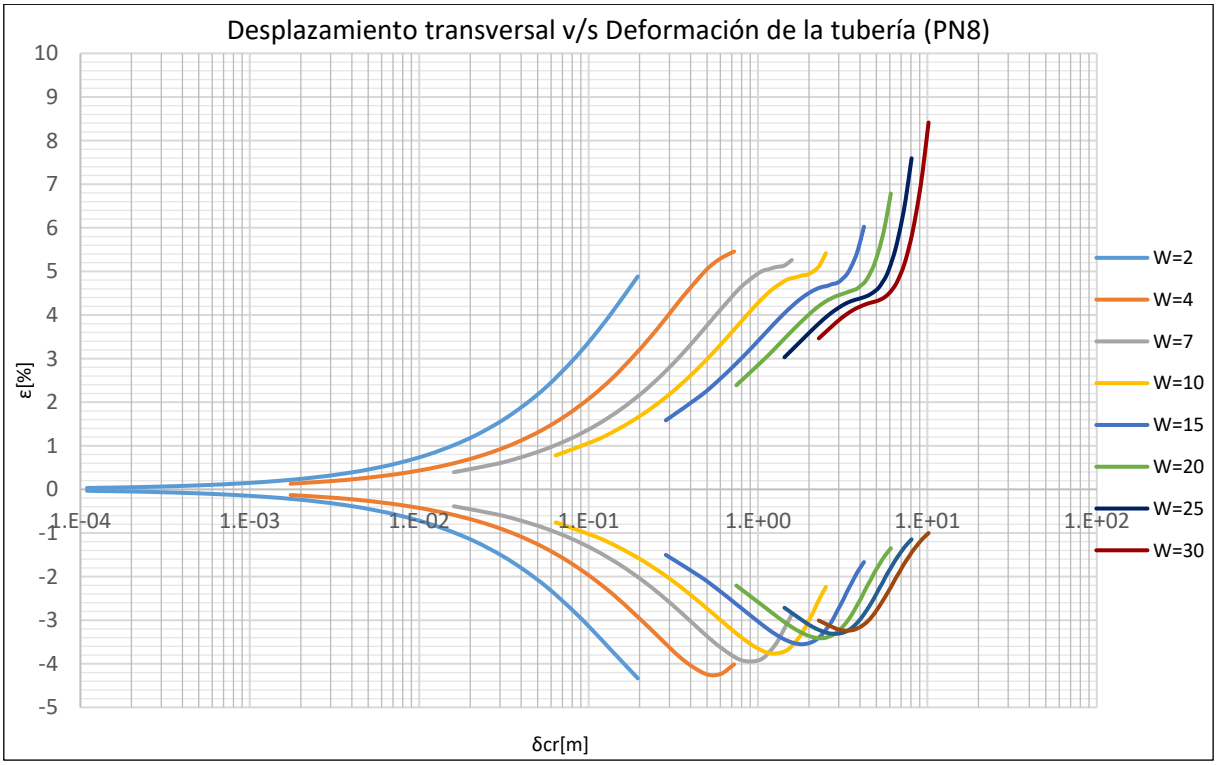


Gráfico 13-130: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN8, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

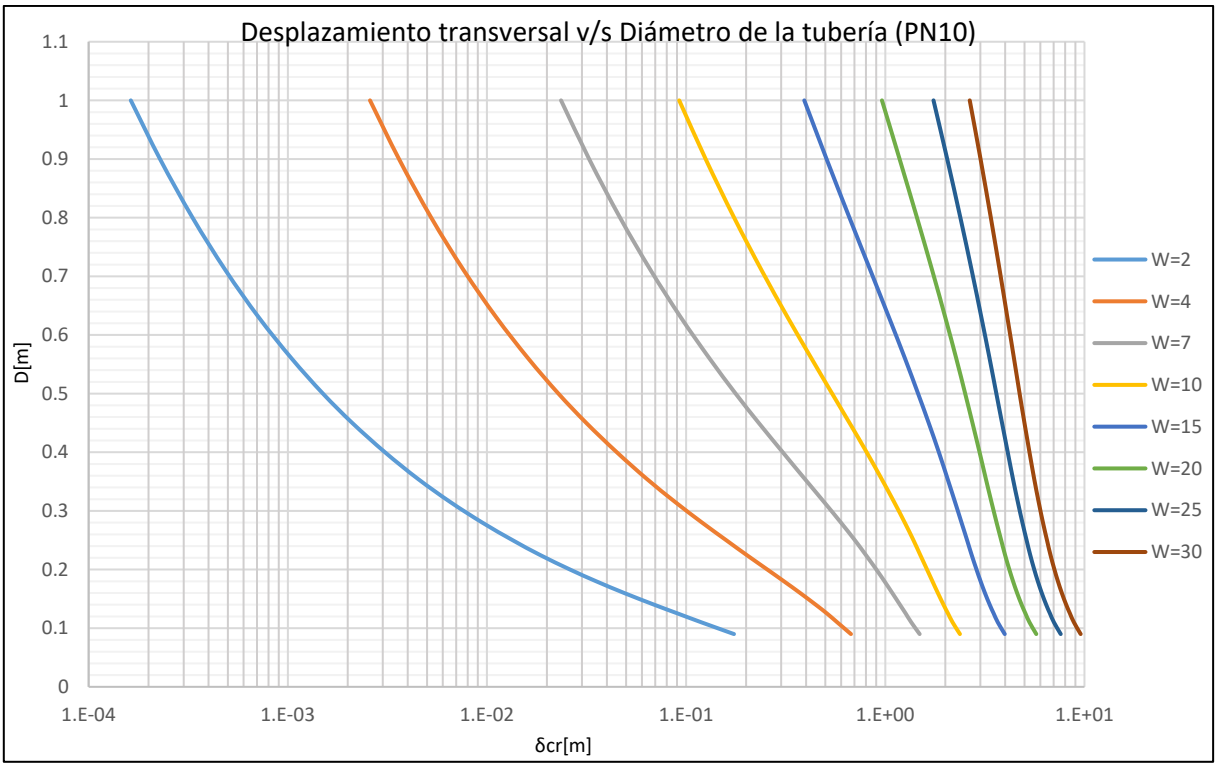


Gráfico 13-131: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

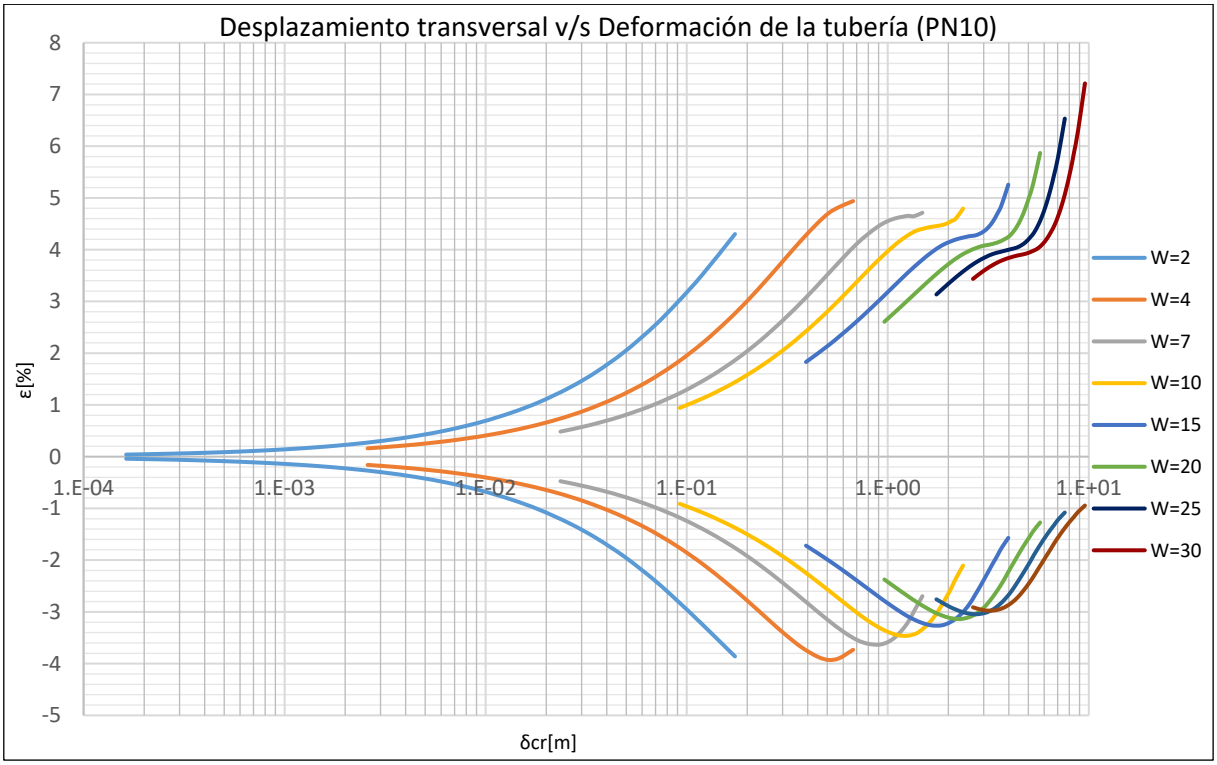


Gráfico 13-132: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

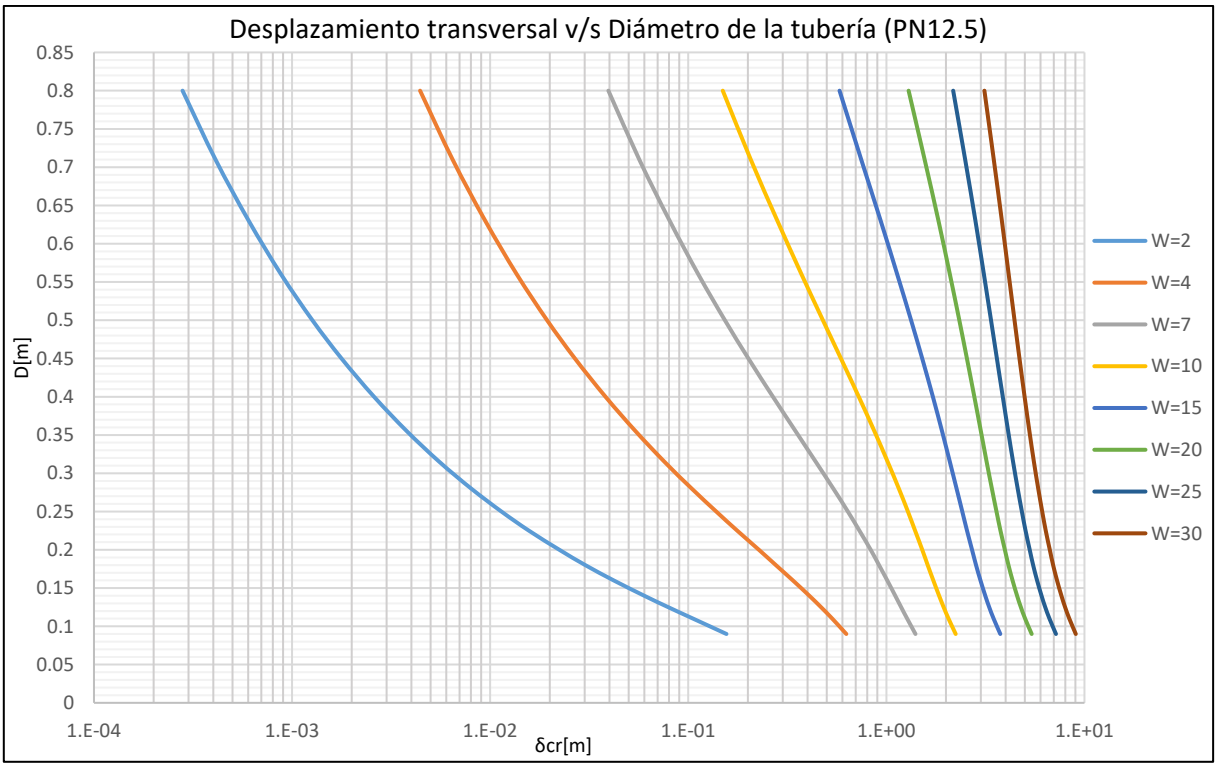


Gráfico 13-133: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

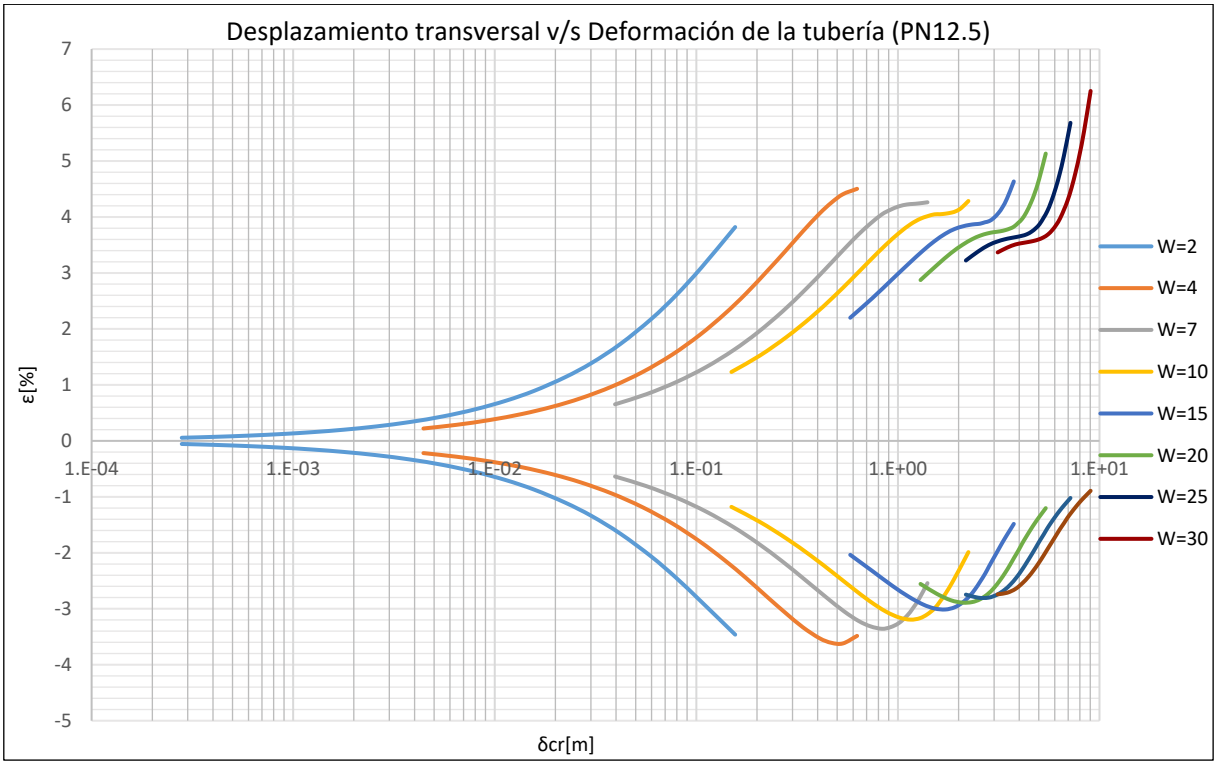


Gráfico 13-134: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN12.5, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

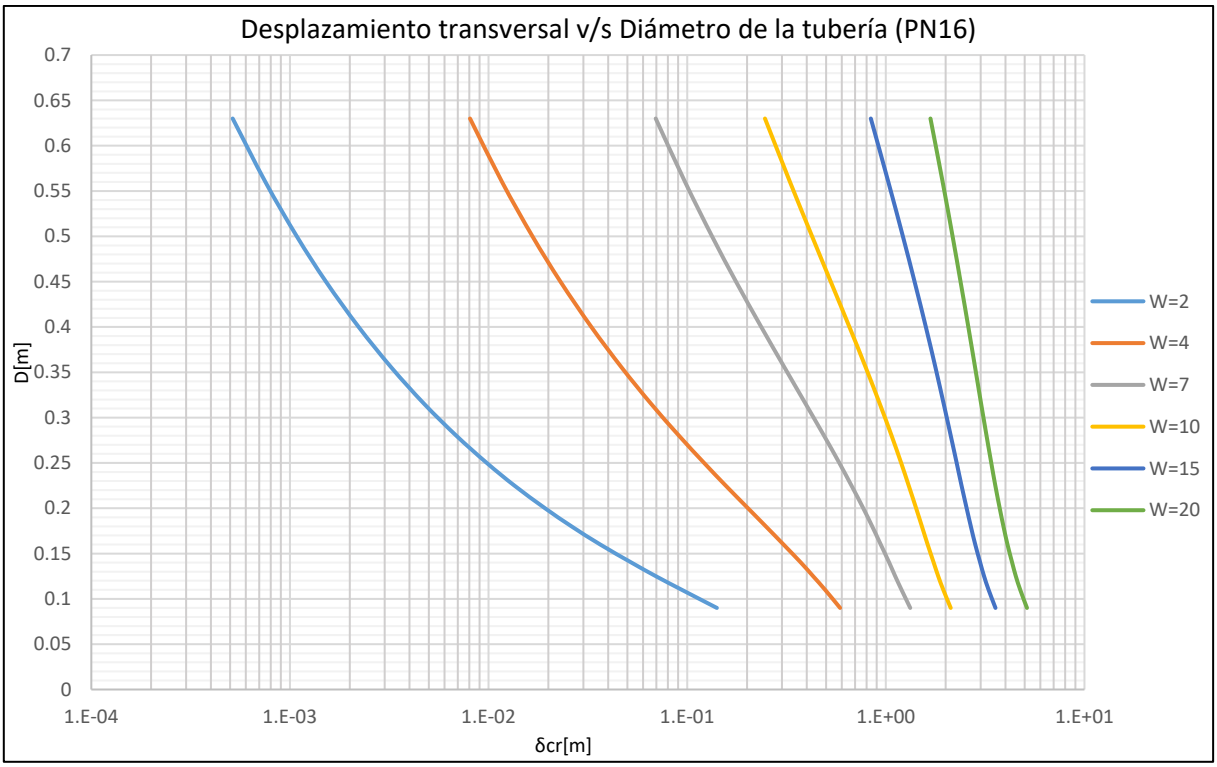


Gráfico 13-135: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

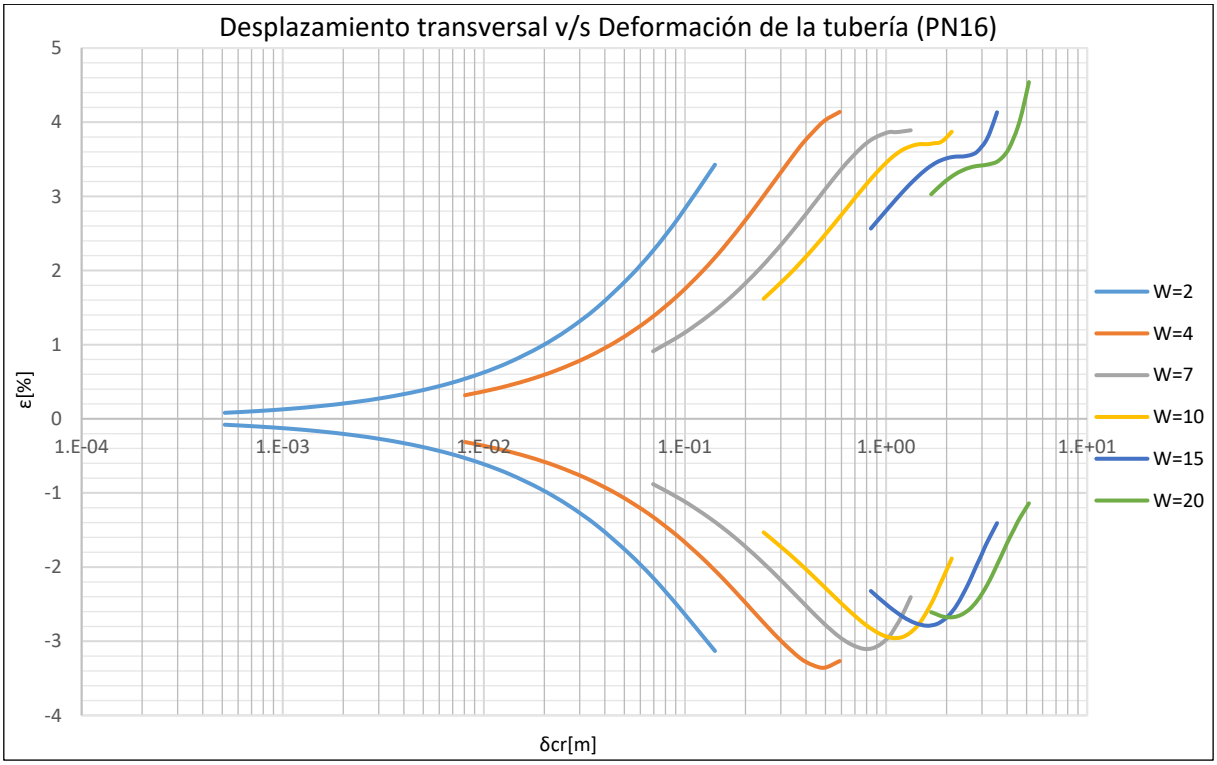


Gráfico 13-136: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

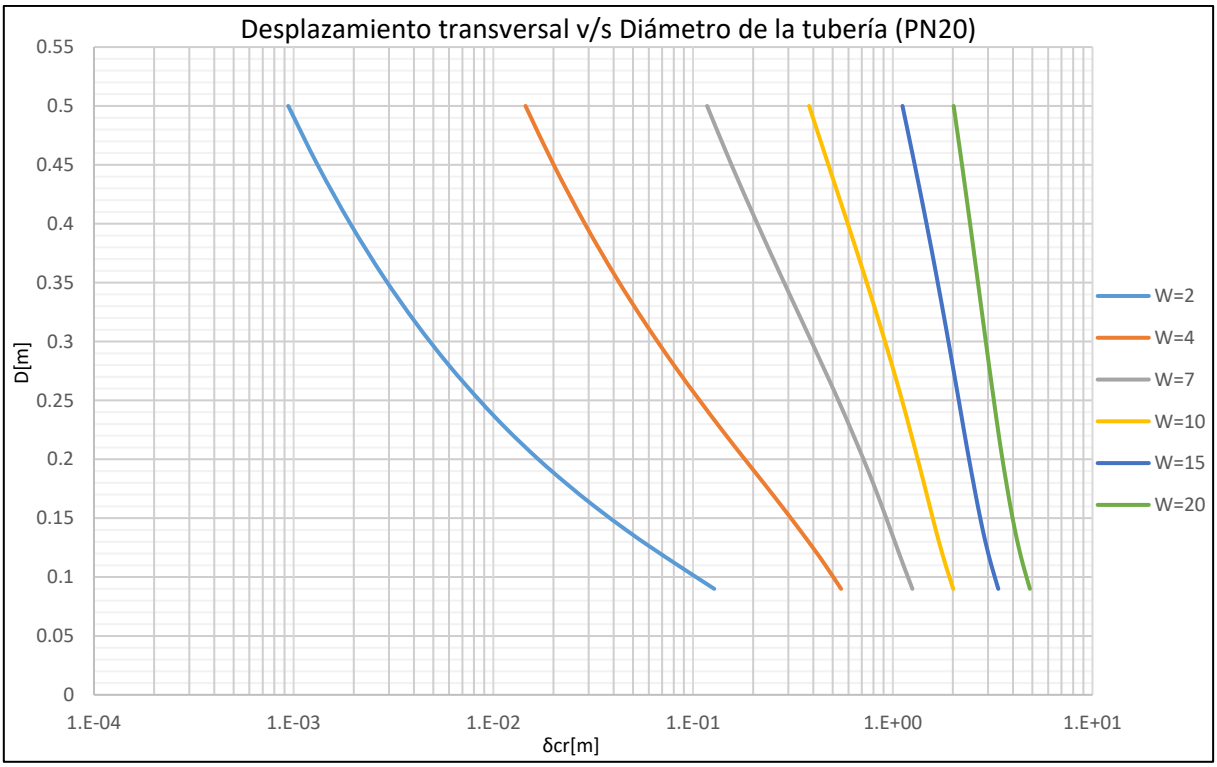


Gráfico 13-137: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

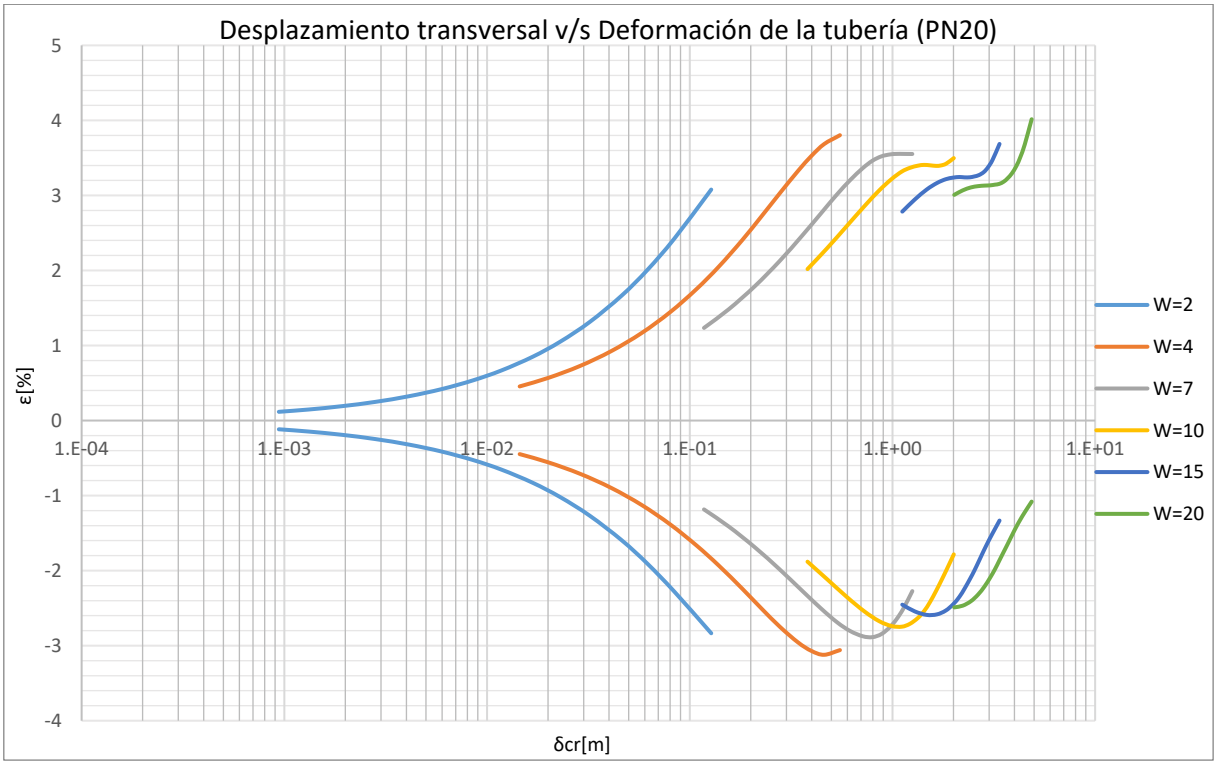


Gráfico 13-138: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE100 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

k.2.3. Tuberías de densidad PE200

- **Tipo de Suelo 1: Arena Fina**

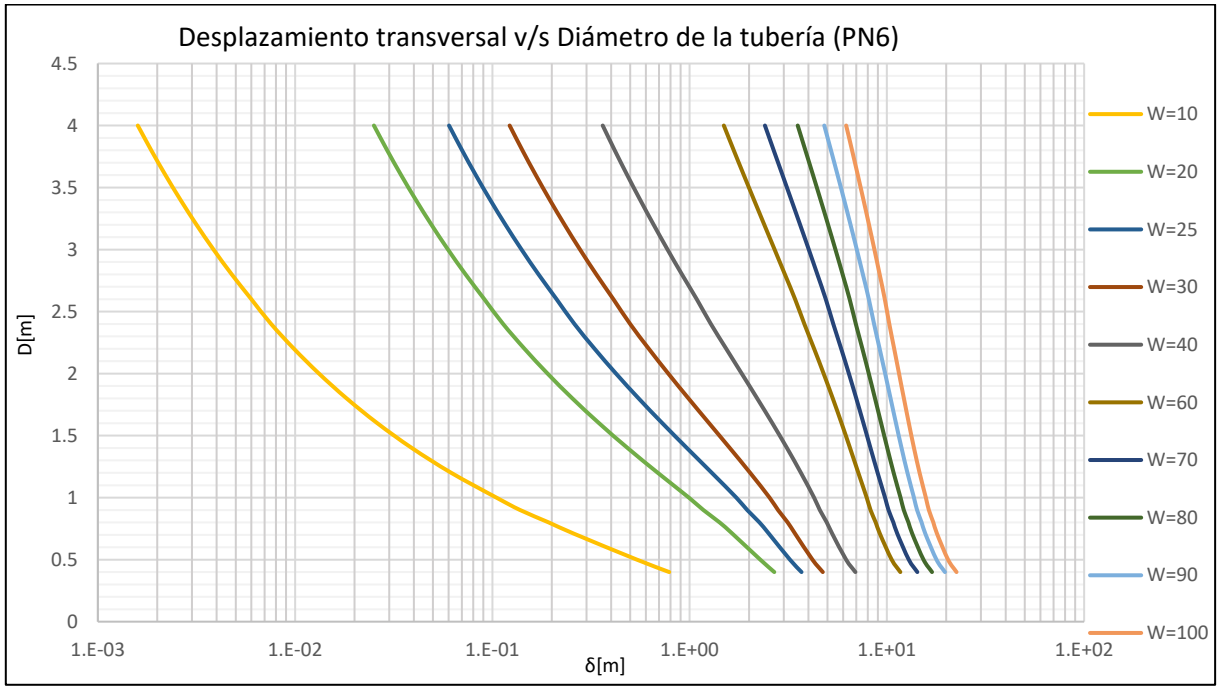


Gráfico 13-139: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Arena Fina.

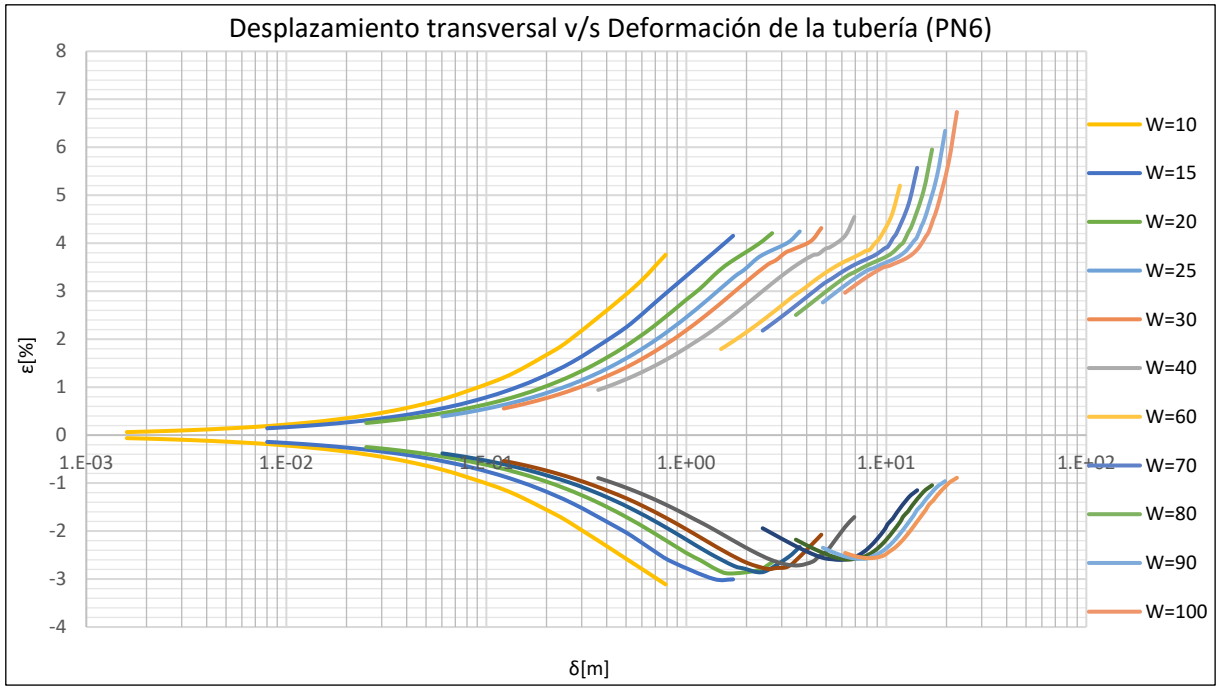


Gráfico 13-140: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Arena Fina.

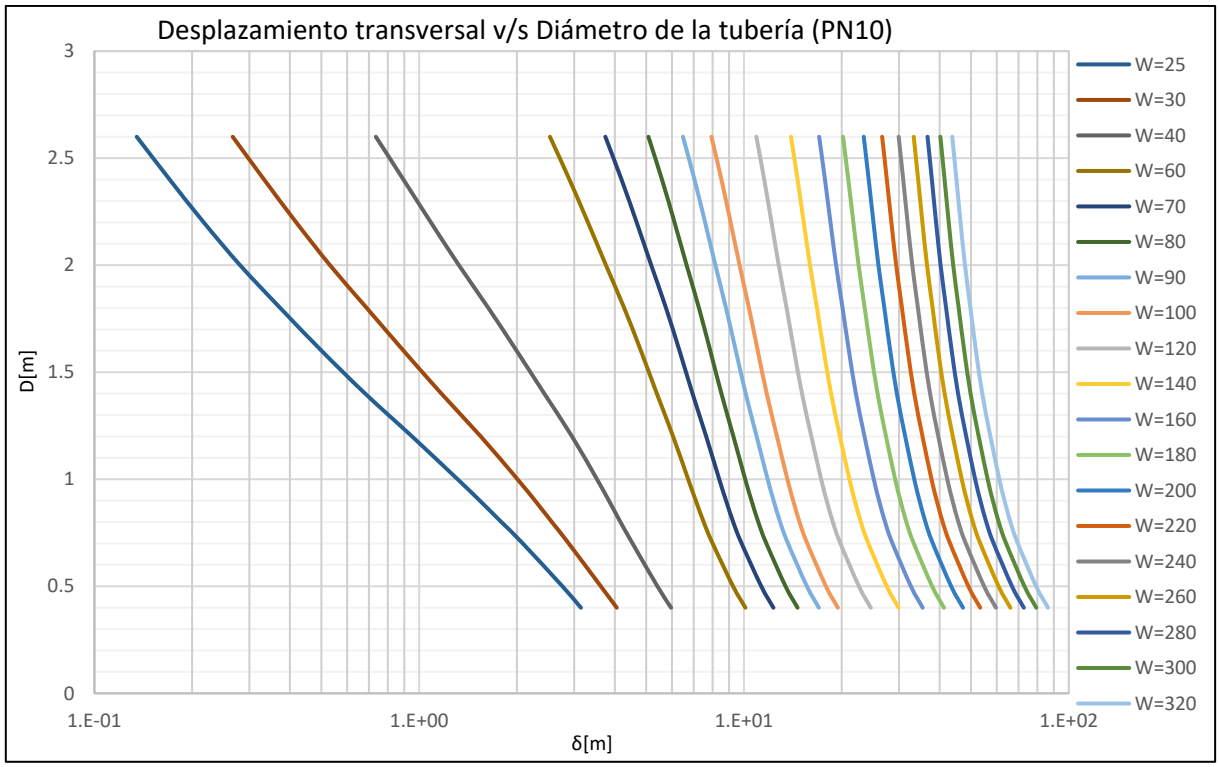


Gráfico 13-141: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Arena Fina.

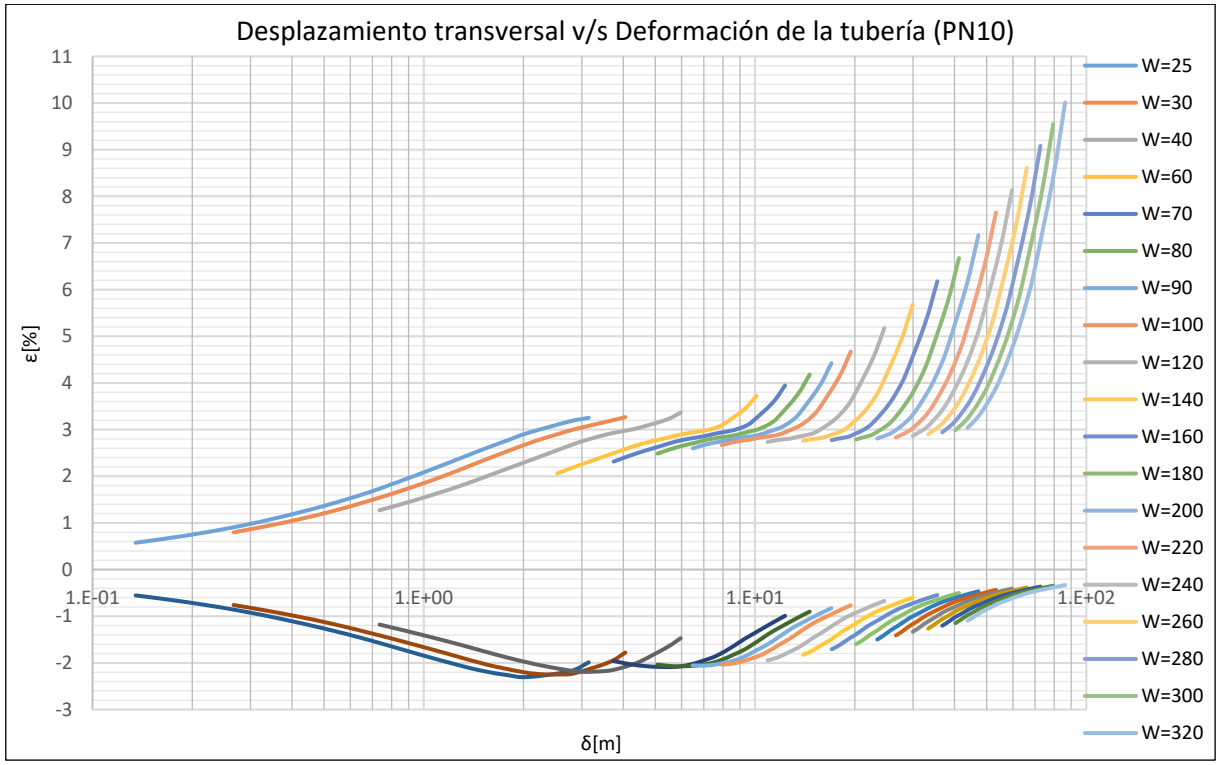


Gráfico 13-142: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Arena Fina.

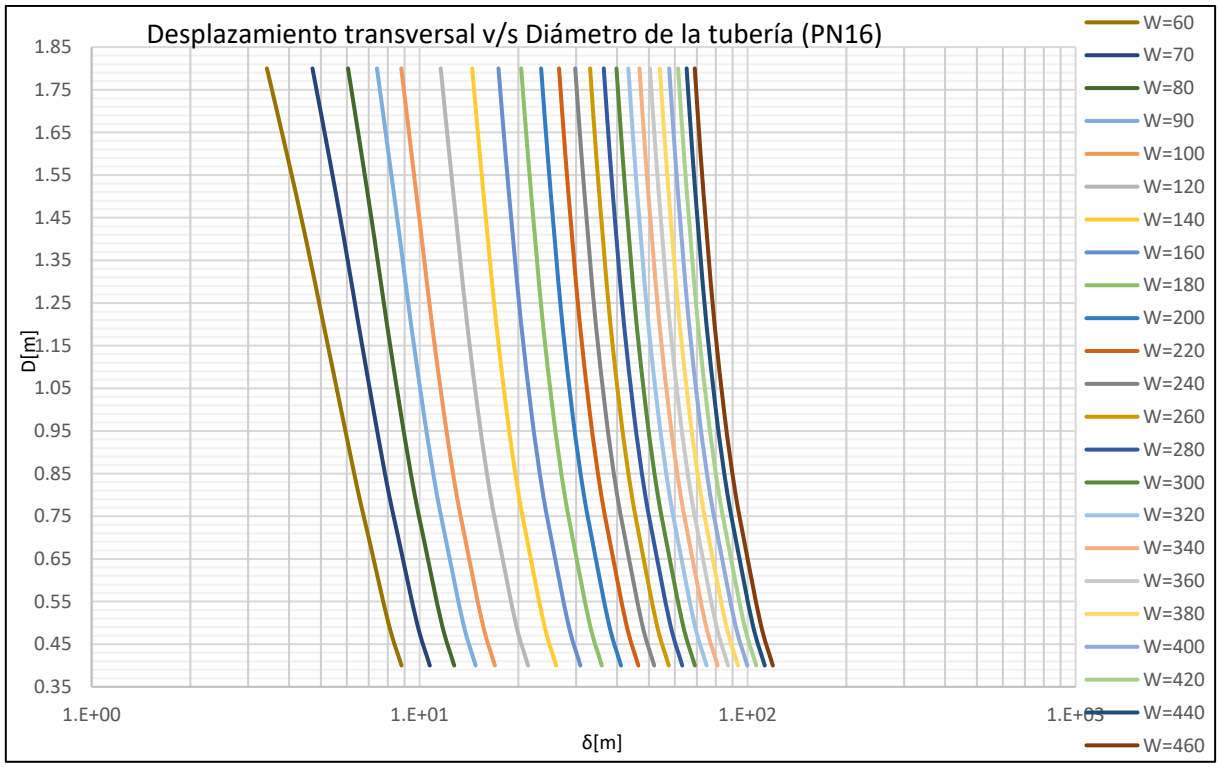


Gráfico 13-143: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Arena Fina.

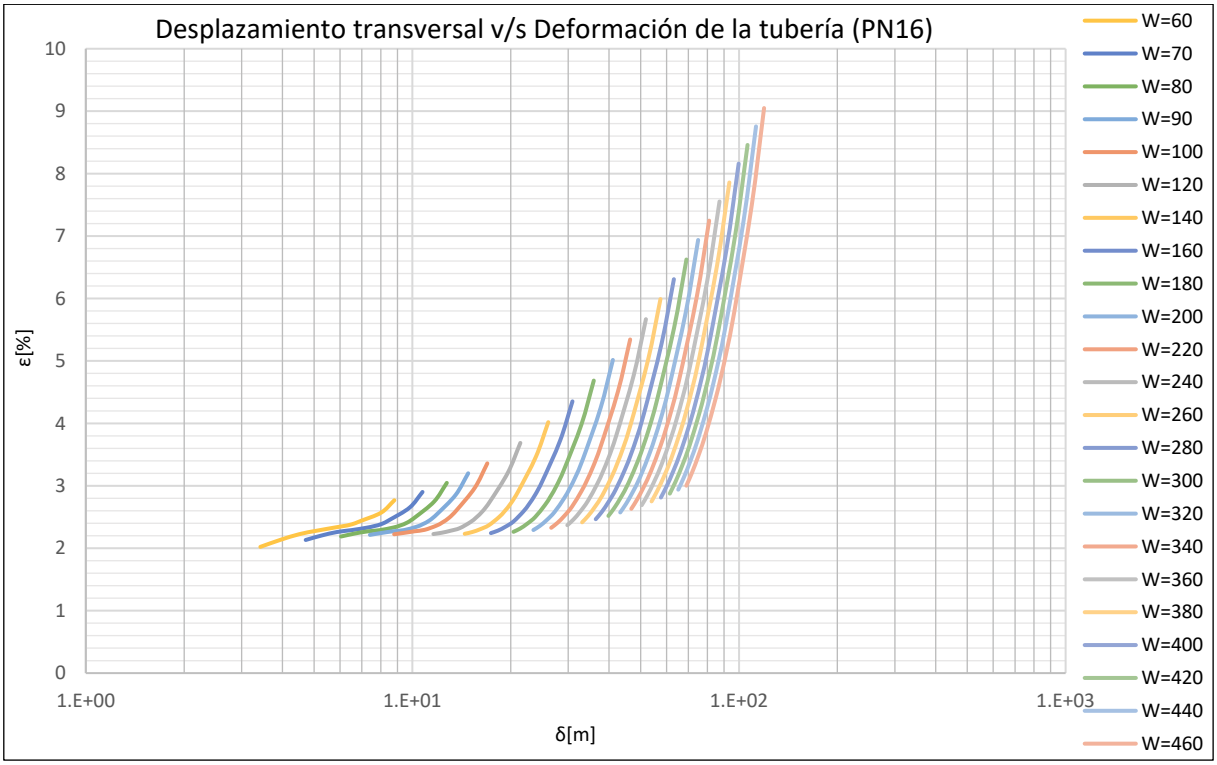


Gráfico 13-144: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Arena Fina.

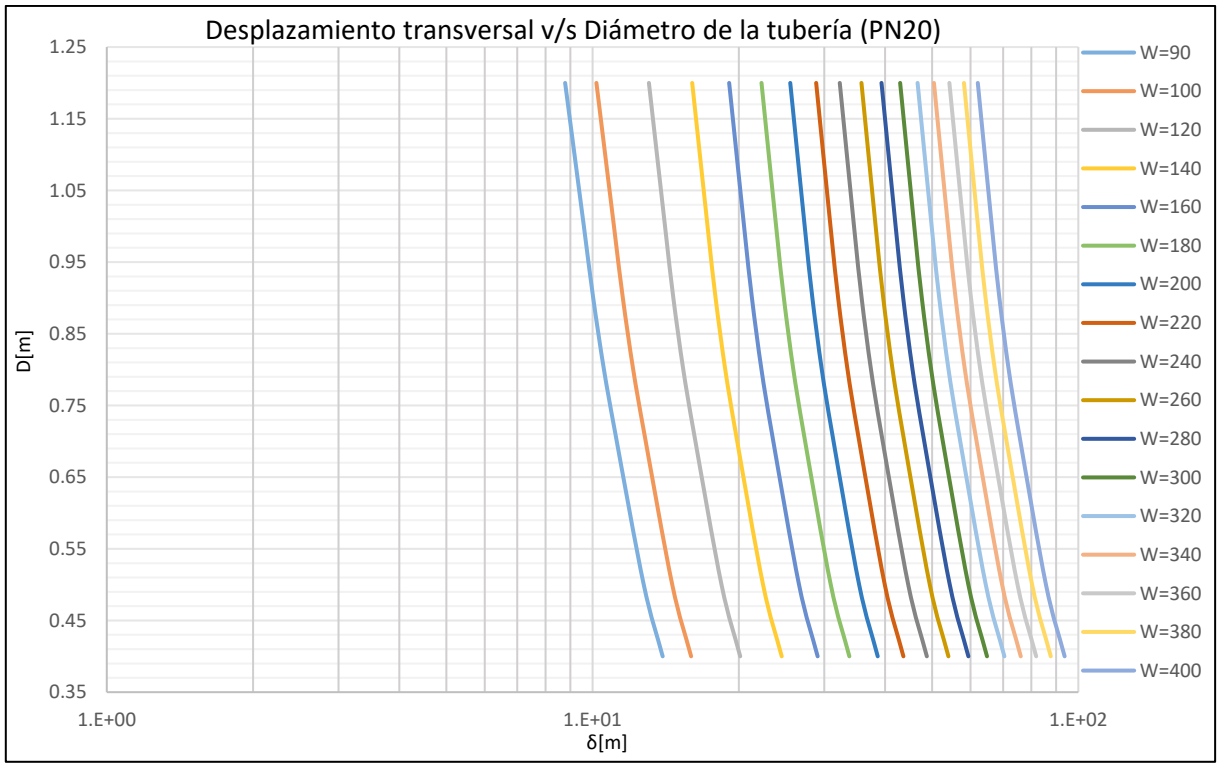


Gráfico 13-145: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Arena Fina.

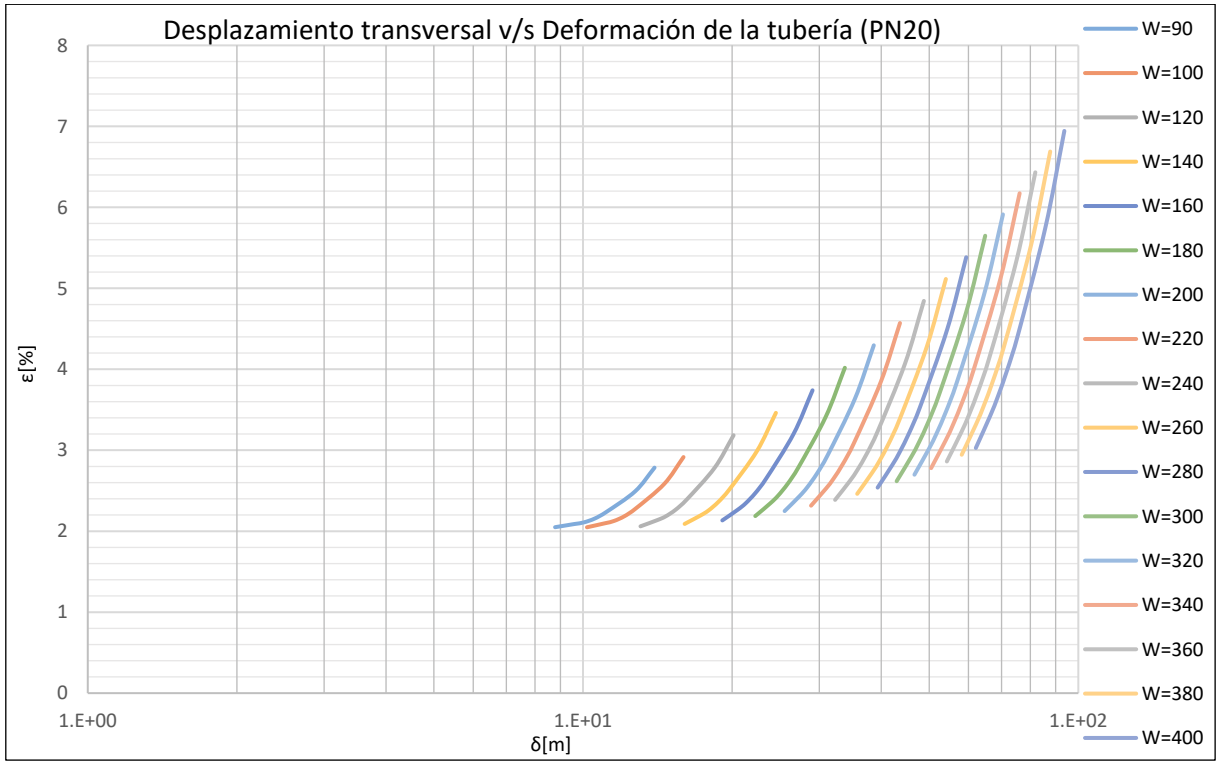


Gráfico 13-146: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Arena Fina.

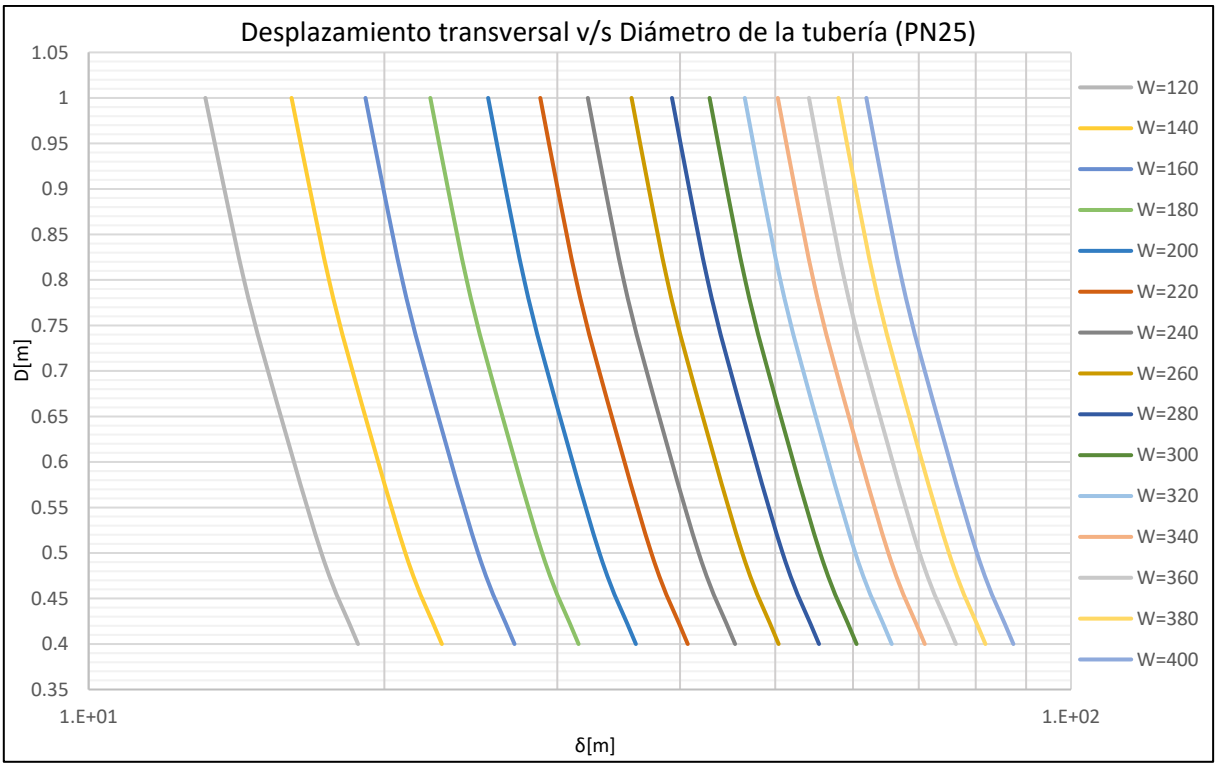


Gráfico 13-147: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN25, Suelo Arena Fina.

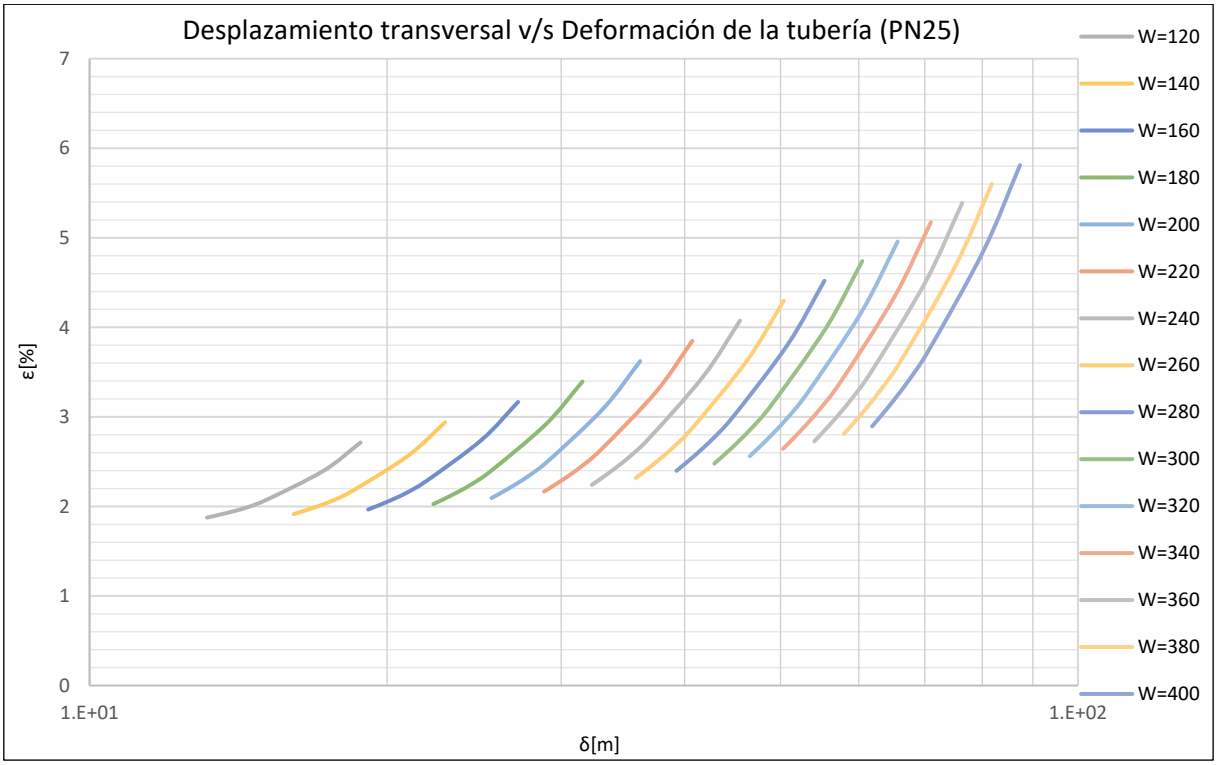


Gráfico 13-148: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN25, Suelo Arena Fina.

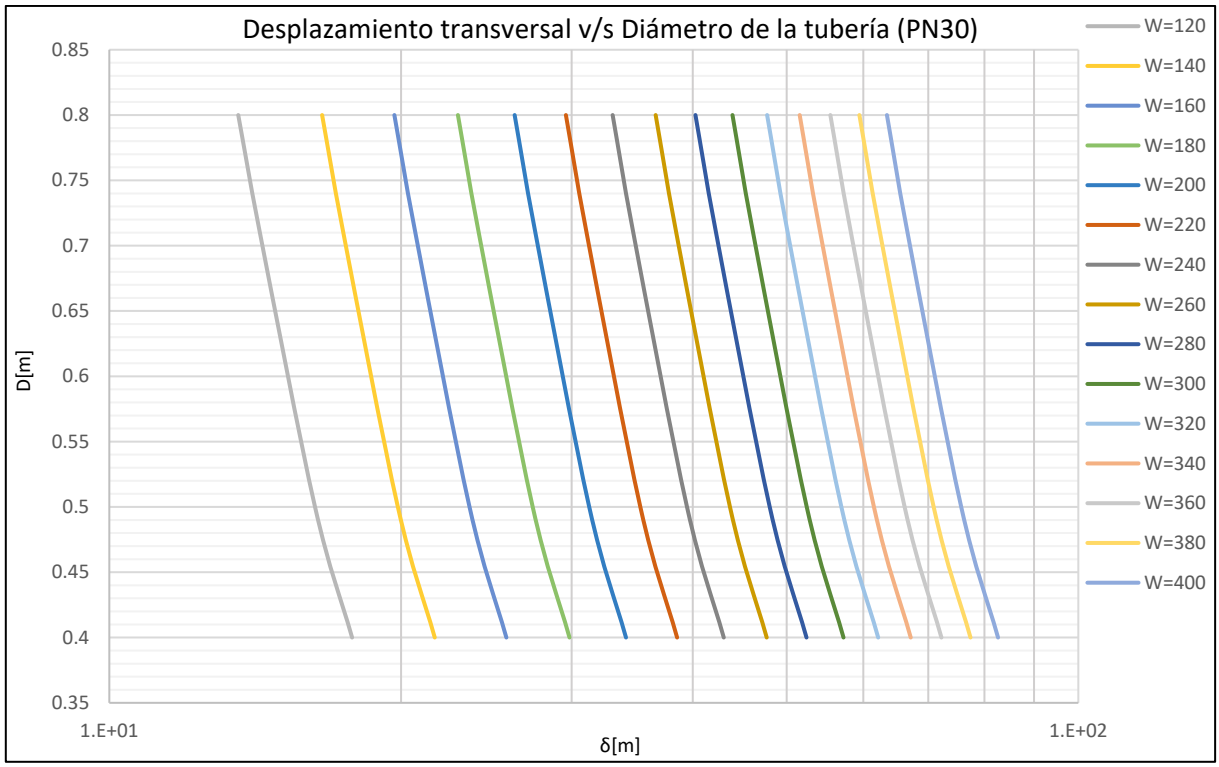


Gráfico 13-149: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN30, Suelo Arena Fina.

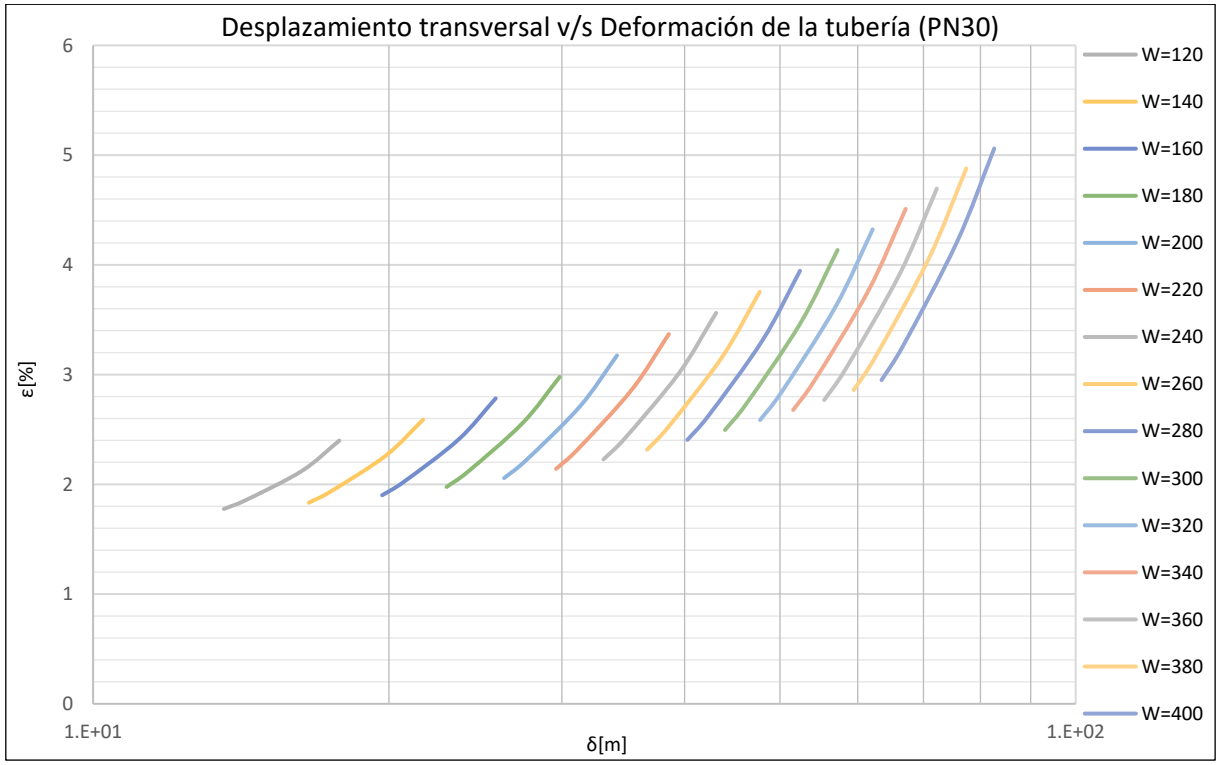


Gráfico 13-150: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN30, Suelo Arena Fina.

- **Tipo Suelo 2: Arena Gruesa**

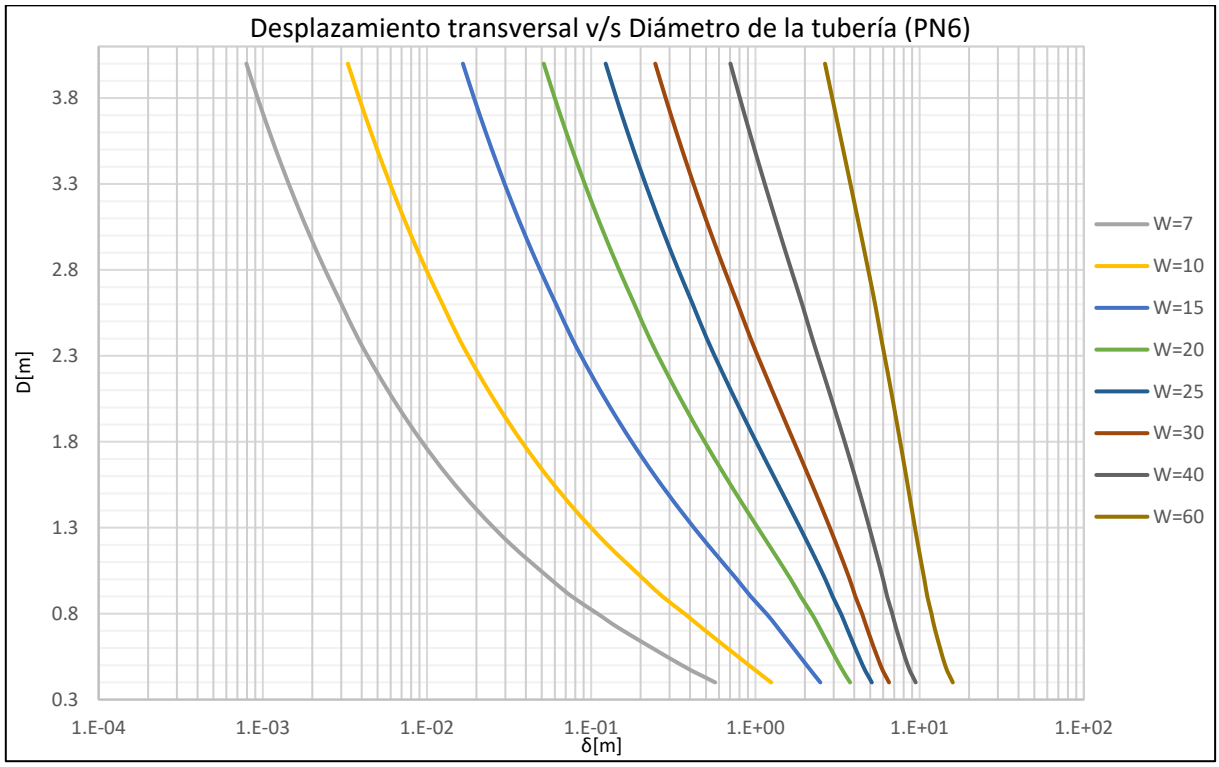


Gráfico 13-151: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Arena gruesa.

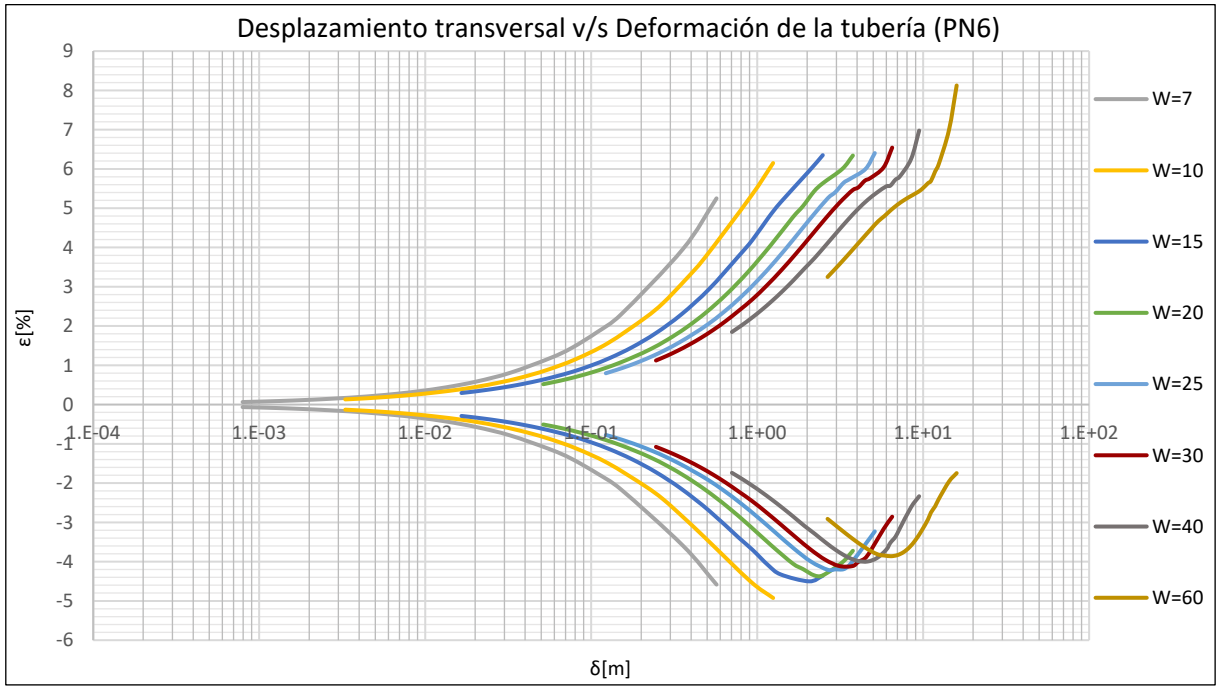


Gráfico 13-152: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Arena gruesa.

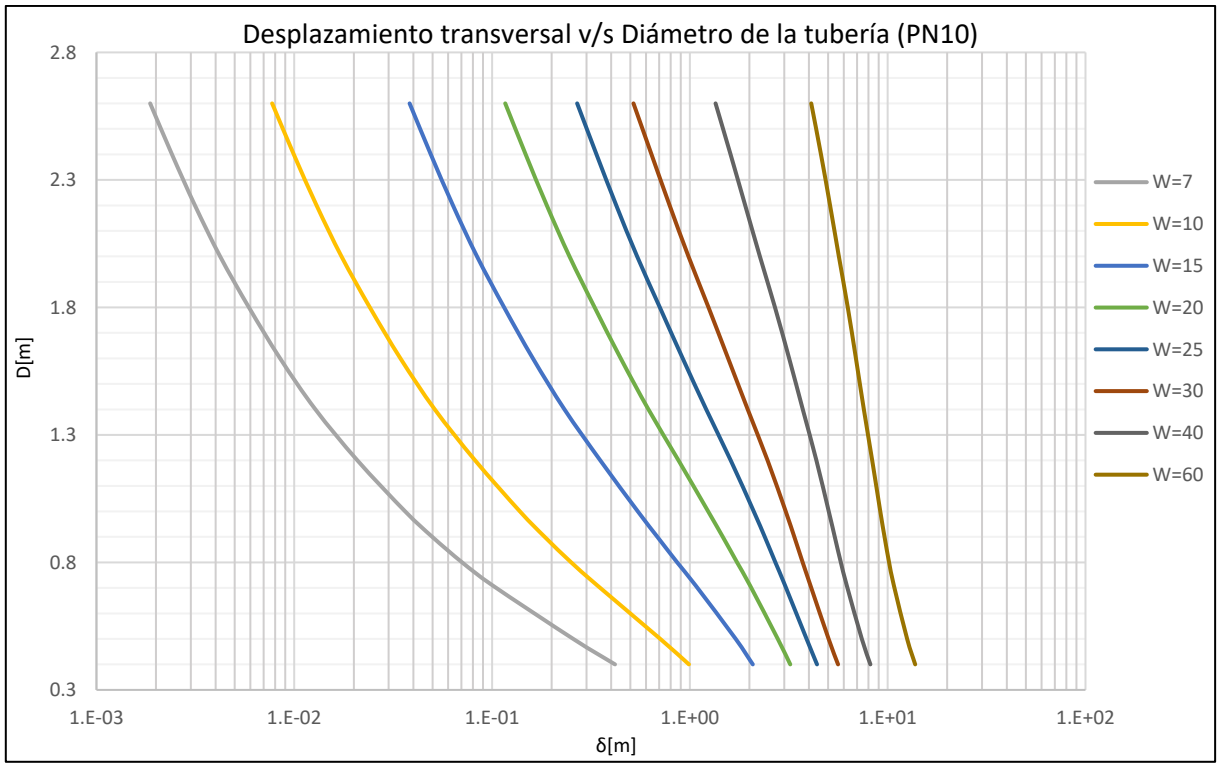


Gráfico 13-153: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Arena gruesa.

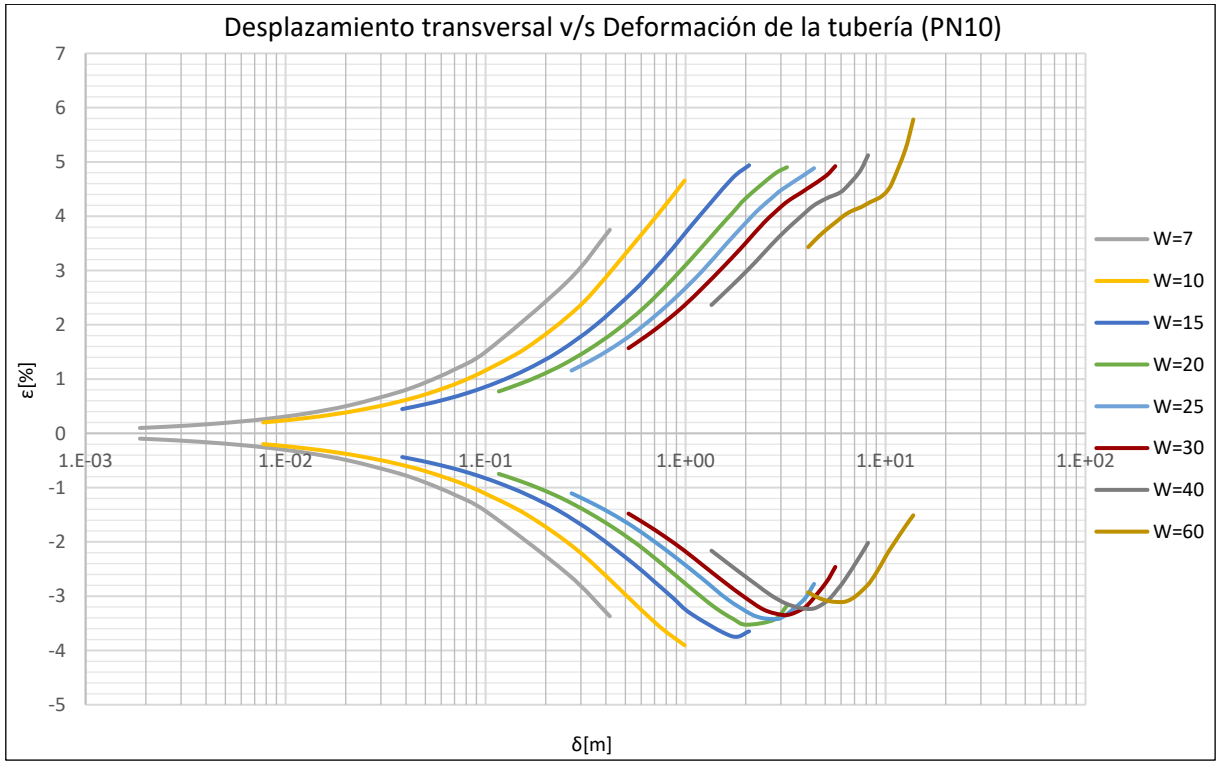


Gráfico 13-154: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Arena gruesa.

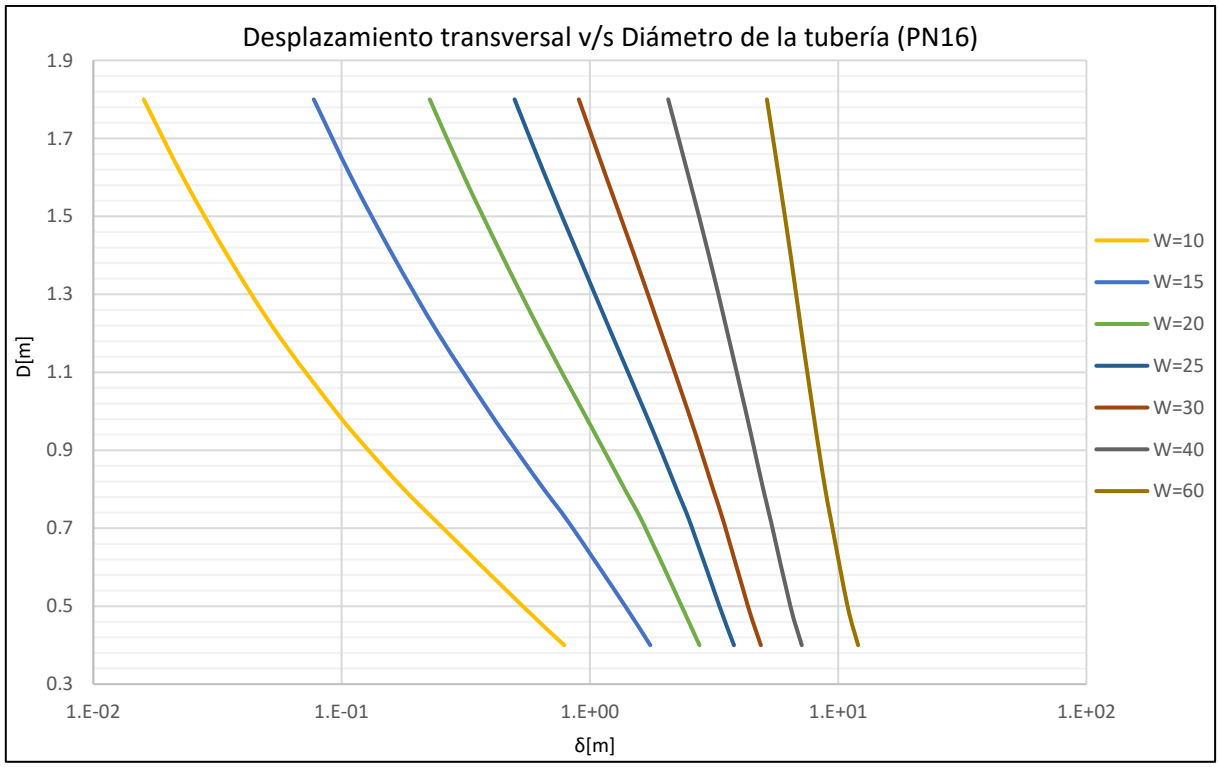


Gráfico 13-155: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Arena gruesa.

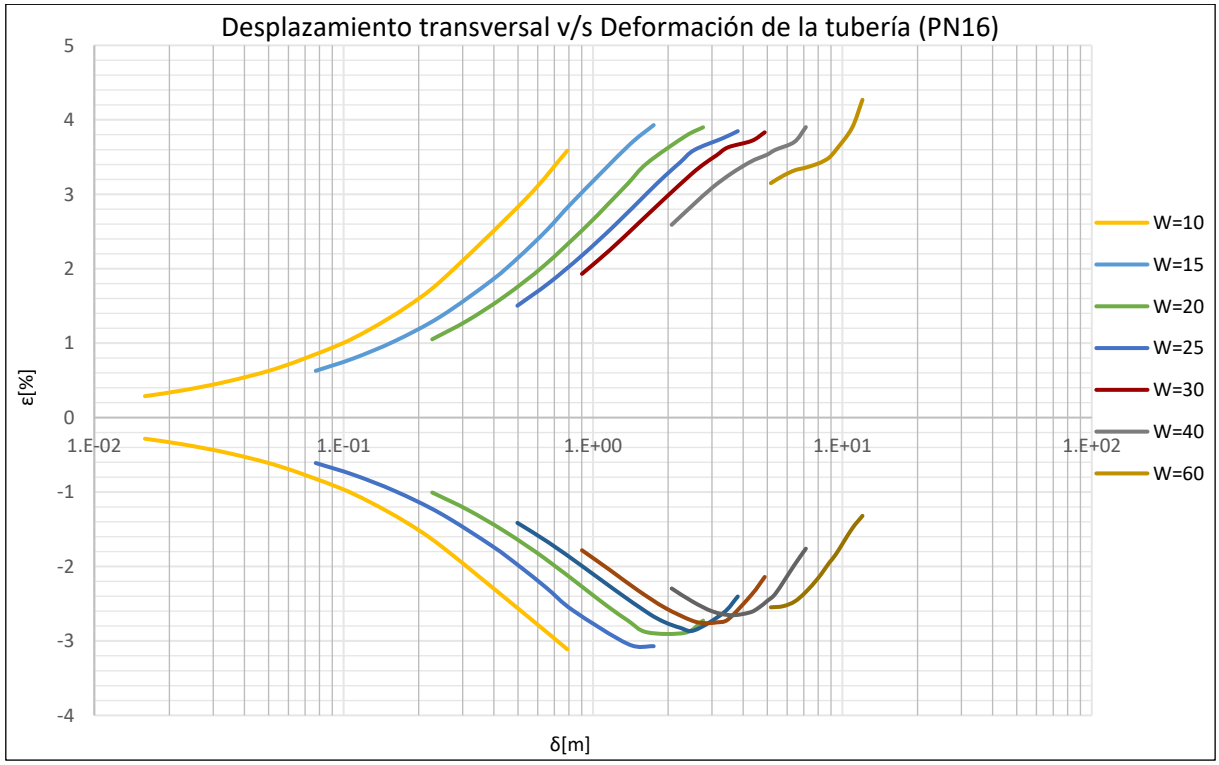


Gráfico 13-156: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Arena gruesa.

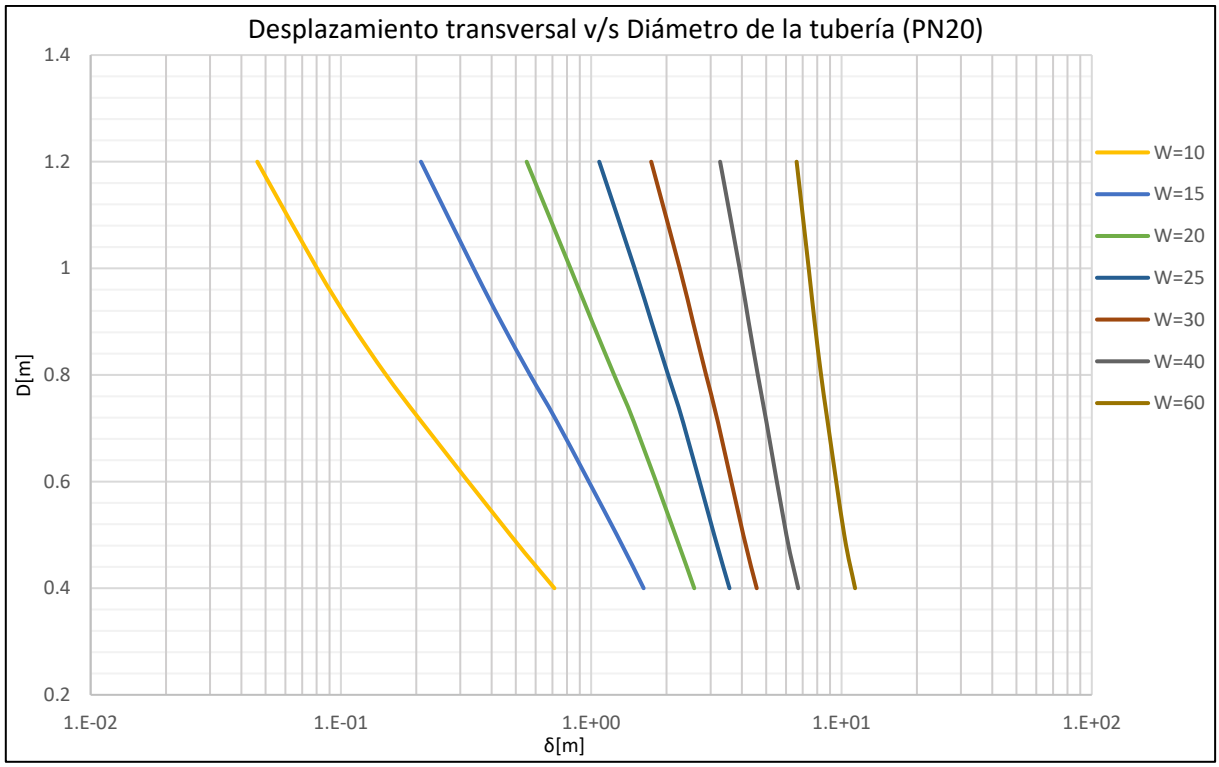


Gráfico 13-157: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Arena gruesa.

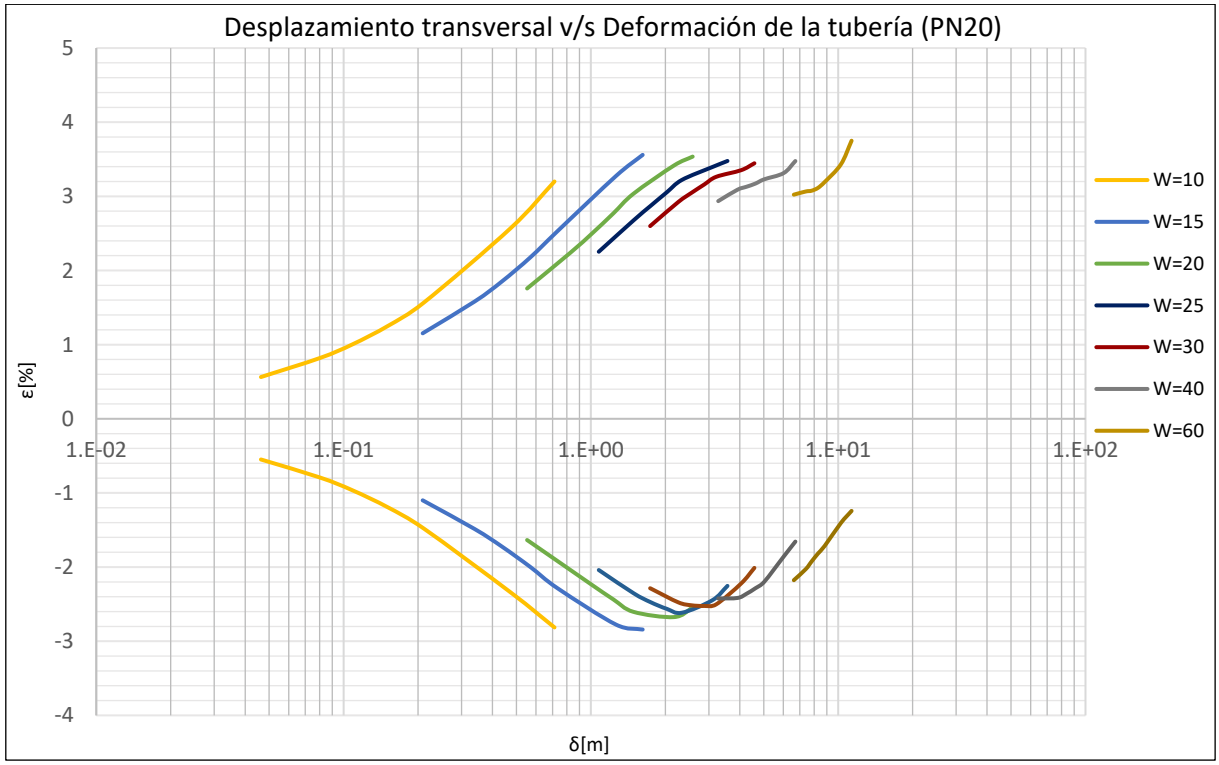


Gráfico 13-158: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Arena gruesa.

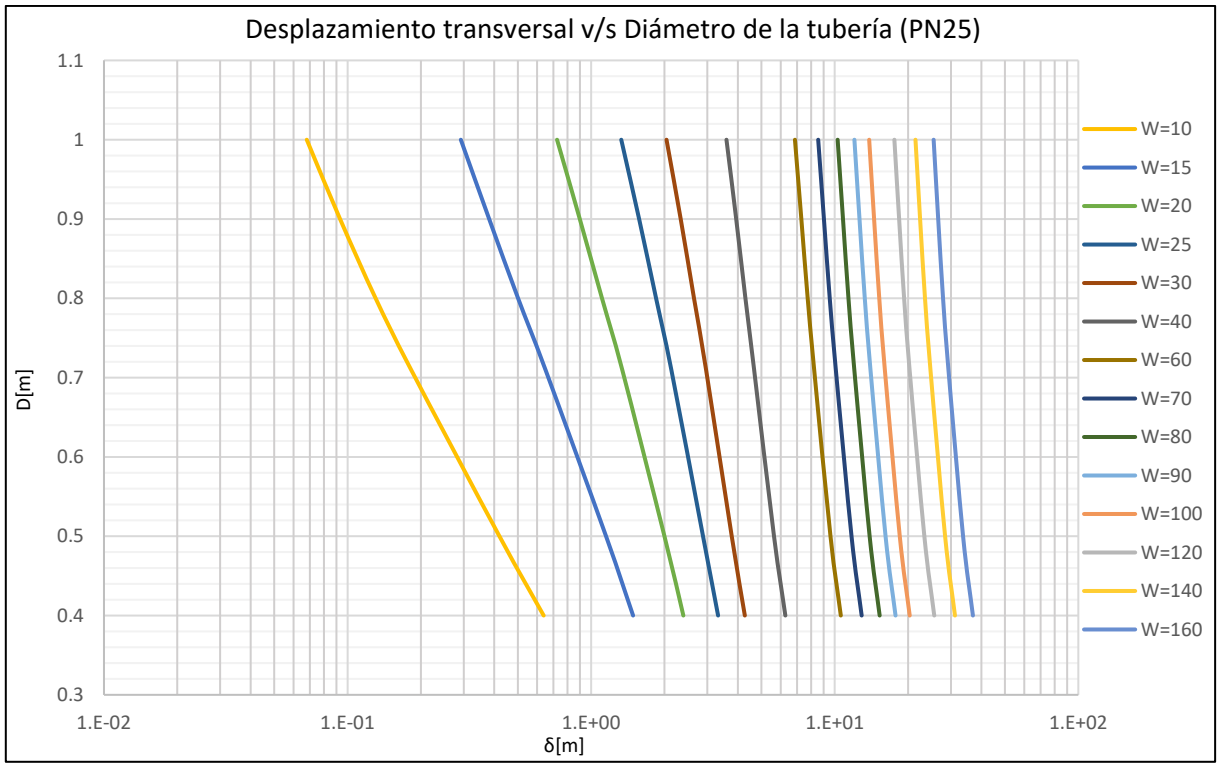


Gráfico 13-159: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN25, Suelo Arena gruesa.

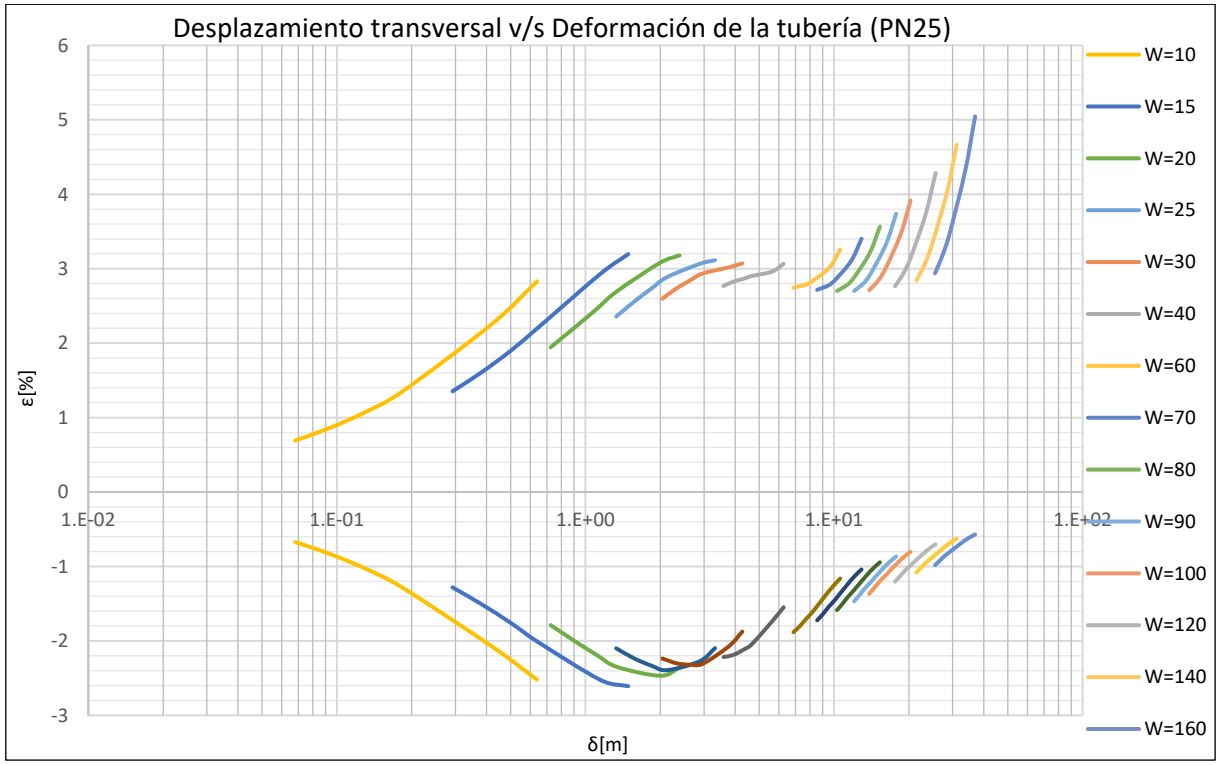


Gráfico 13-160: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN25, Suelo Arena gruesa.

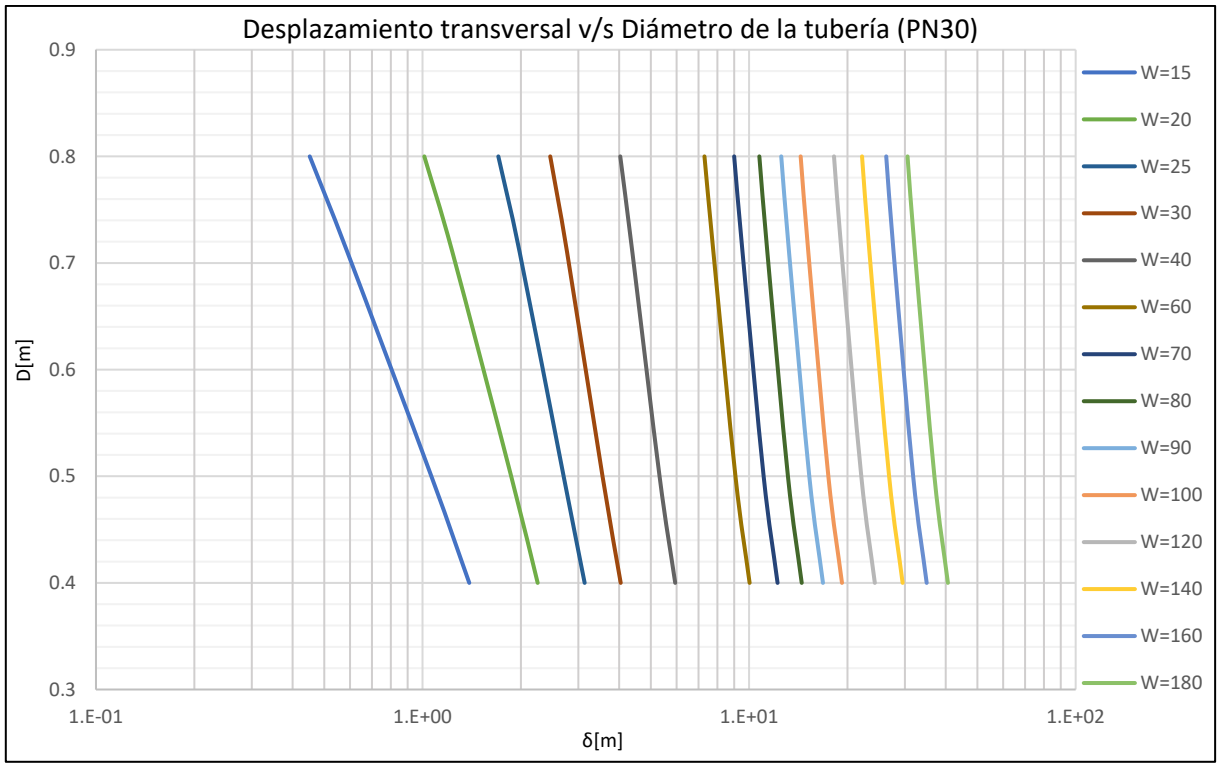


Gráfico 13-161: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN30, Suelo Arena gruesa.

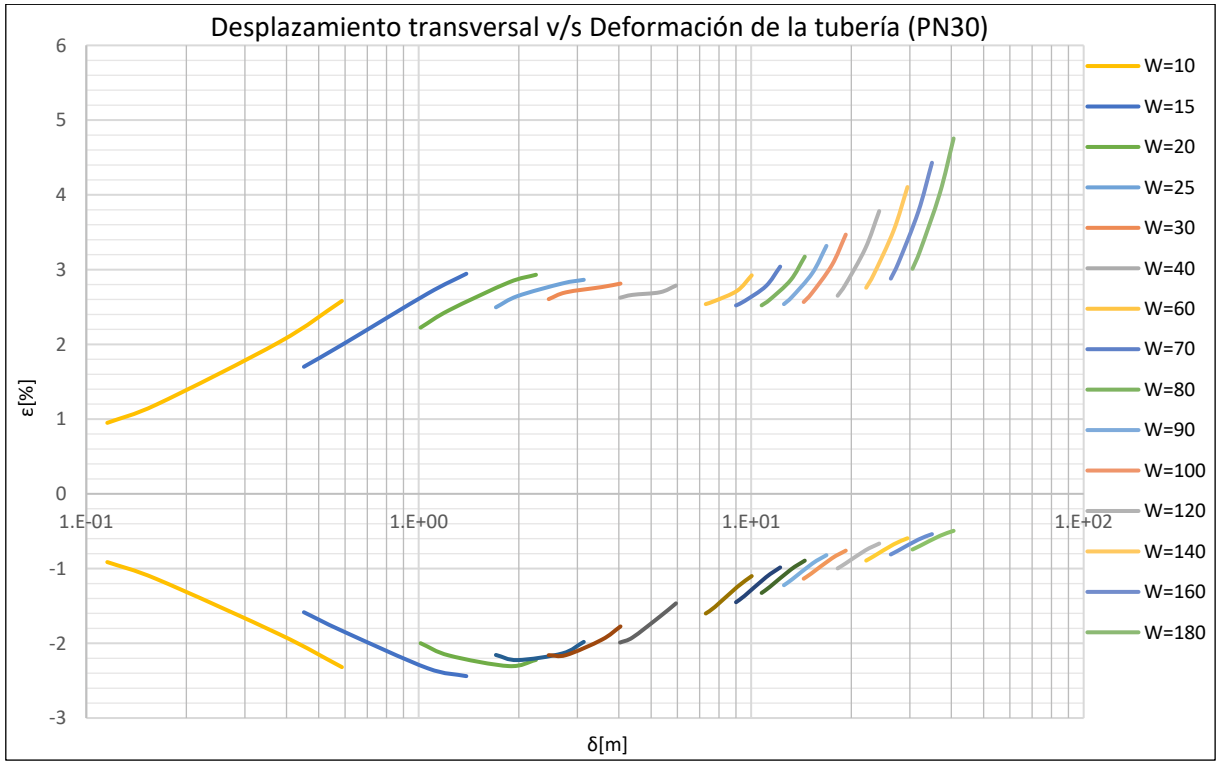


Gráfico 13-162: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN30, Suelo Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

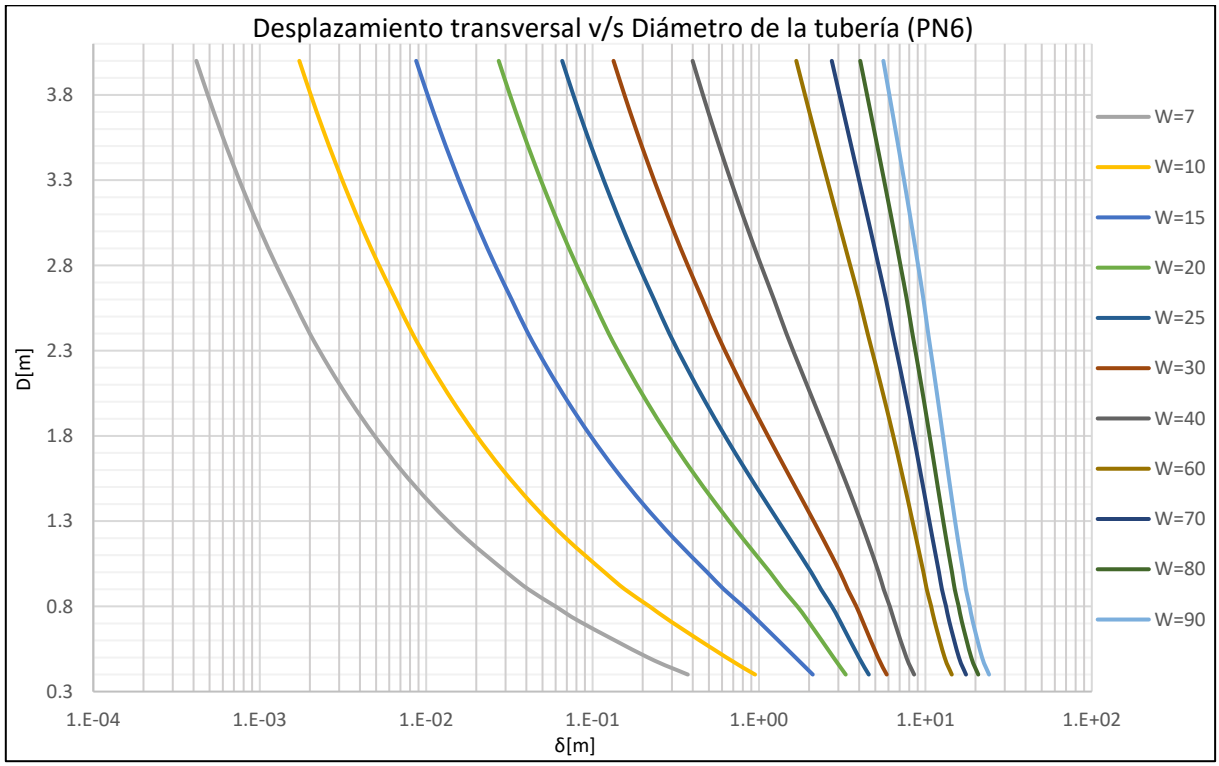


Gráfico 13-163: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

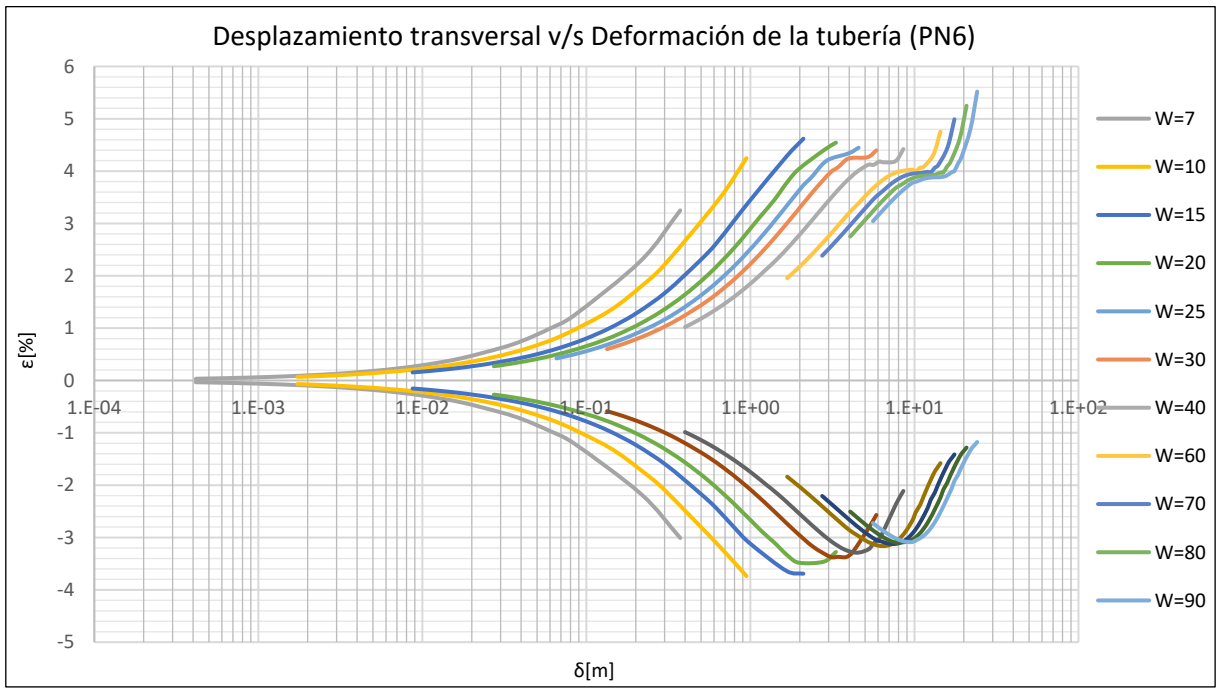


Gráfico 13-164: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN6, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

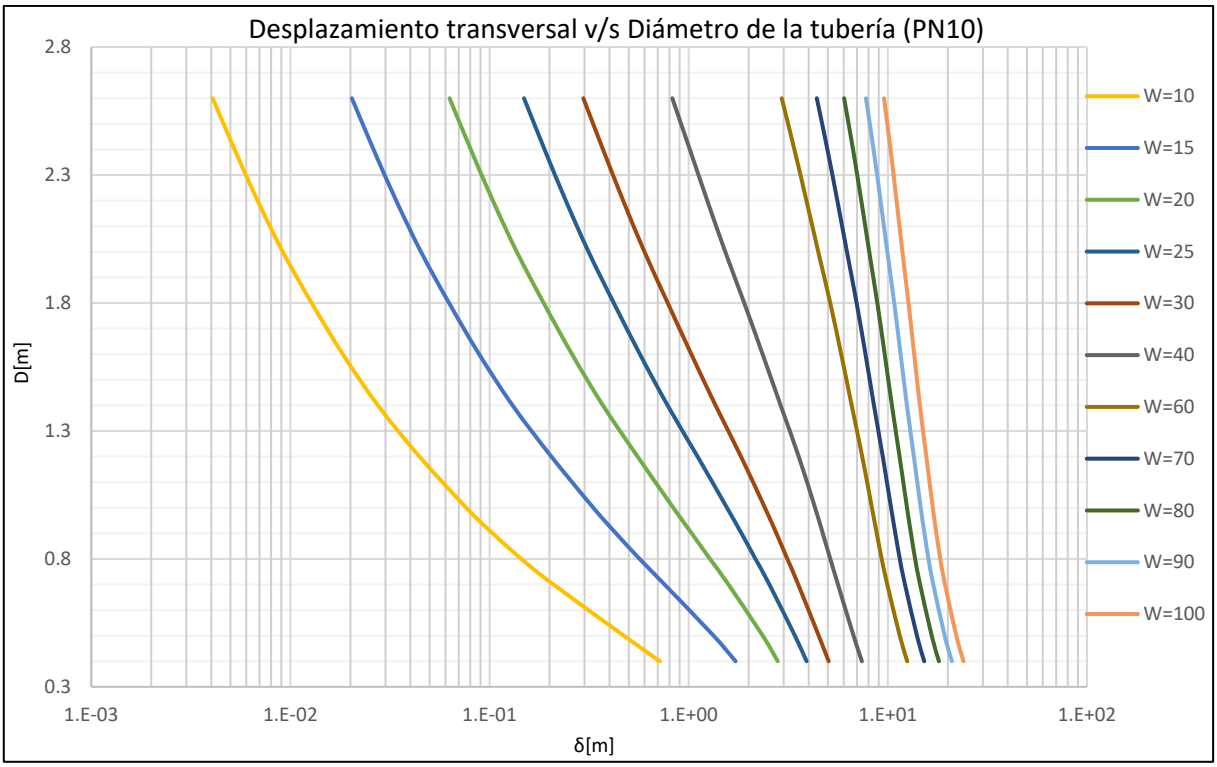


Gráfico 13-165: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

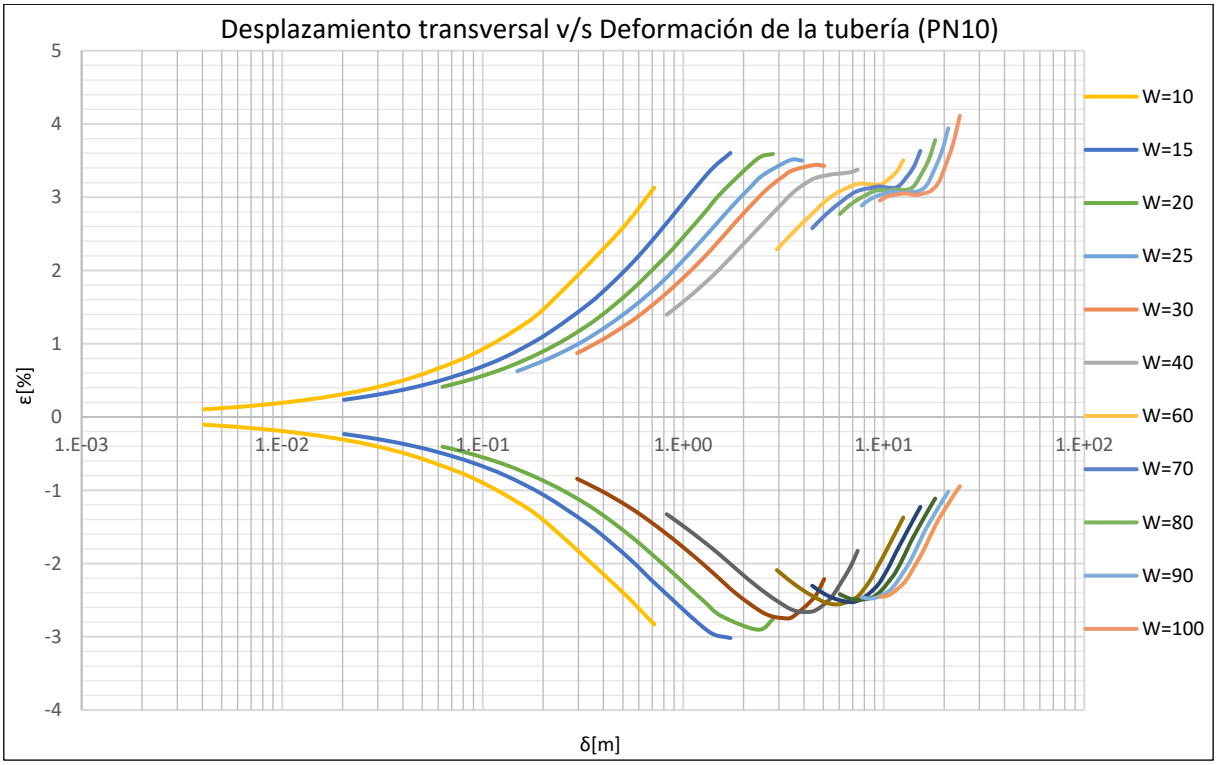


Gráfico 13-166: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN10, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

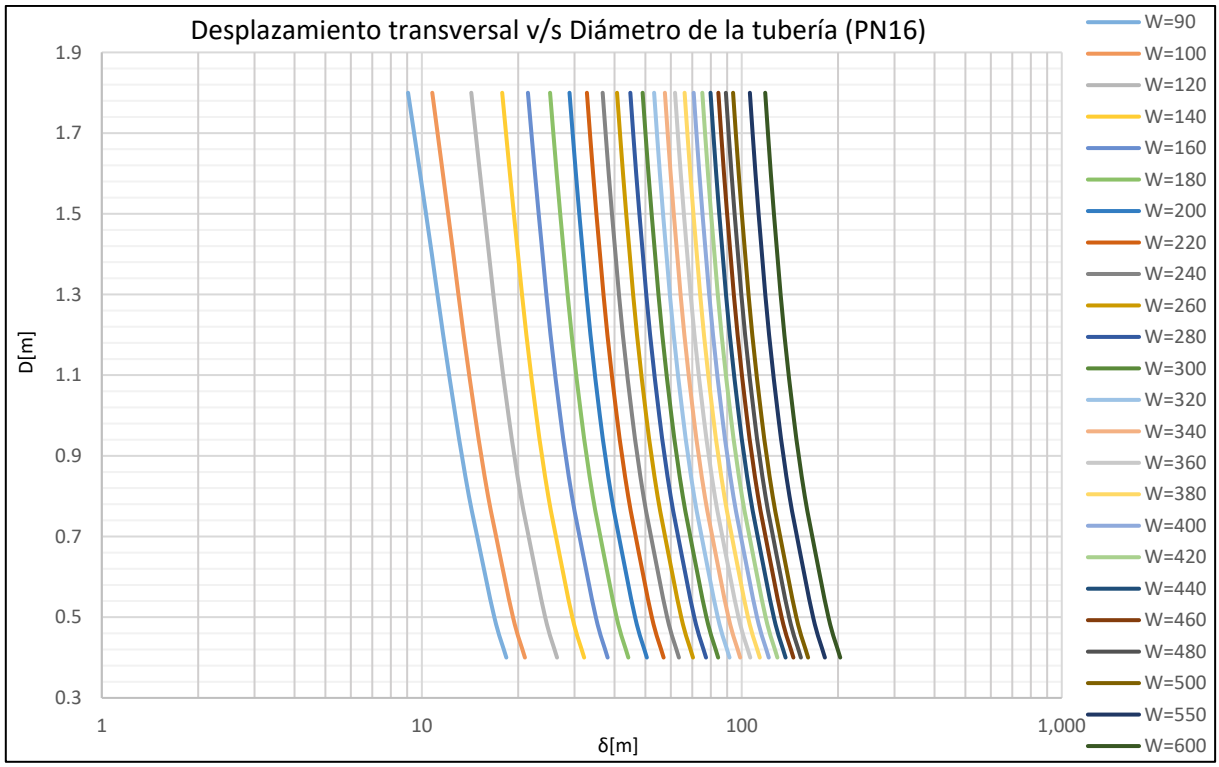


Gráfico 13-167: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

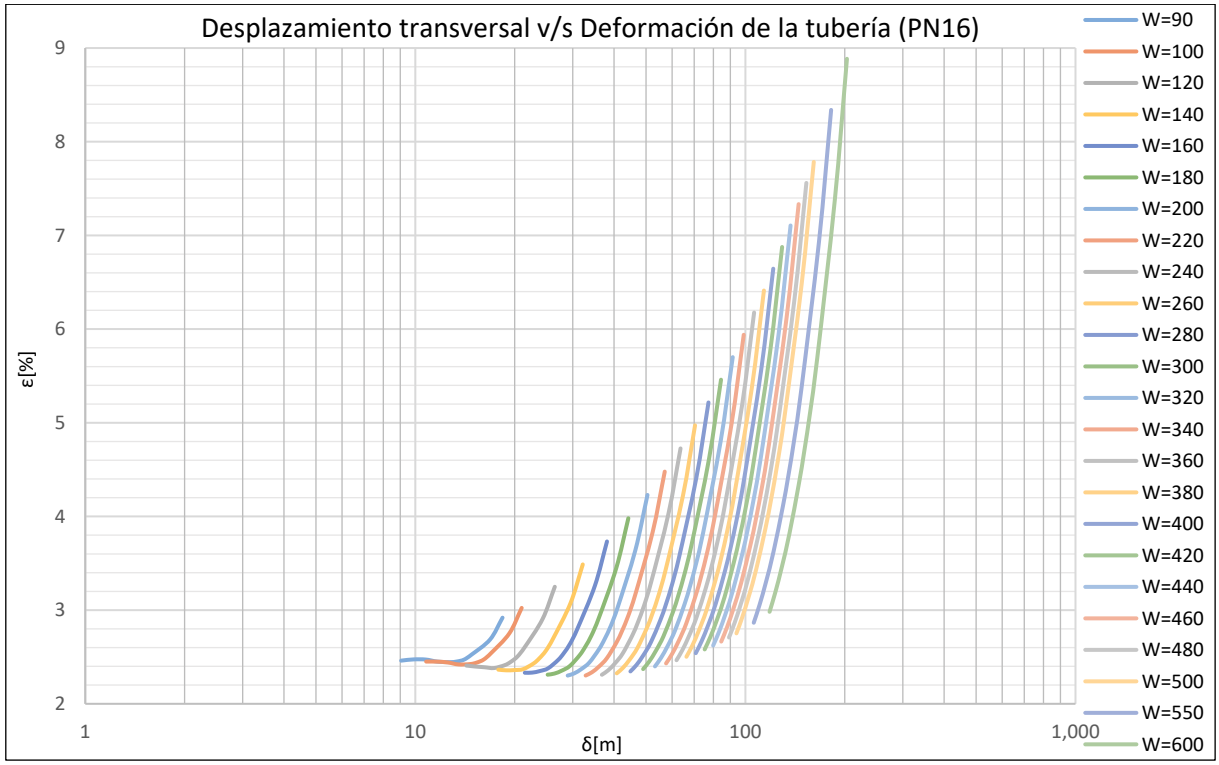


Gráfico 13-168: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN16, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

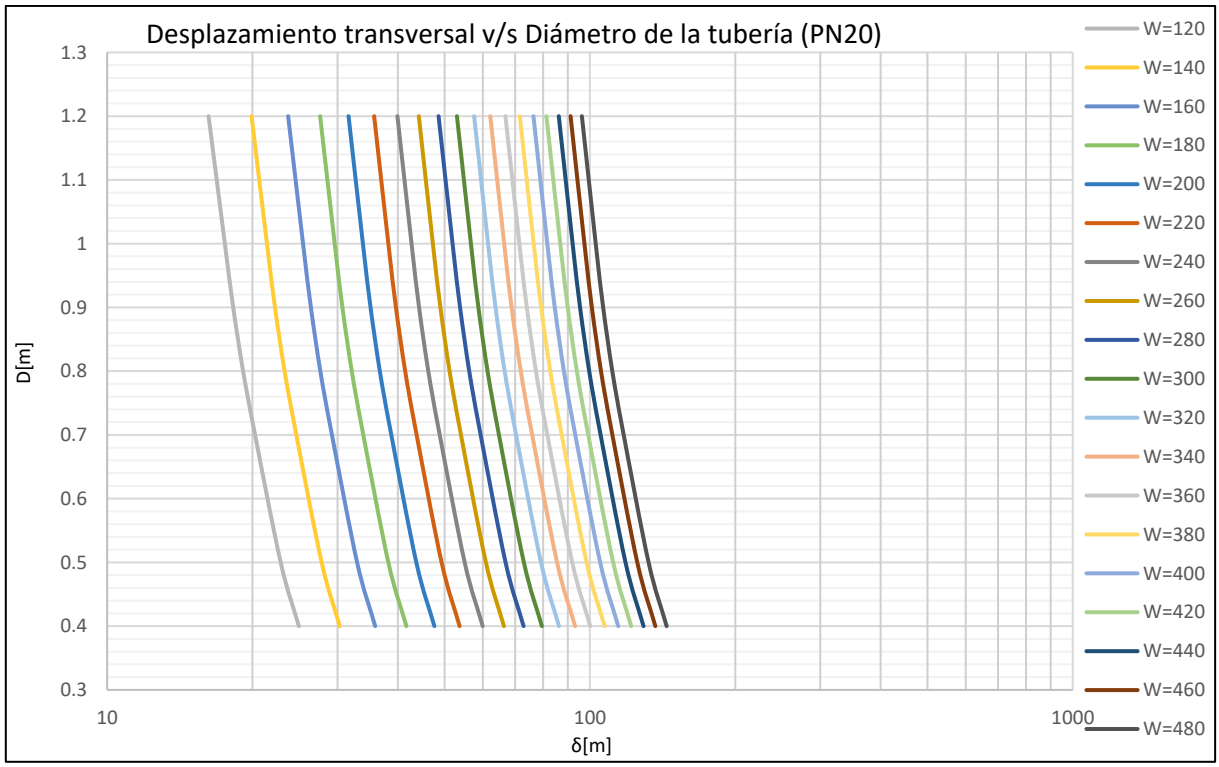


Gráfico 13-169: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

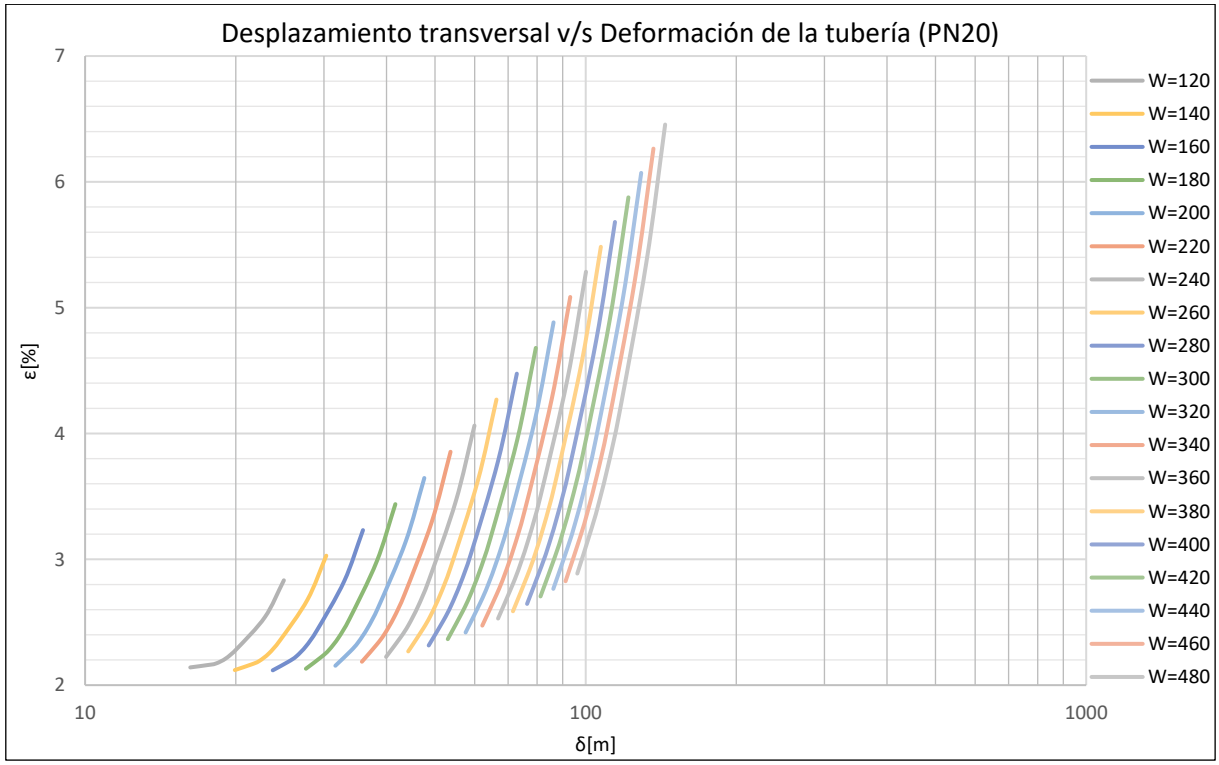


Gráfico 13-170: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN20, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

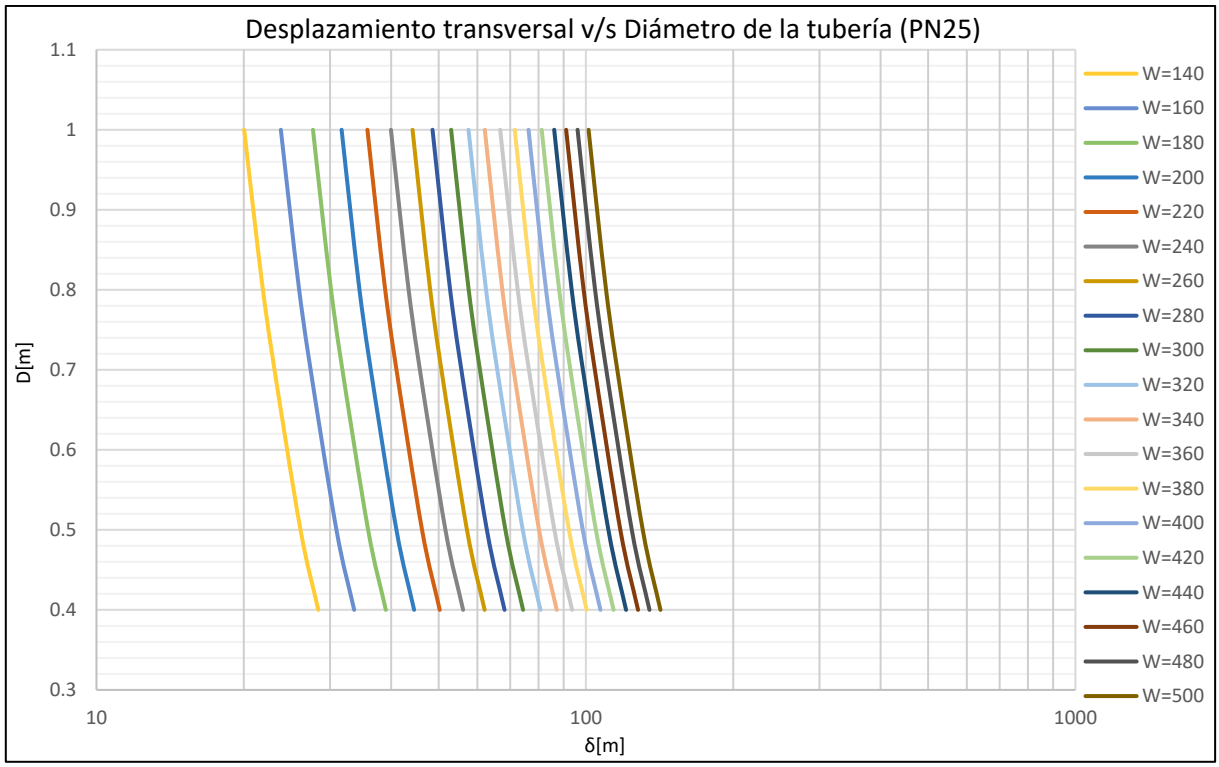


Gráfico 13-171: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN25, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

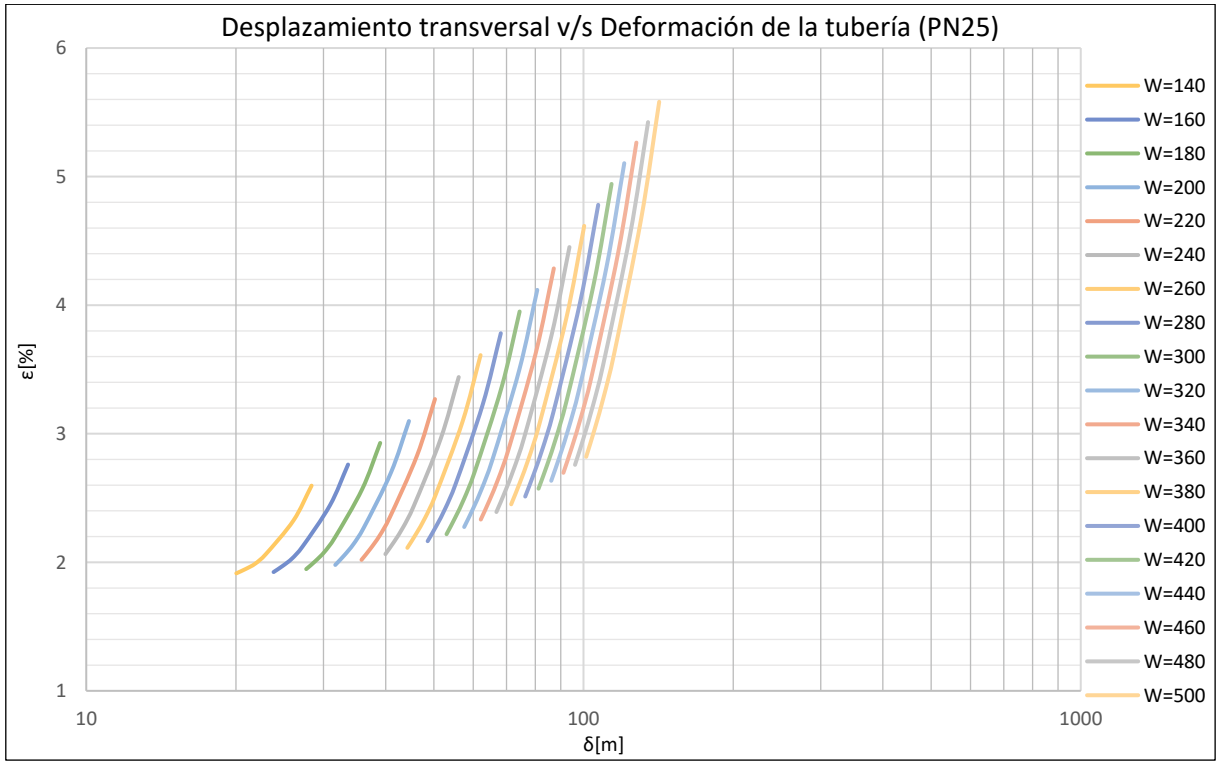


Gráfico 13-172: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN25, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

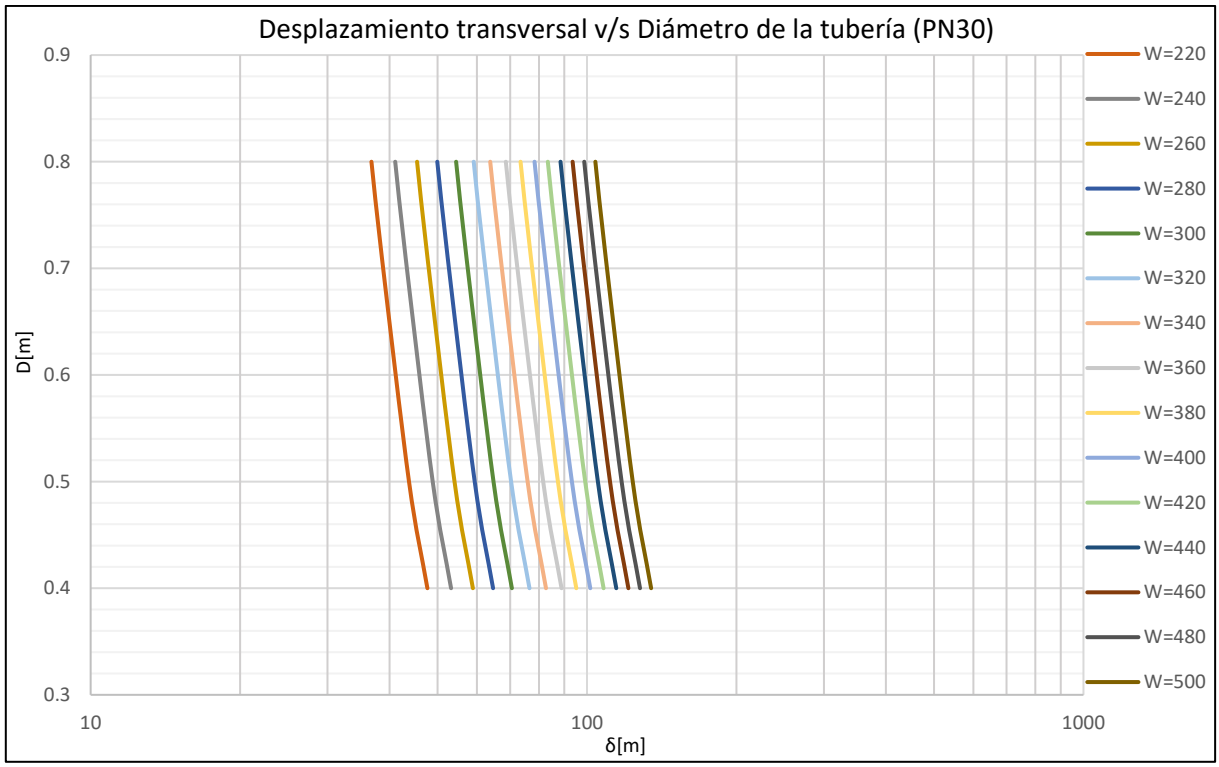


Gráfico 13-173: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN30, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

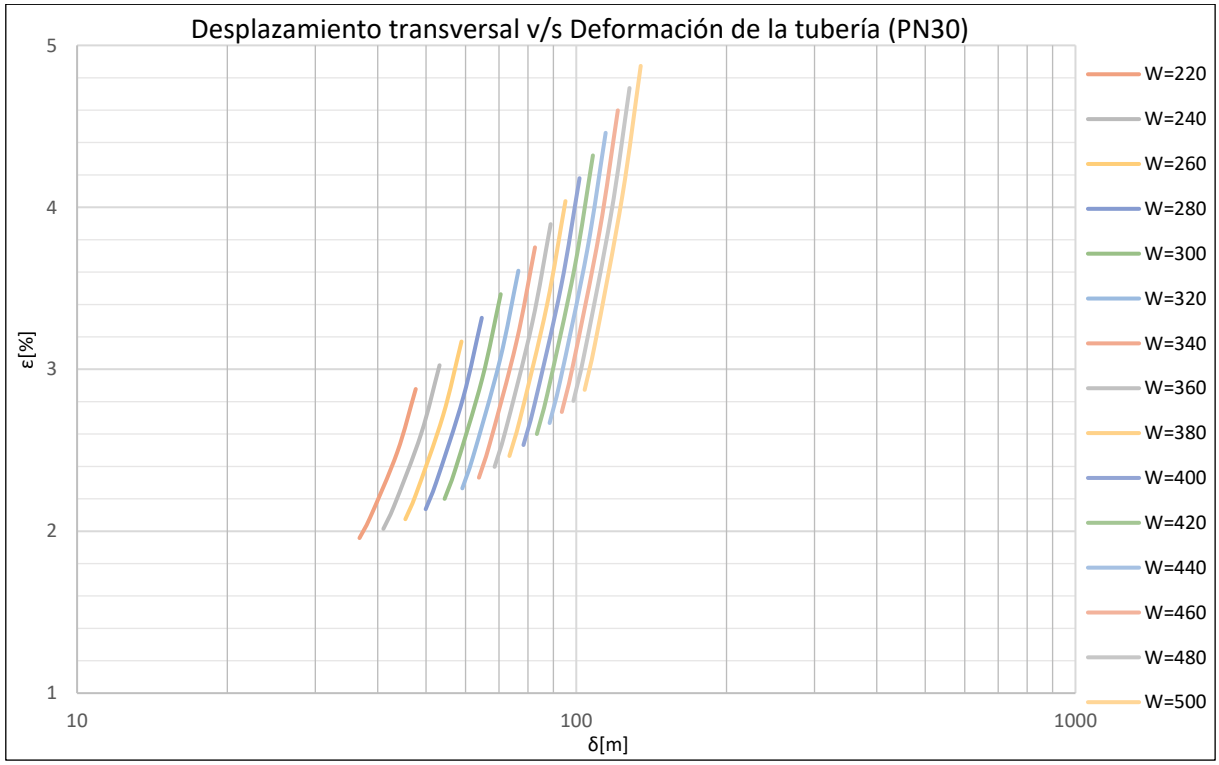


Gráfico 13-174: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE densidad PE200 y Presión máxima nominal PN30, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

k.3. Tuberías de Hierro Dúctil

- **Tipo de Suelo 1: Arena Fina**

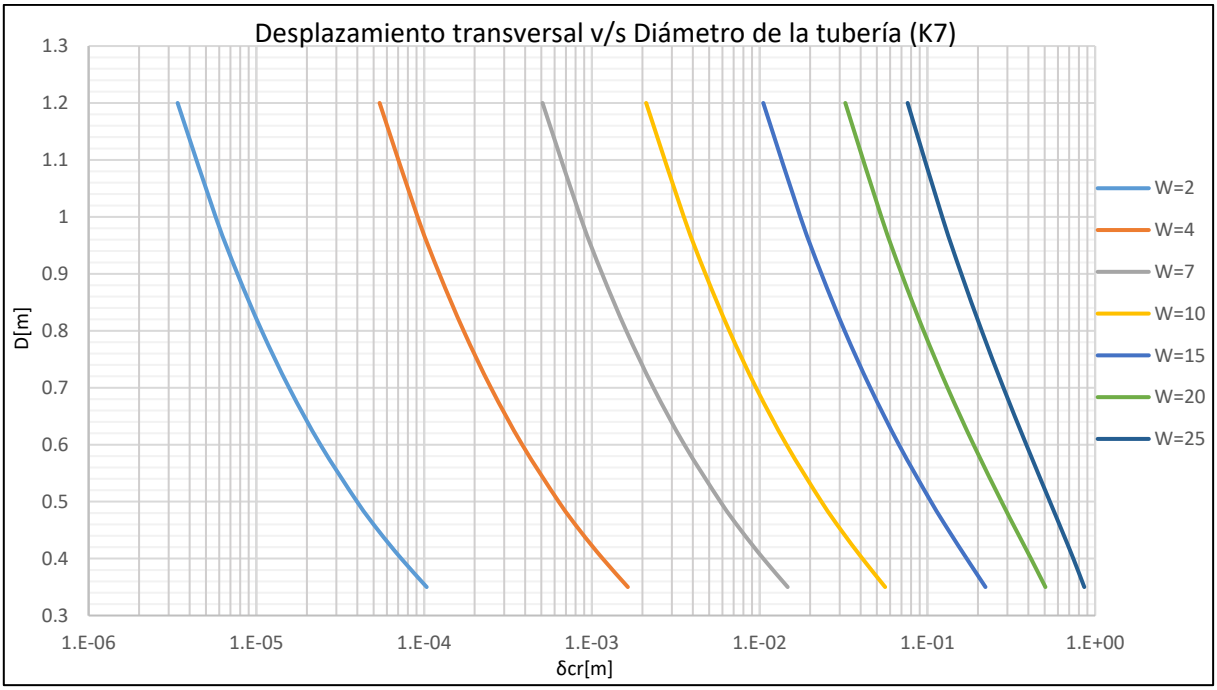


Gráfico 13-175: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K7, Suelo Arena Fina.

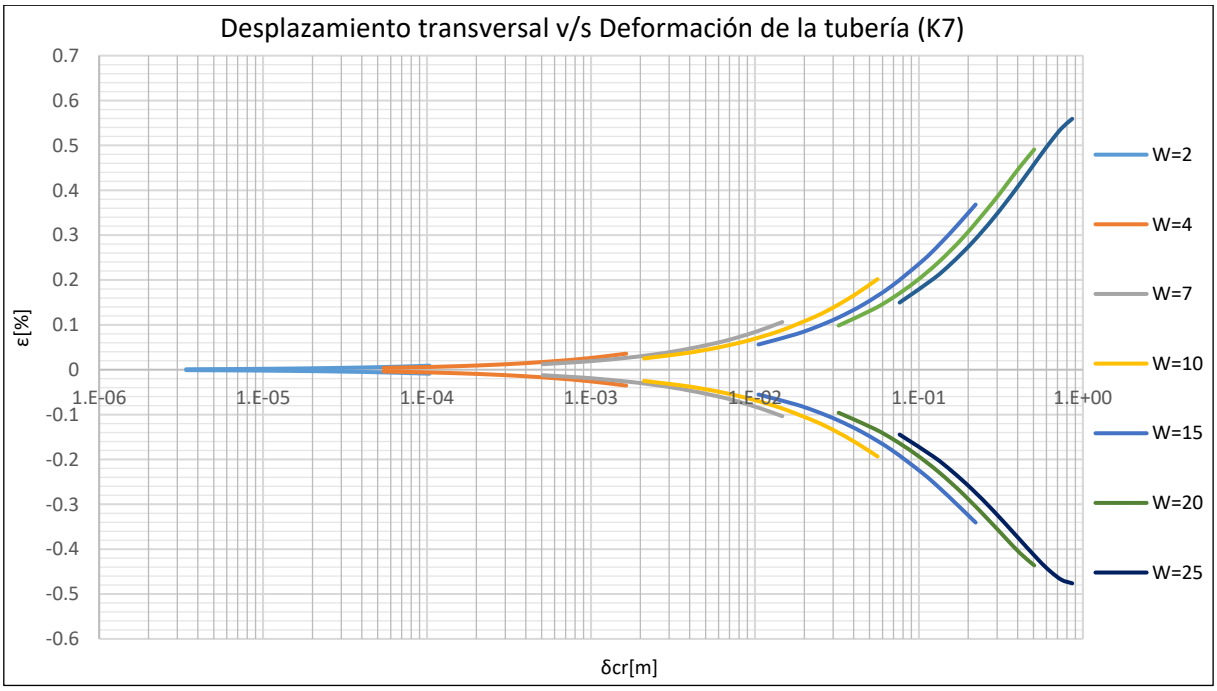


Gráfico 13-176: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K7, Suelo Arena Fina.

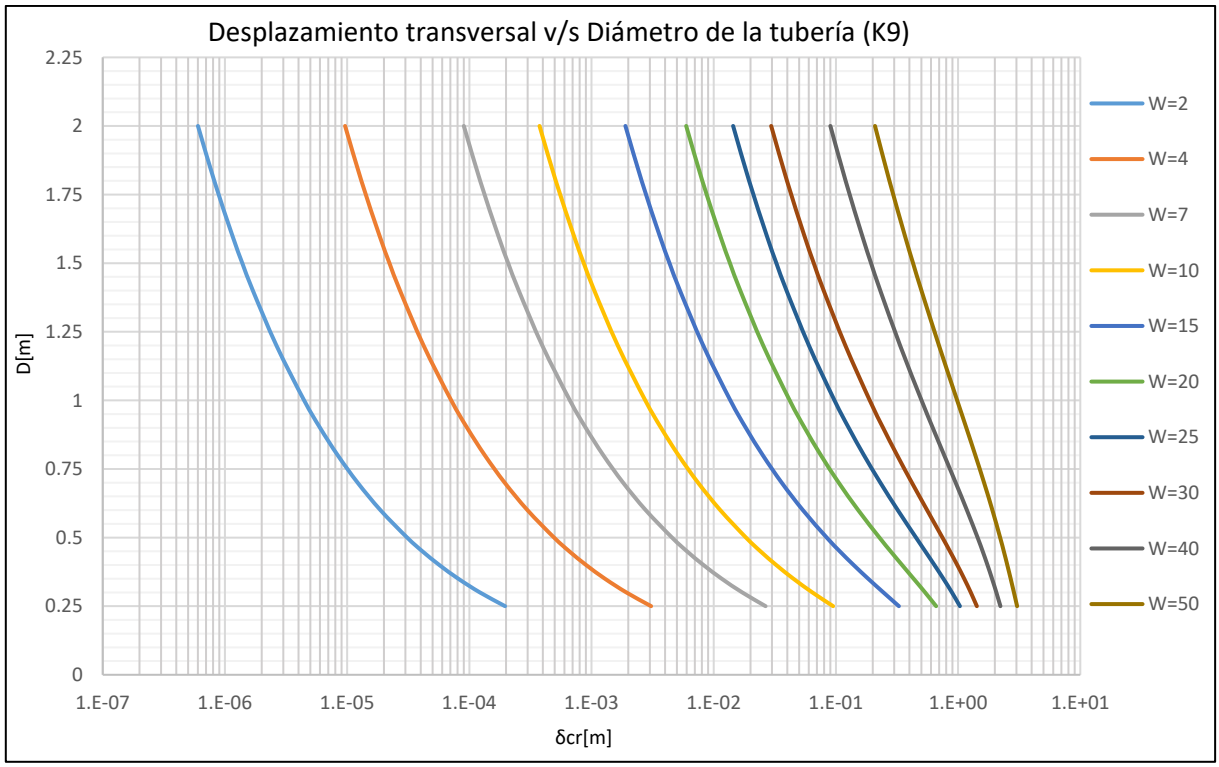


Gráfico 13-177: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K9, Suelo Arena Fina.

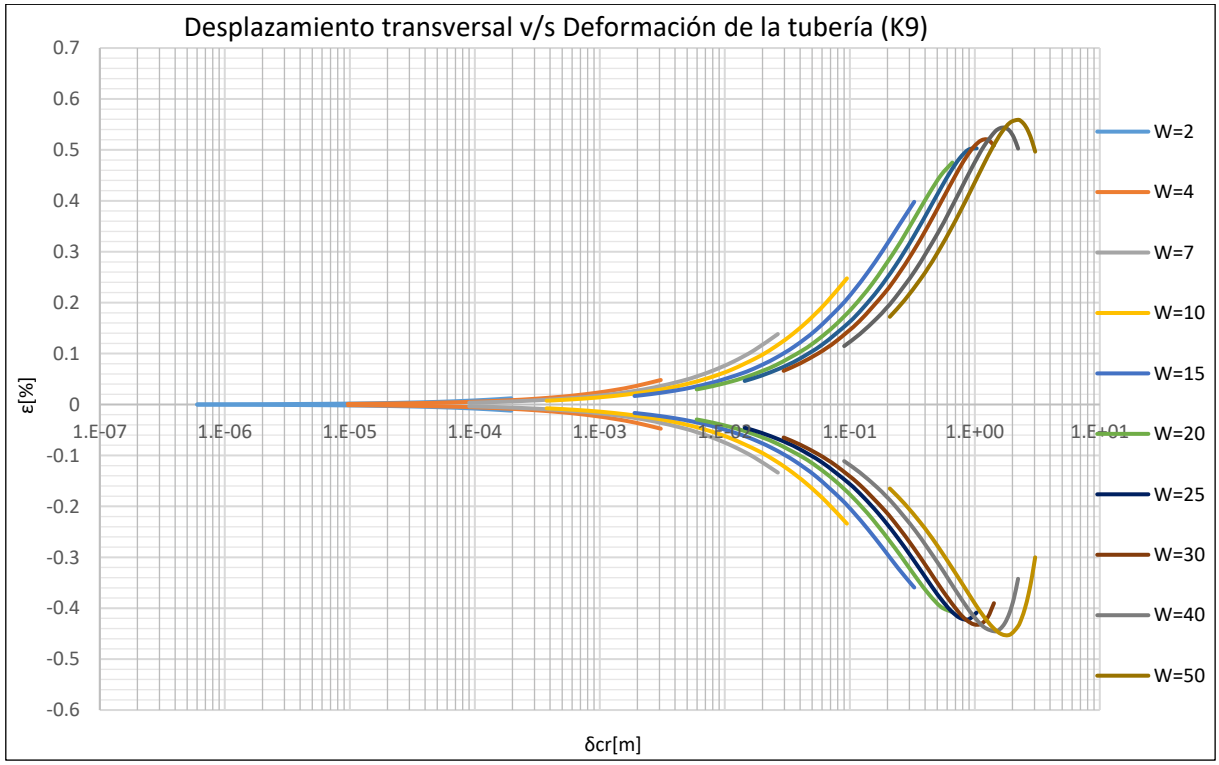


Gráfico 13-178: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K9, Suelo Arena Fina.

- **Suelo tipo 2: Arena Gruesa**

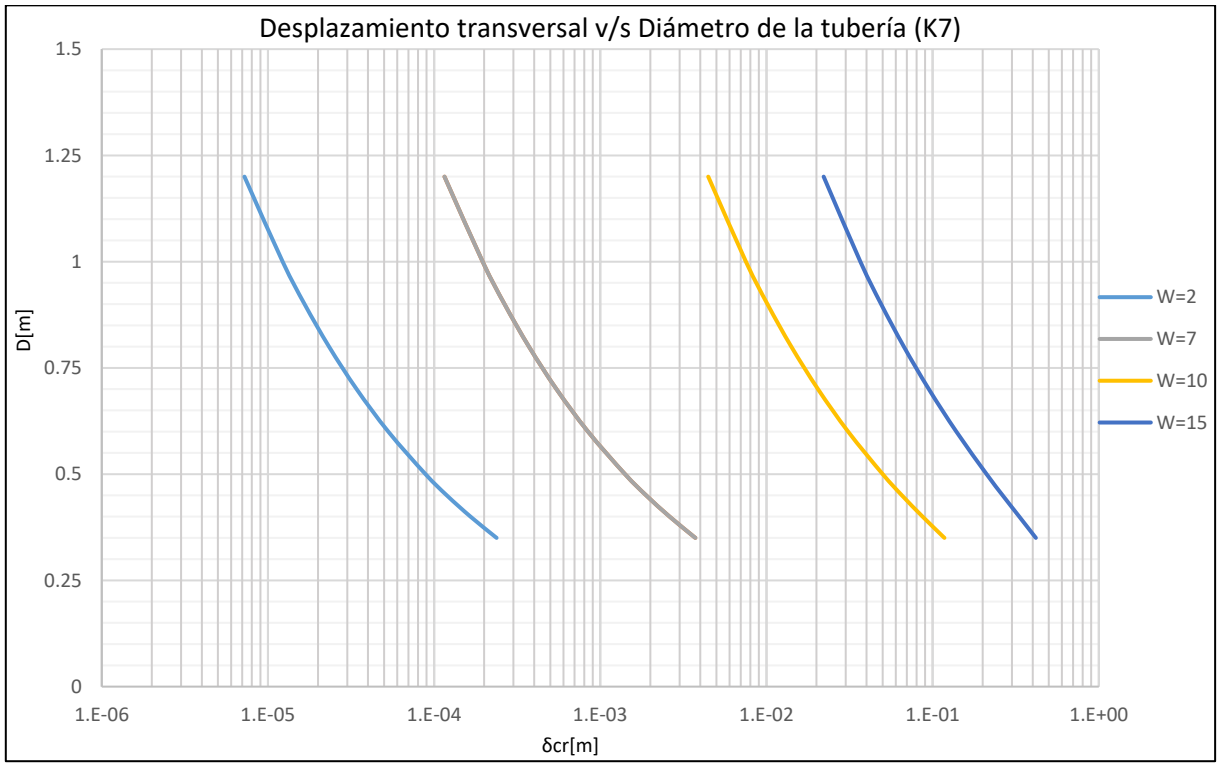


Gráfico 13-179: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K7, Suelo Arena gruesa.

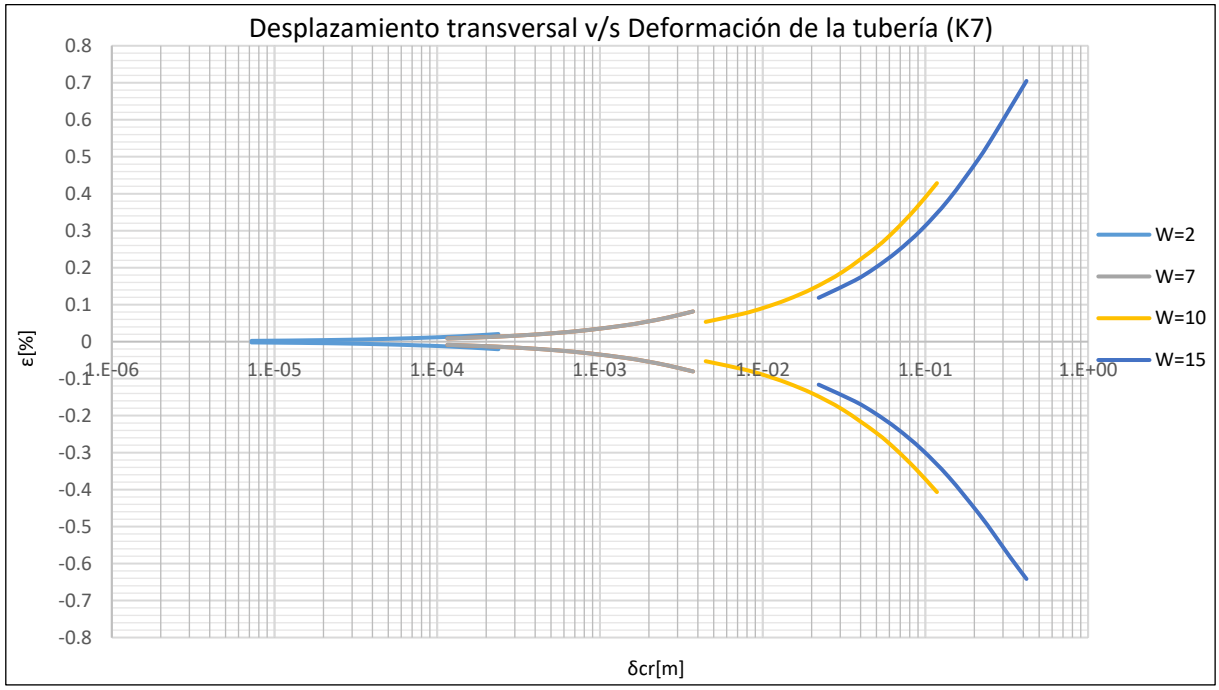


Gráfico 13-180: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K7, Suelo Arena gruesa.

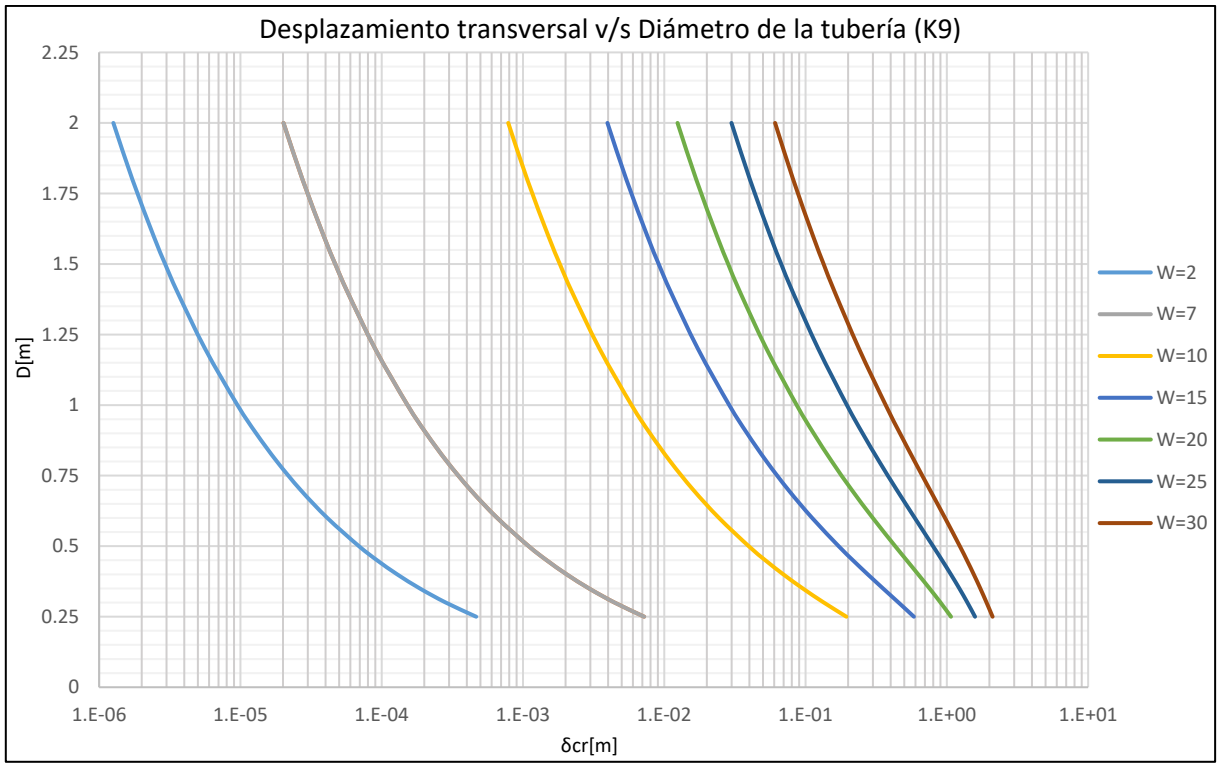


Gráfico 13-181: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K9, Suelo Arena gruesa.

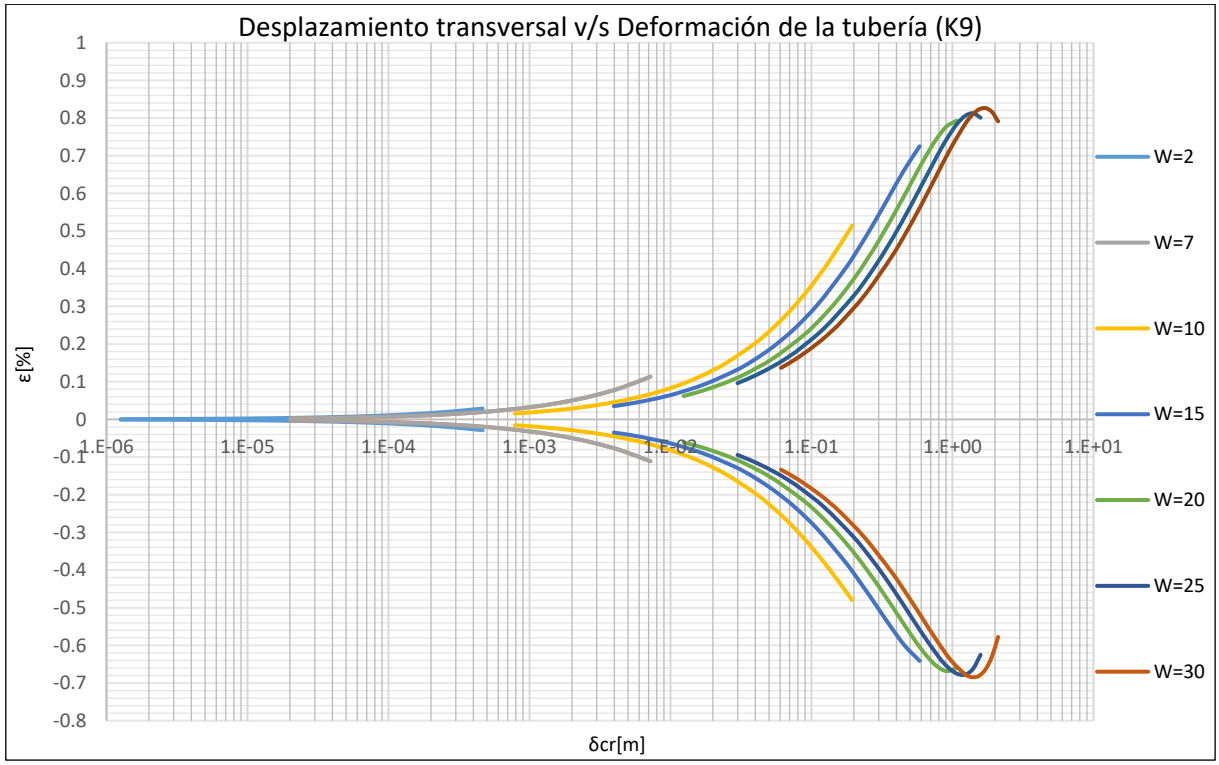


Gráfico 13-182: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K9, Suelo Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

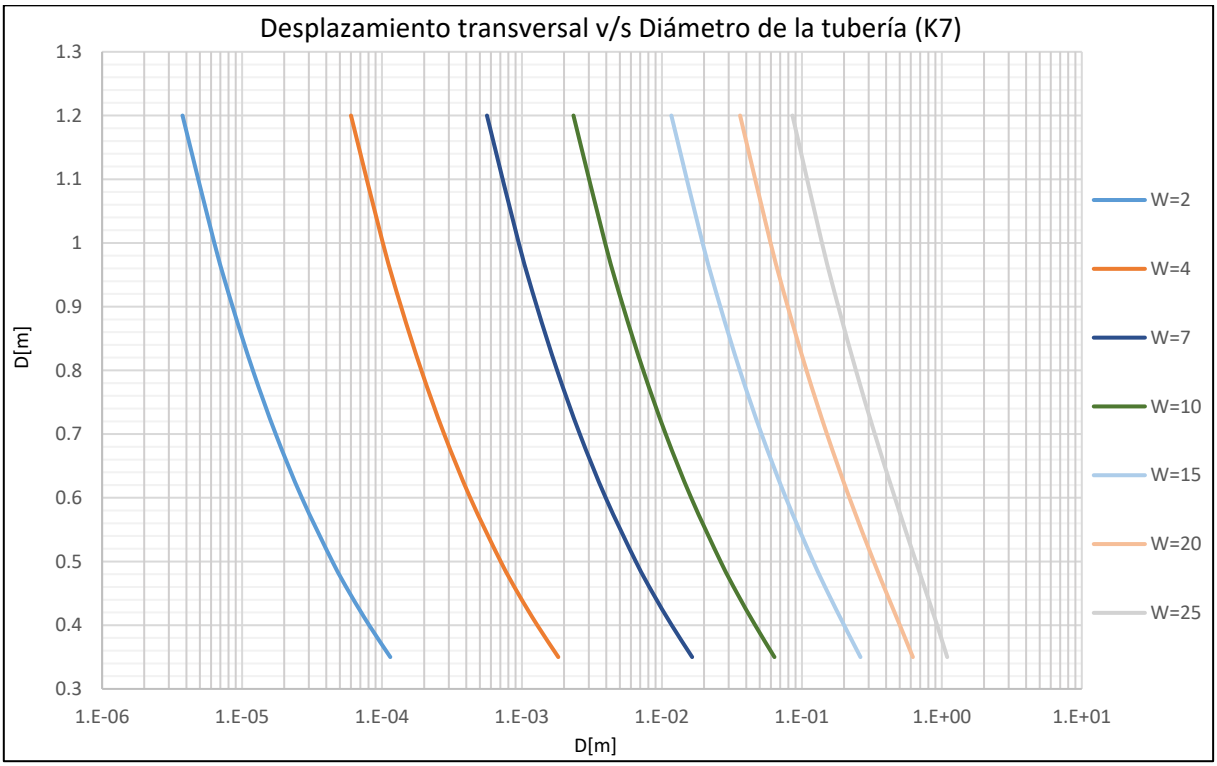


Gráfico 13-183: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K7, Suelo de Baja Plasticidad.

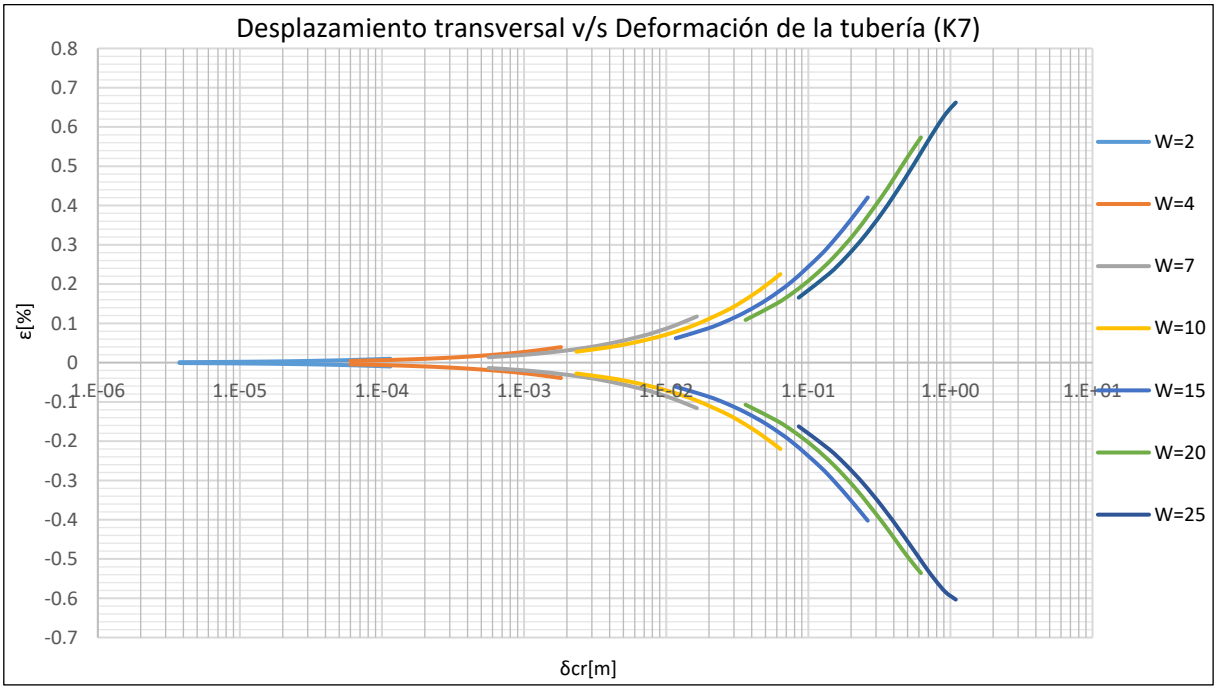


Gráfico 13-184: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K7, Suelo de Baja Plasticidad.

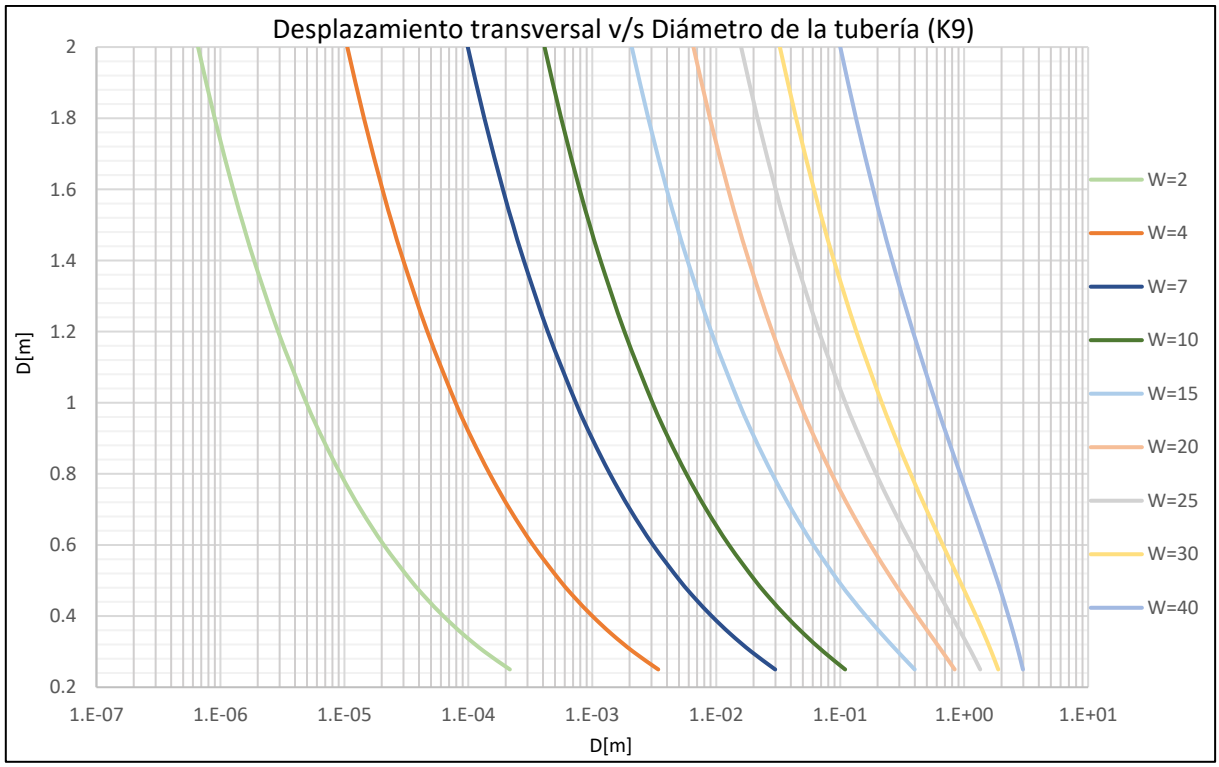


Gráfico 13-185: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K9, Suelo de Baja Plasticidad.

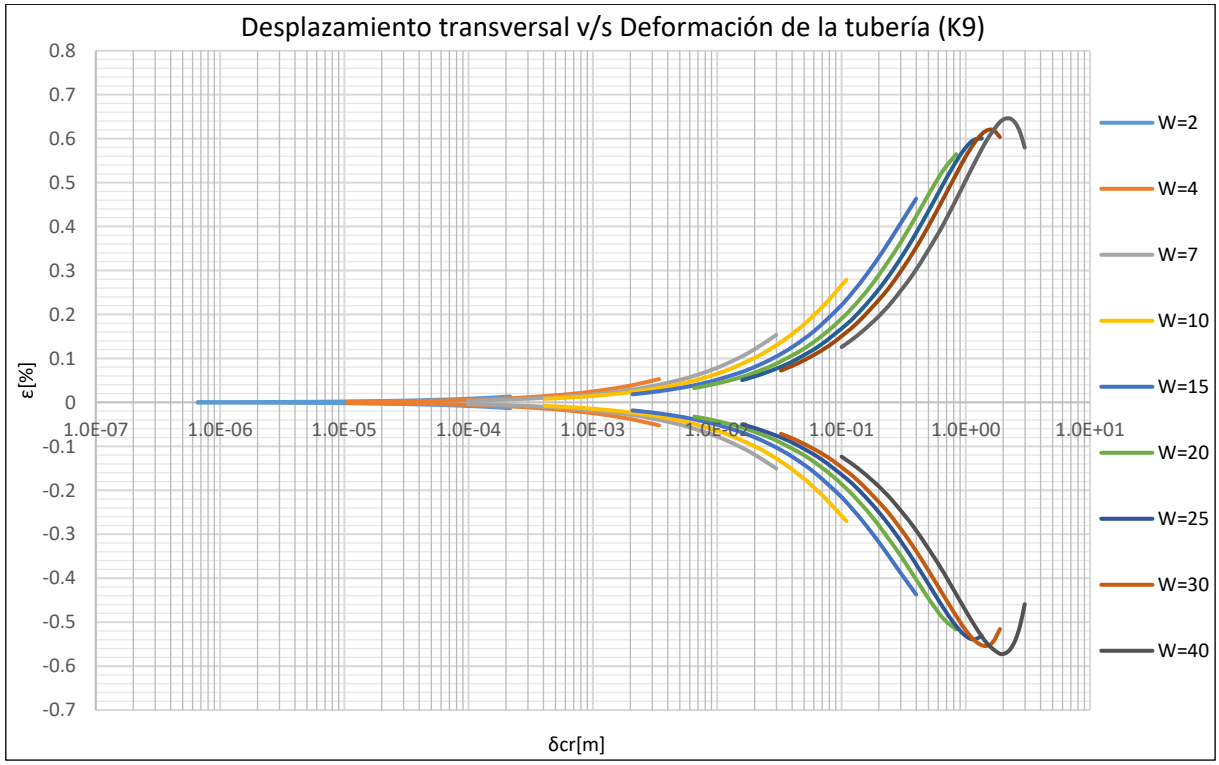


Gráfico 13-186: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil y Presión máxima nominal K9, Suelo de Baja Plasticidad.

k.4. Tuberías de PVC

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

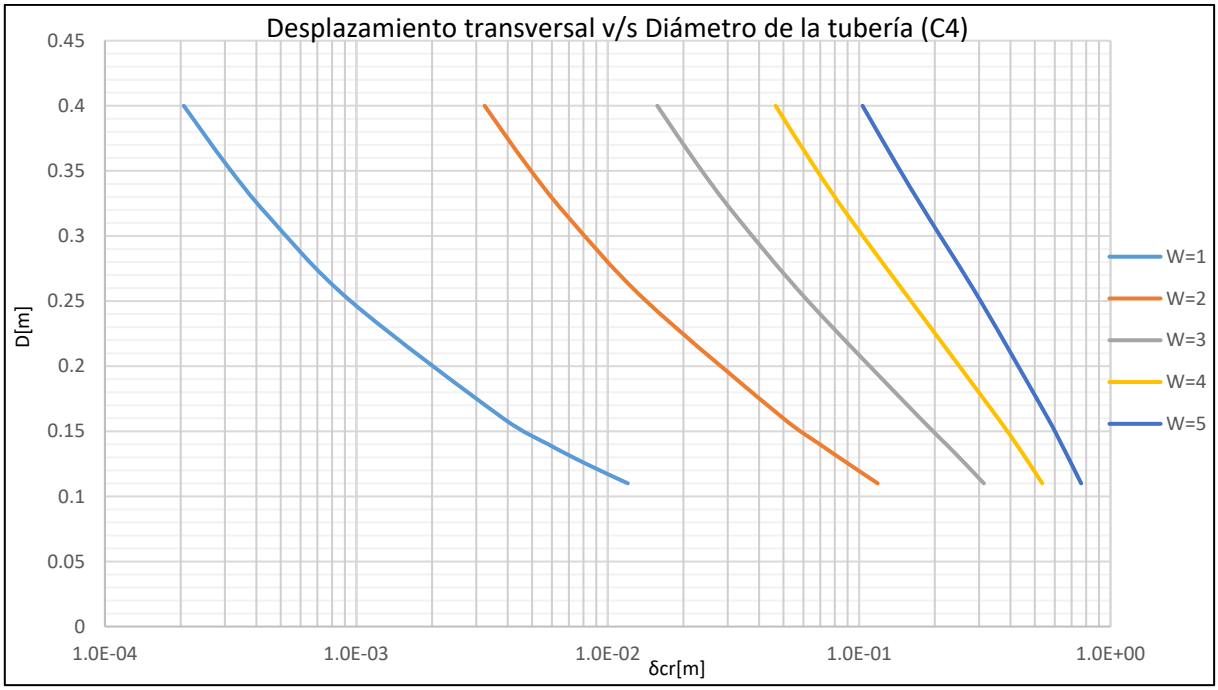


Gráfico 13-187: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C4, Suelo de Arena Fina.

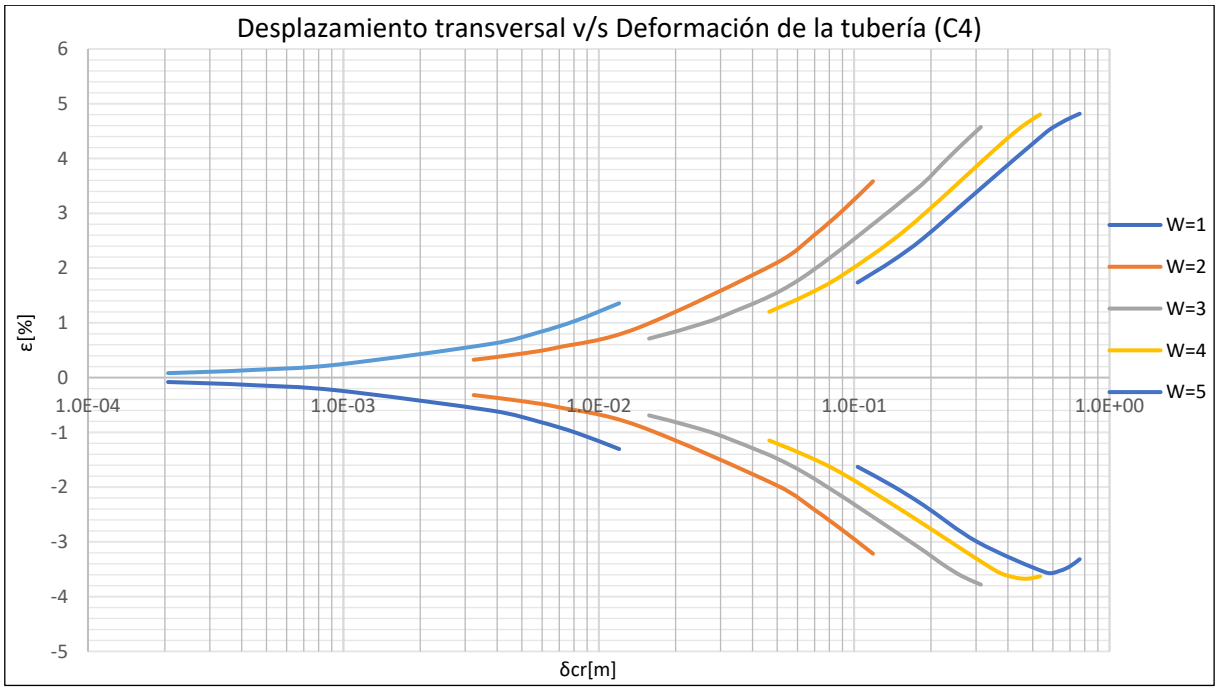


Gráfico 13-188: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C4, Suelo de Arena Fina.

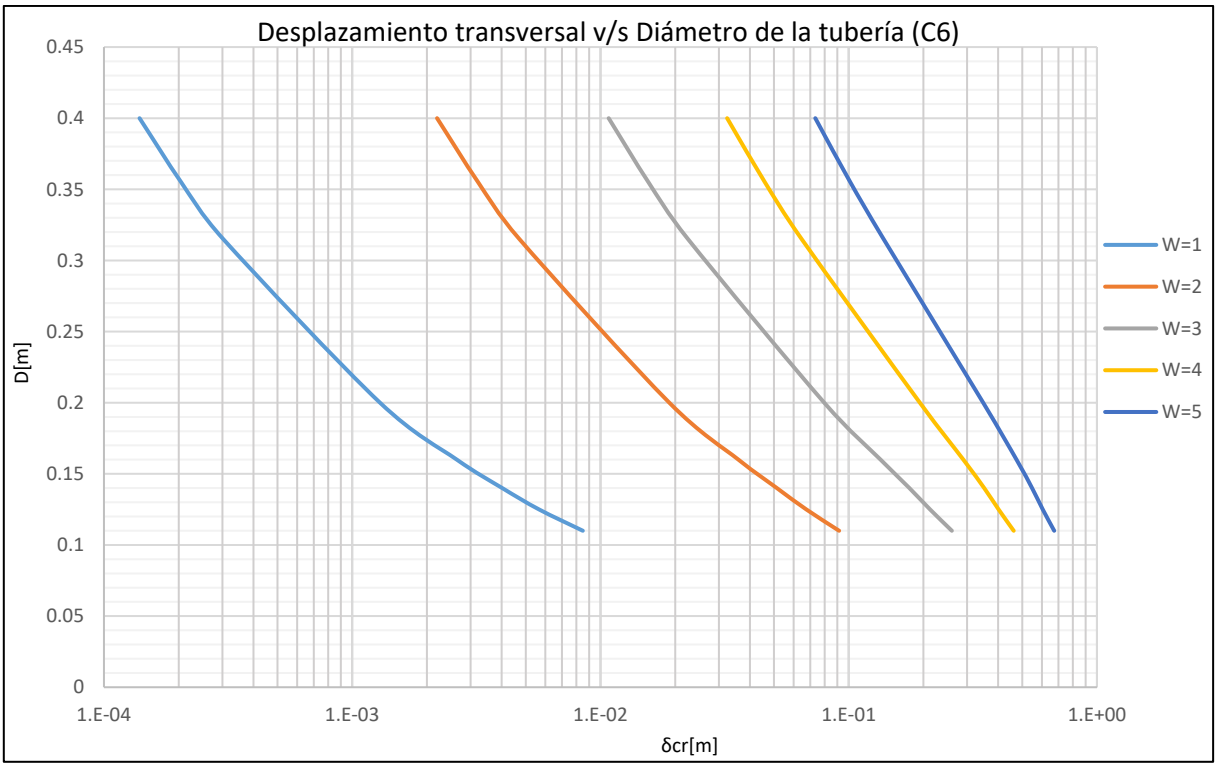


Gráfico 13-189: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C6 Suelo de Arena Fina.

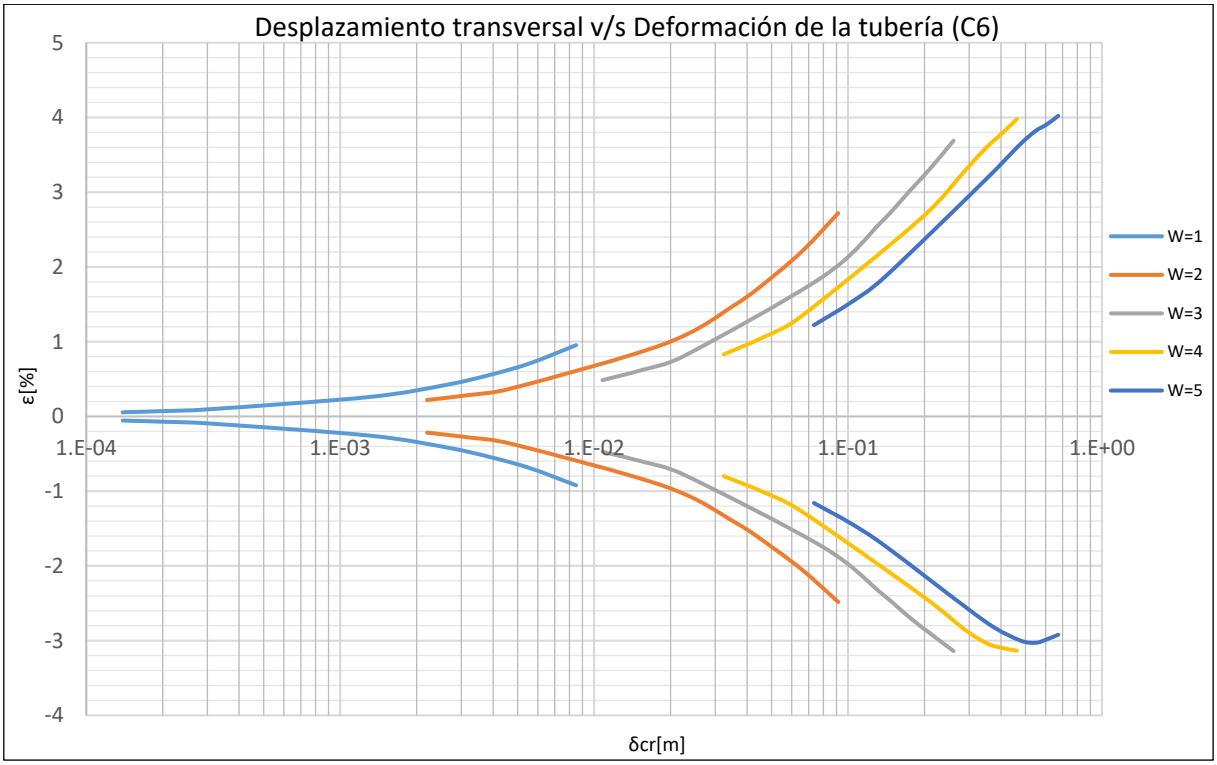


Gráfico 13-190: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C6, Suelo de Arena Fina.

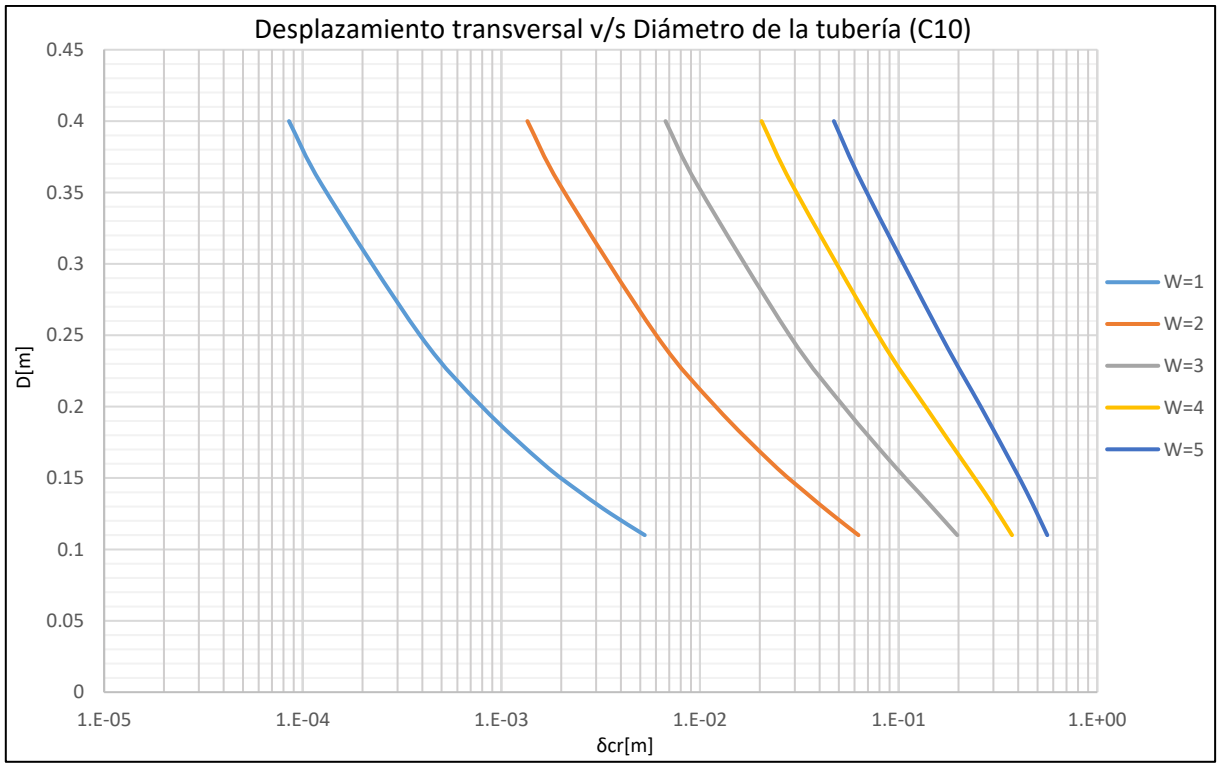


Gráfico 13-191: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C10 Suelo de Arena Fina.

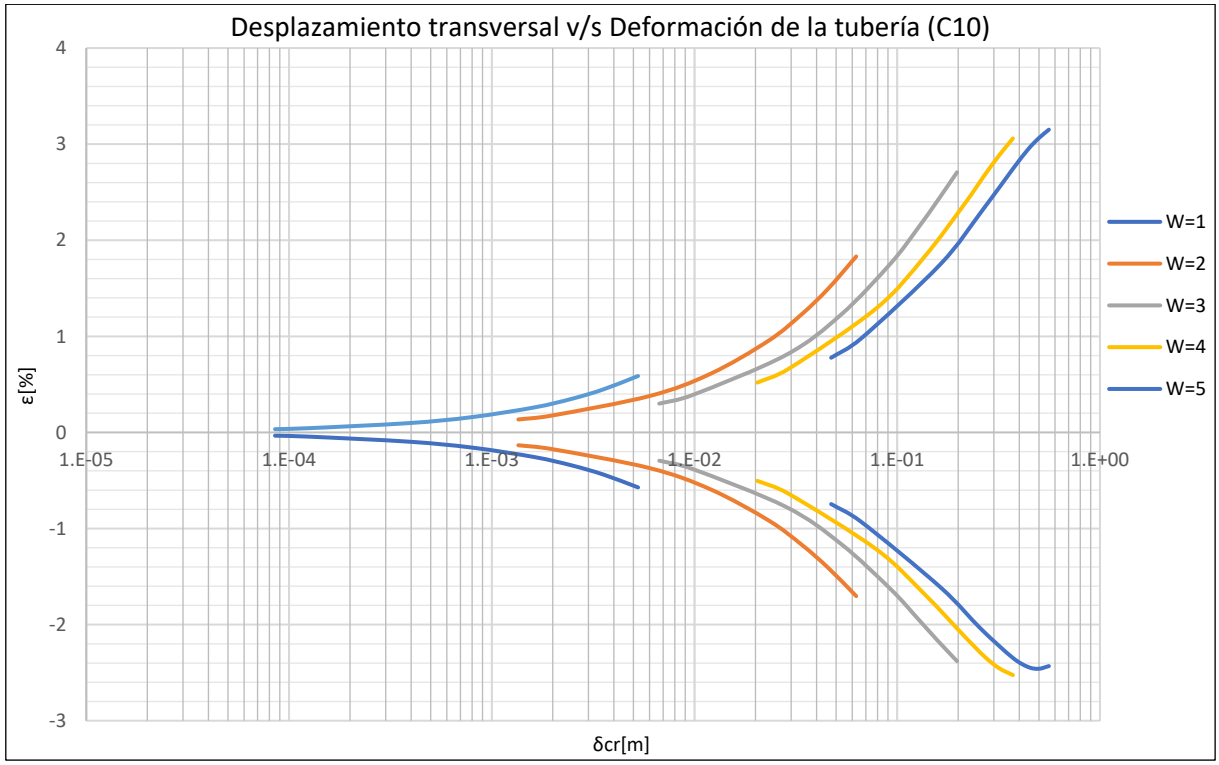


Gráfico 13-192: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C10, Suelo de Arena Fina.

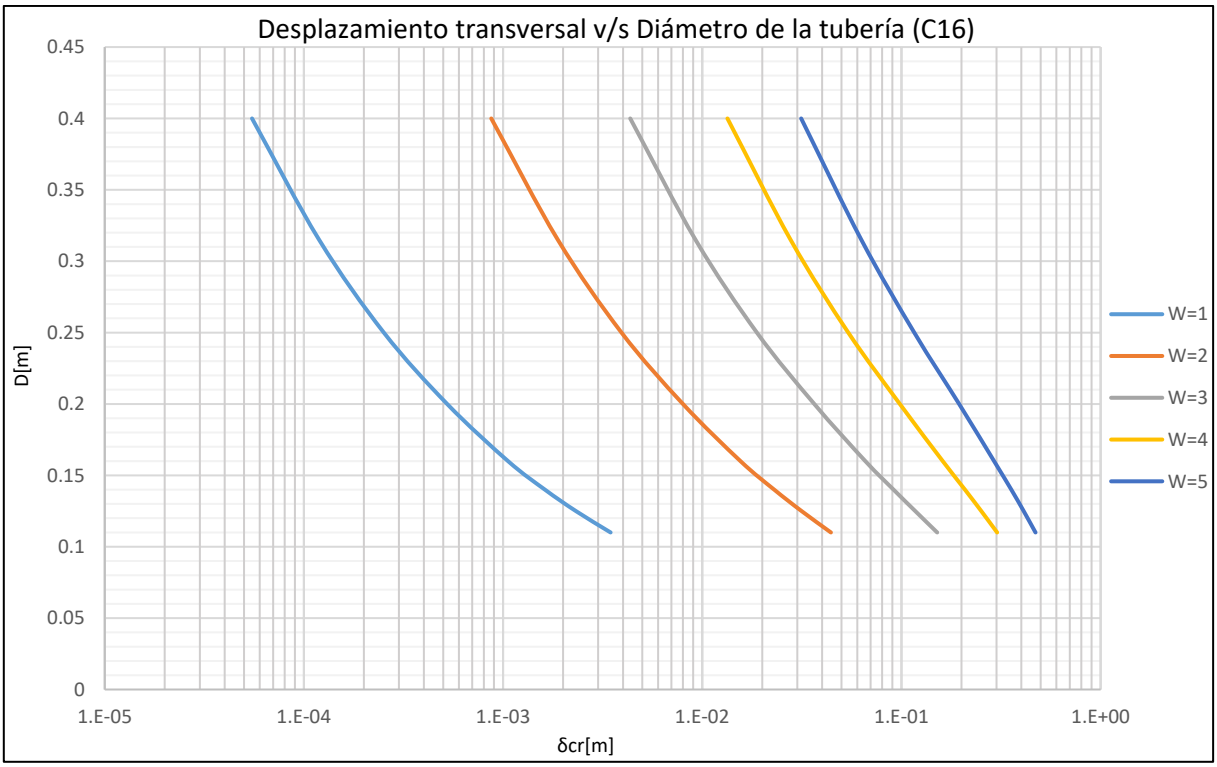


Gráfico 13-193: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C16 Suelo de Arena Fina.

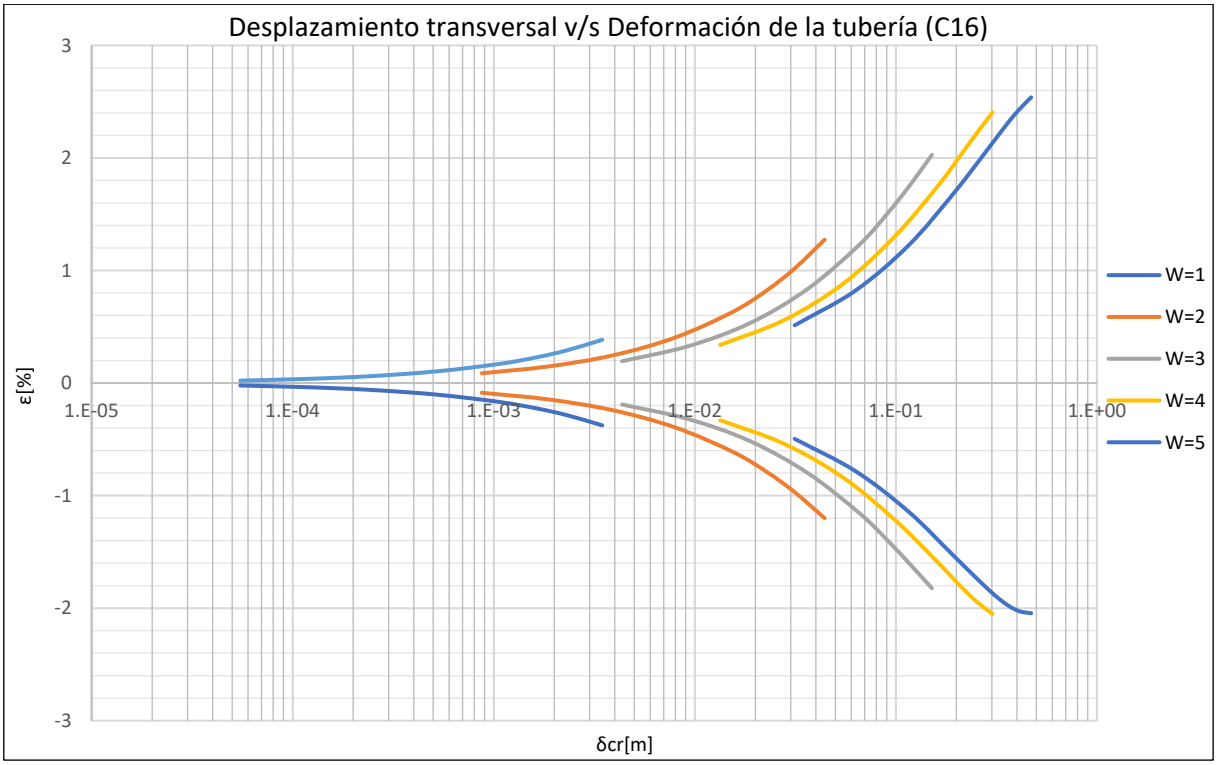


Gráfico 13-194: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C16, Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

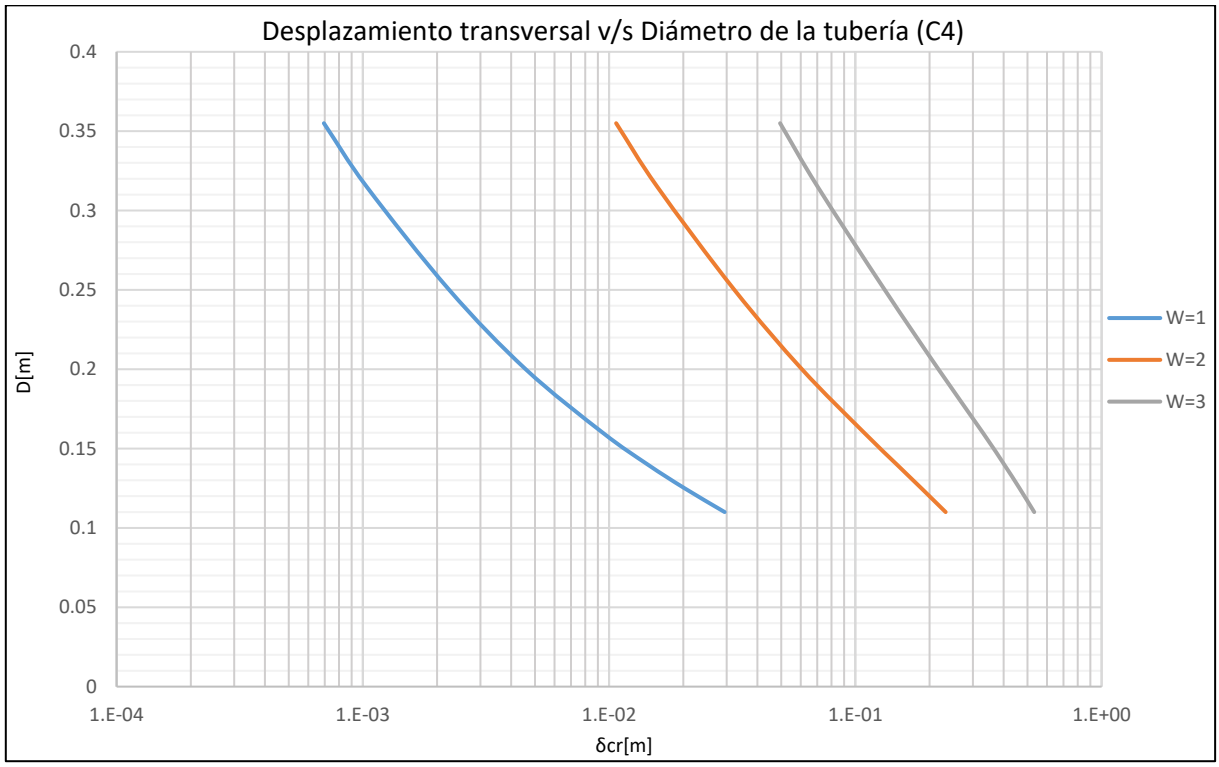


Gráfico 13-195: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C4 Suelo de Arena Gruesa.

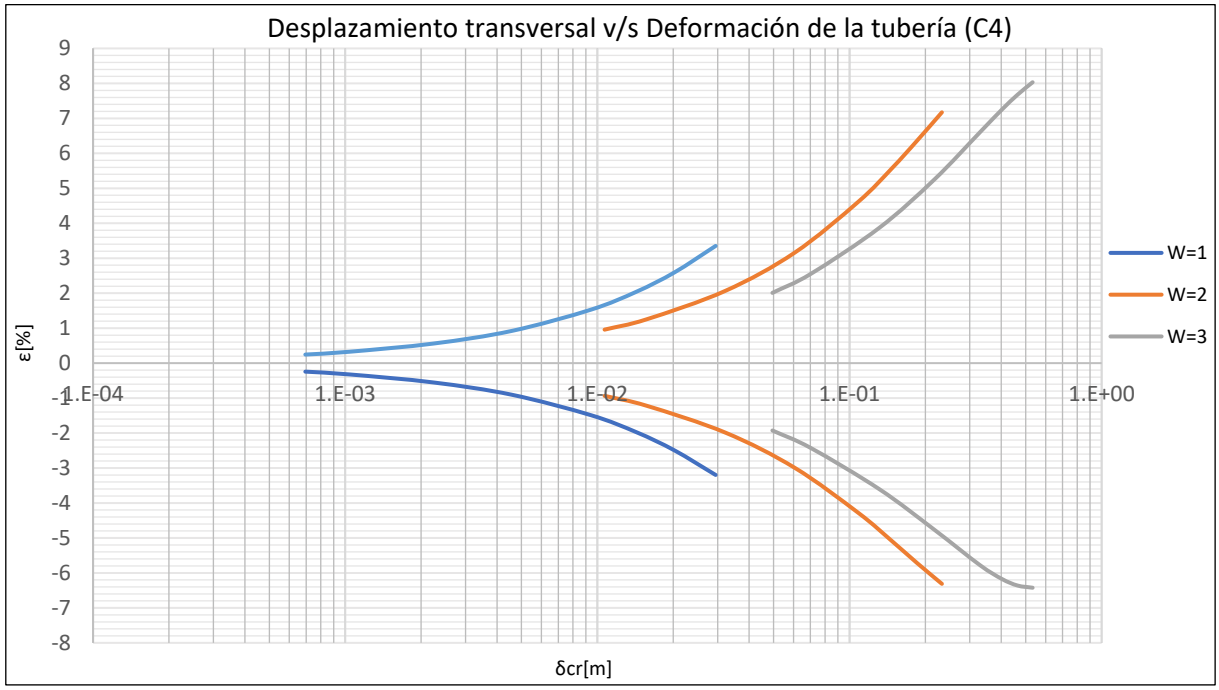


Gráfico 13-196: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C4, Suelo de Arena Gruesa.

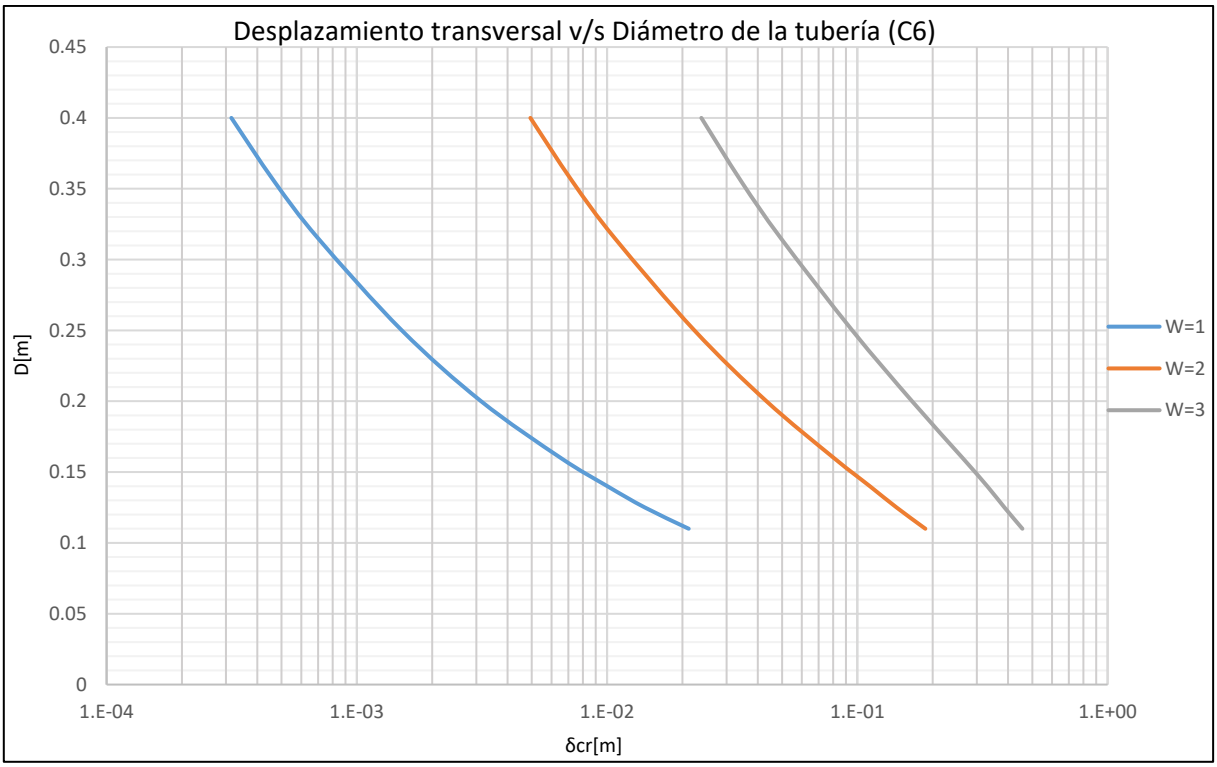


Gráfico 13-197: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C6 Suelo de Arena Gruesa.

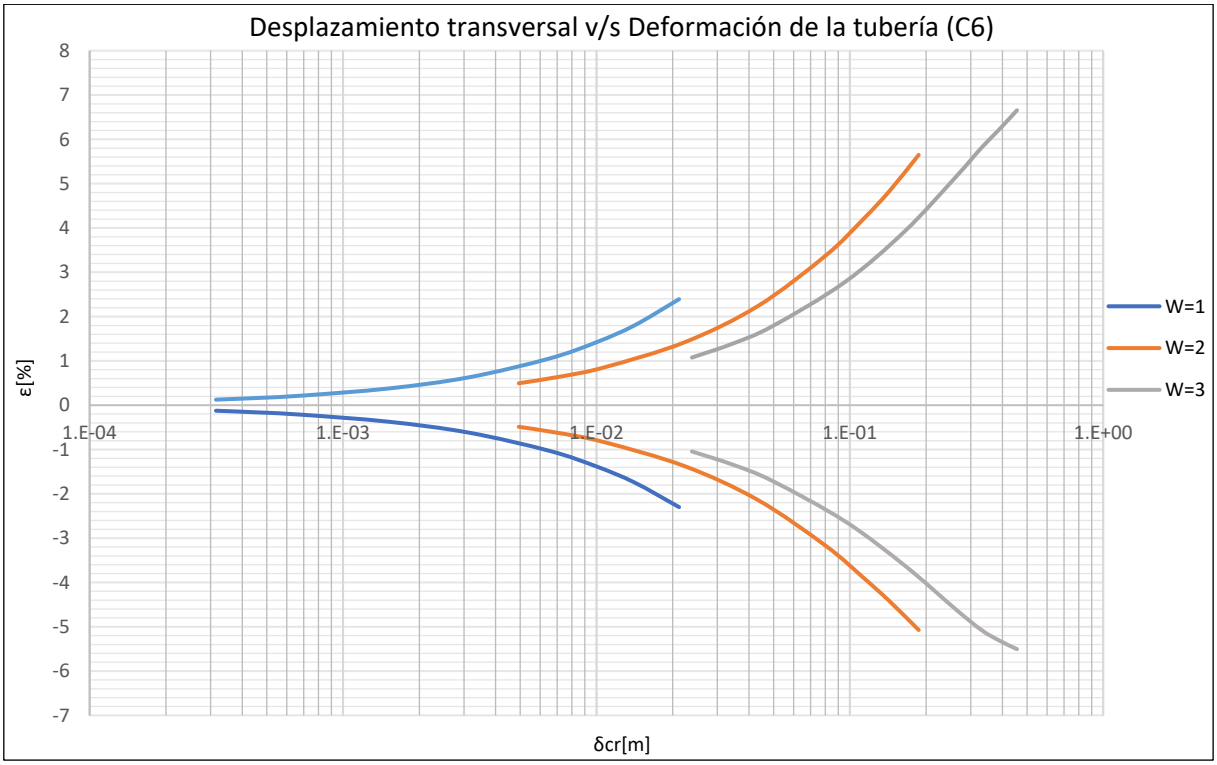


Gráfico 13-198: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C6, Suelo de Arena Gruesa.

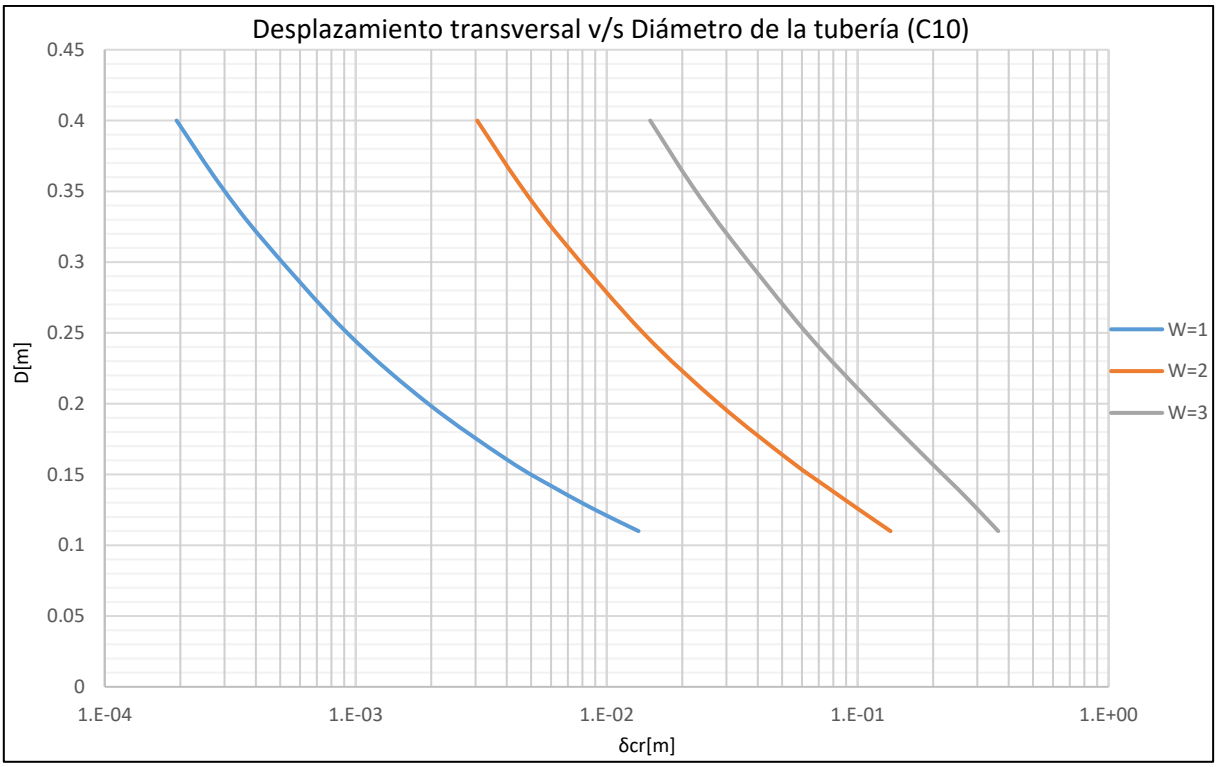


Gráfico 13-199: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C10 Suelo de Arena Gruesa.

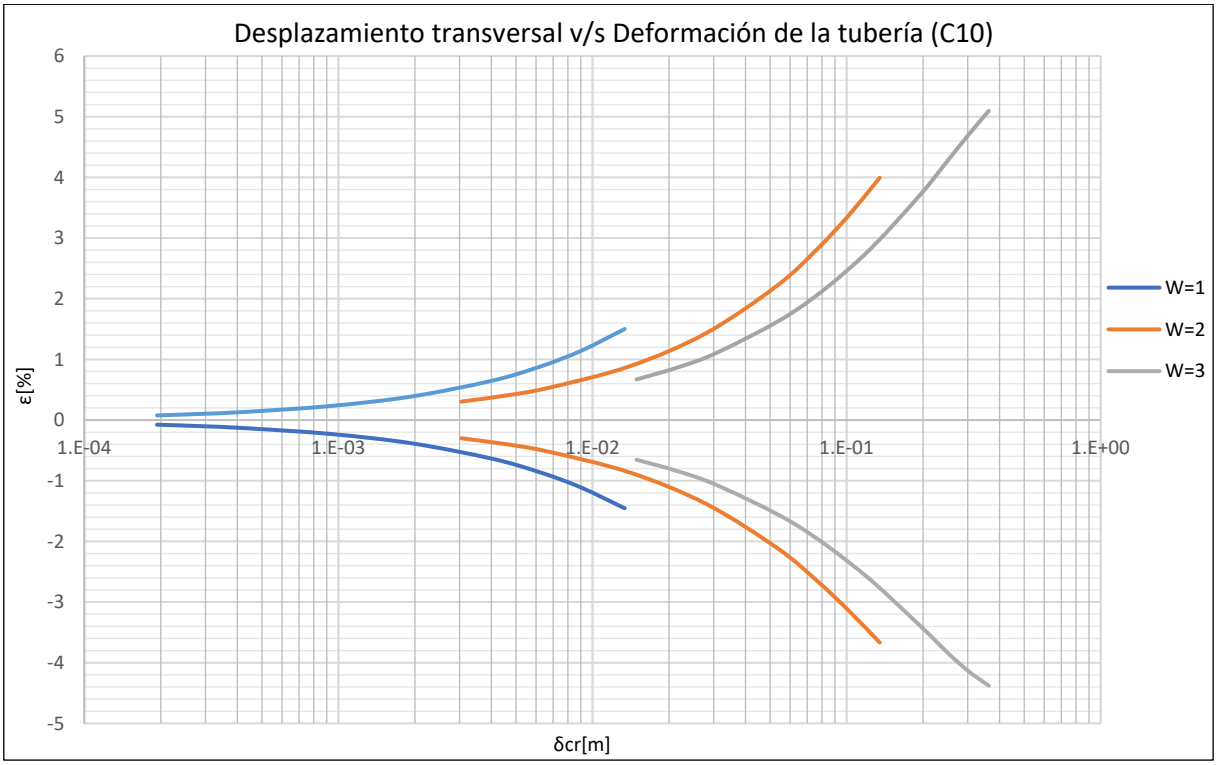


Gráfico 13-200: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C10, Suelo de Arena Gruesa.

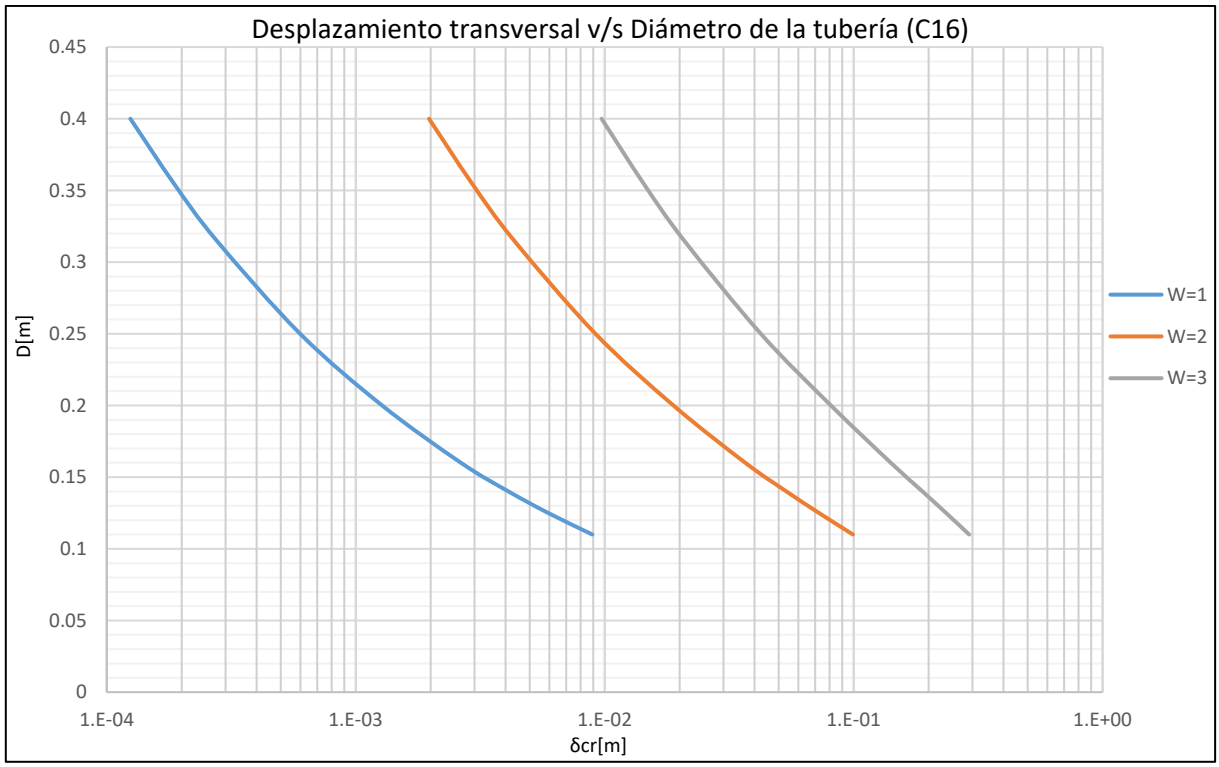


Gráfico 13-201: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C16 Suelo de Arena Gruesa.

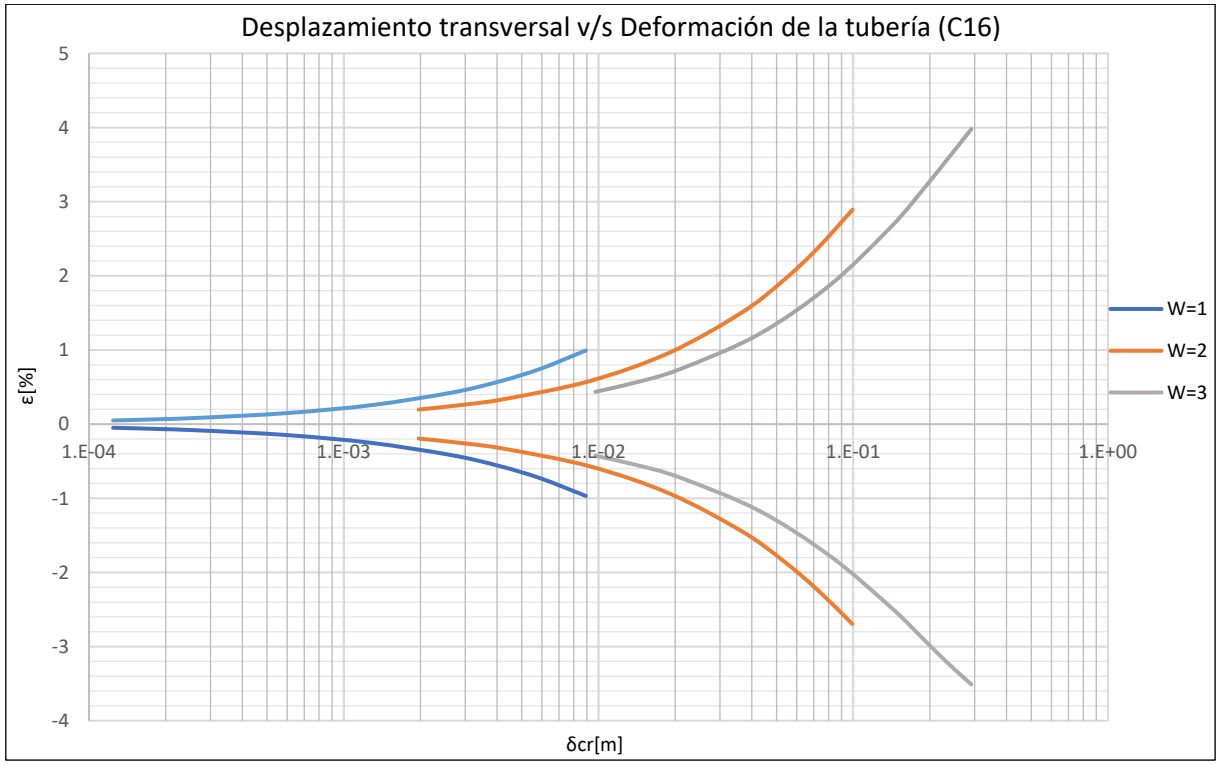


Gráfico 13-202: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C16, Suelo de Arena Gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

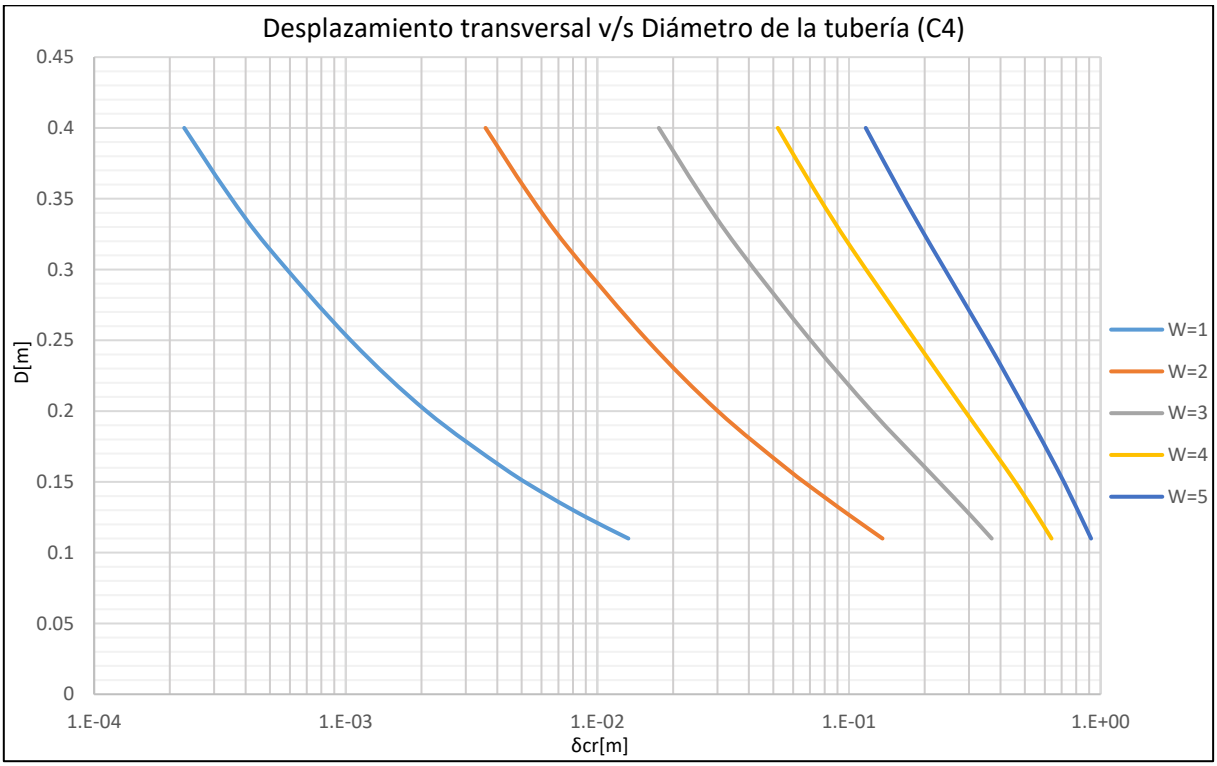


Gráfico 13-203: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C4, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

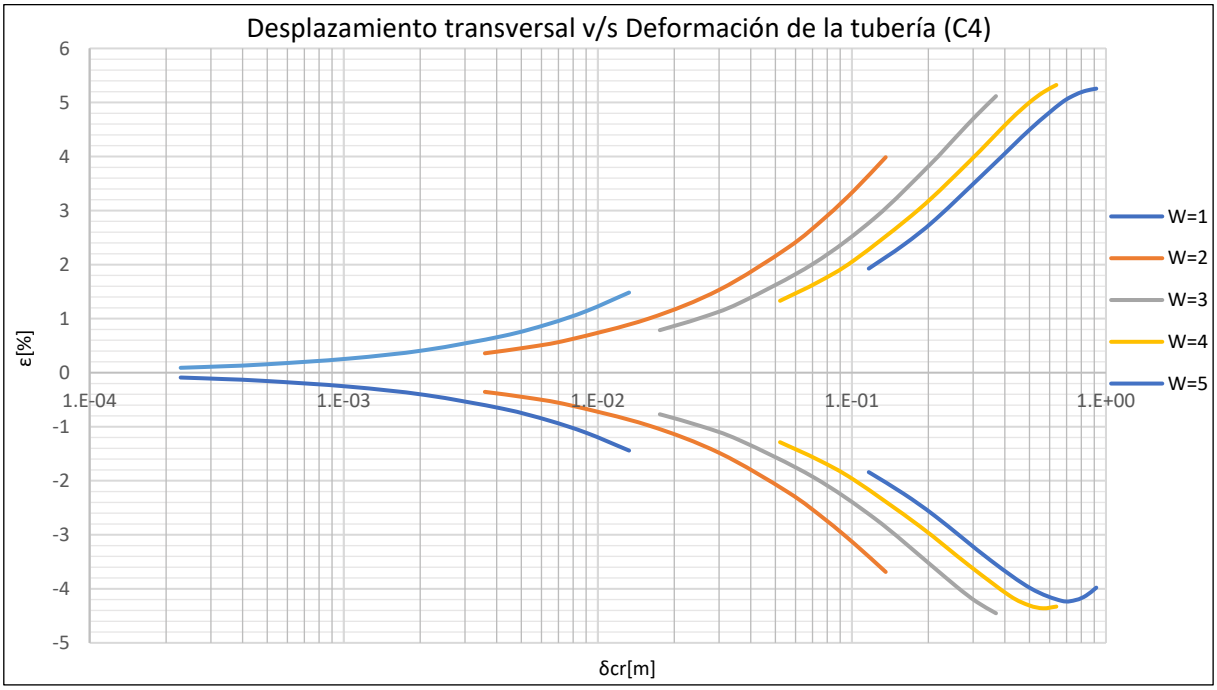


Gráfico 13-204: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C4, Suelo de Limoso de Baja Plasticidad.

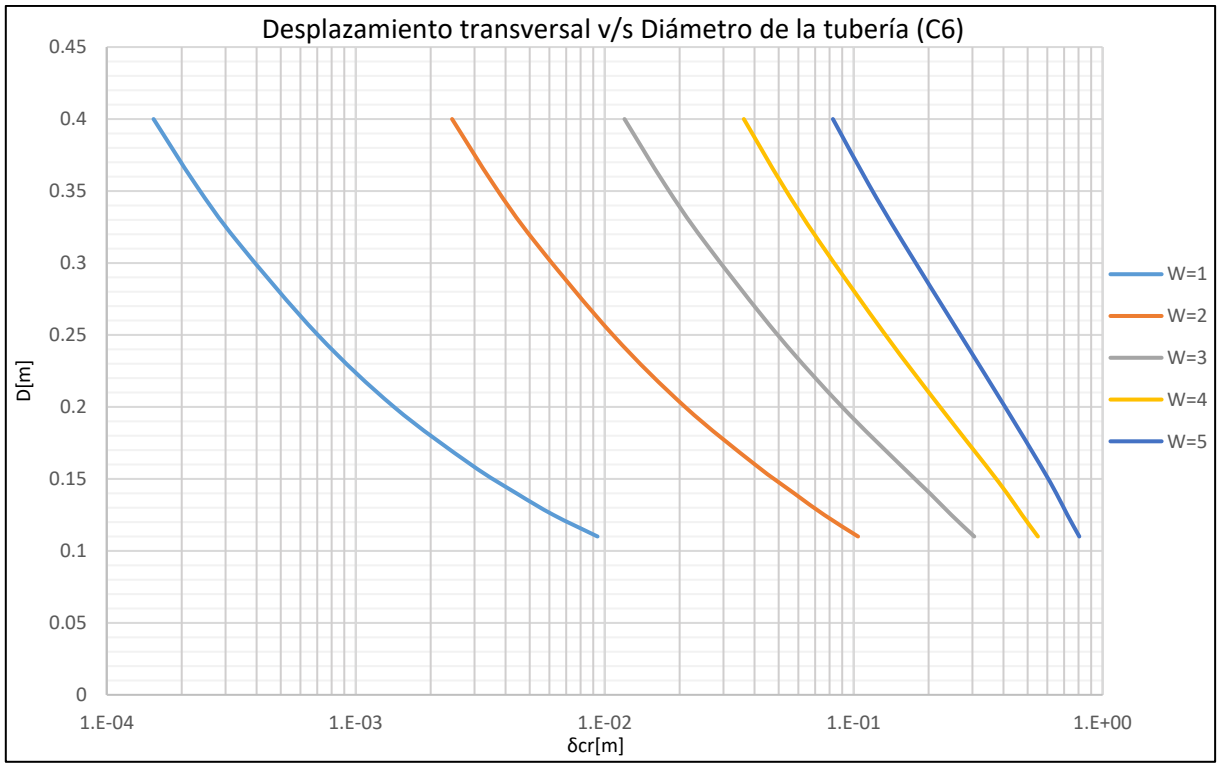


Gráfico 13-205: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C6, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

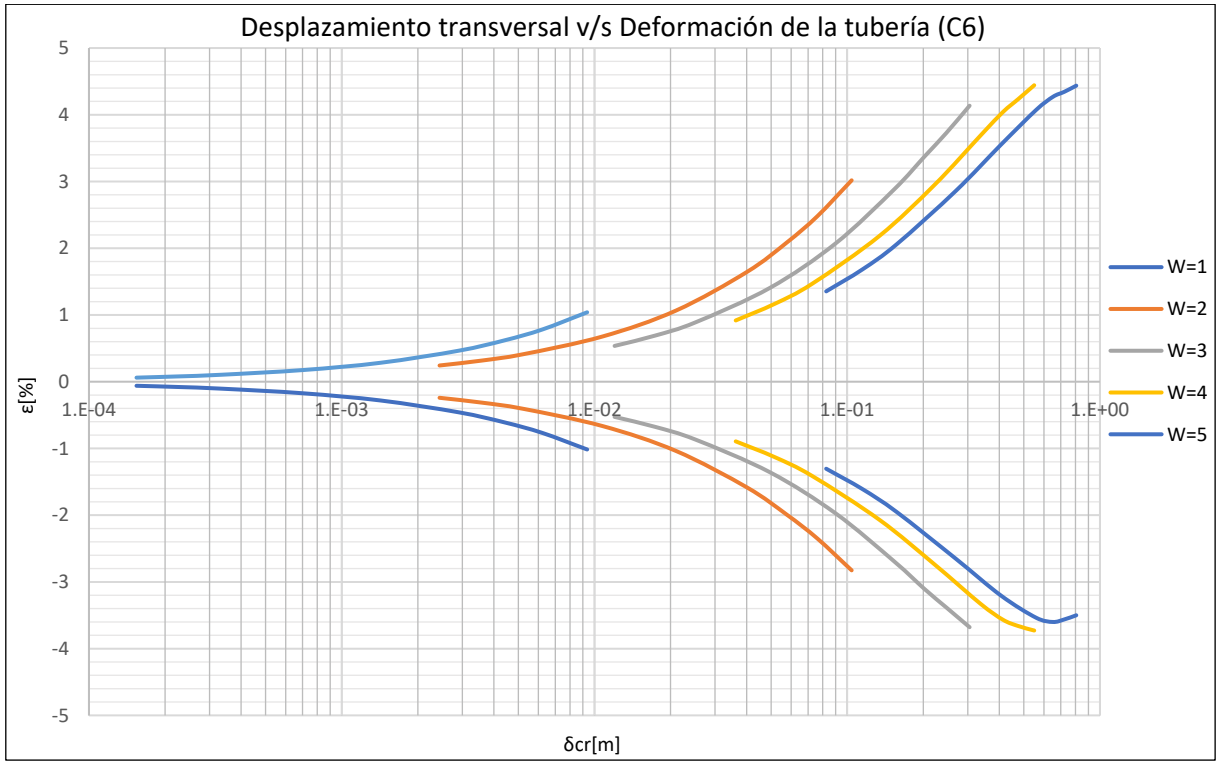


Gráfico 13-206: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C6, Suelo de Limoso de Baja Plasticidad.

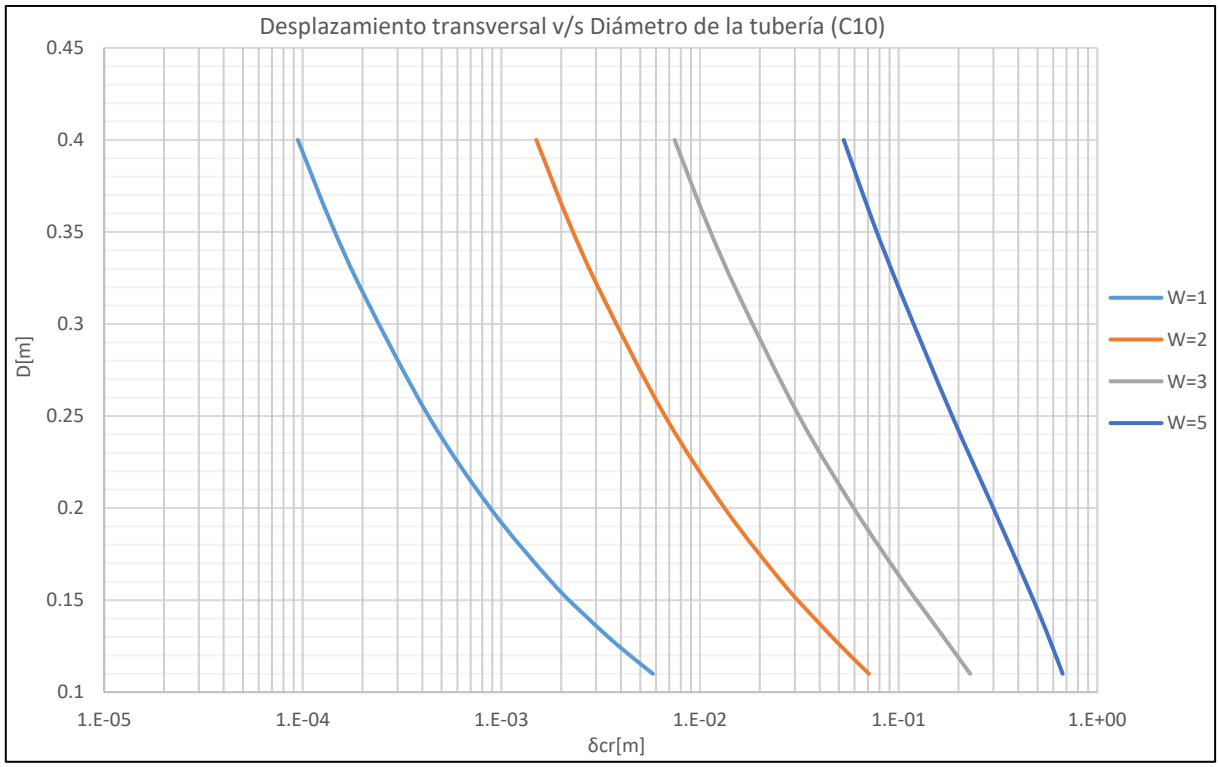


Gráfico 13-207: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C10, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

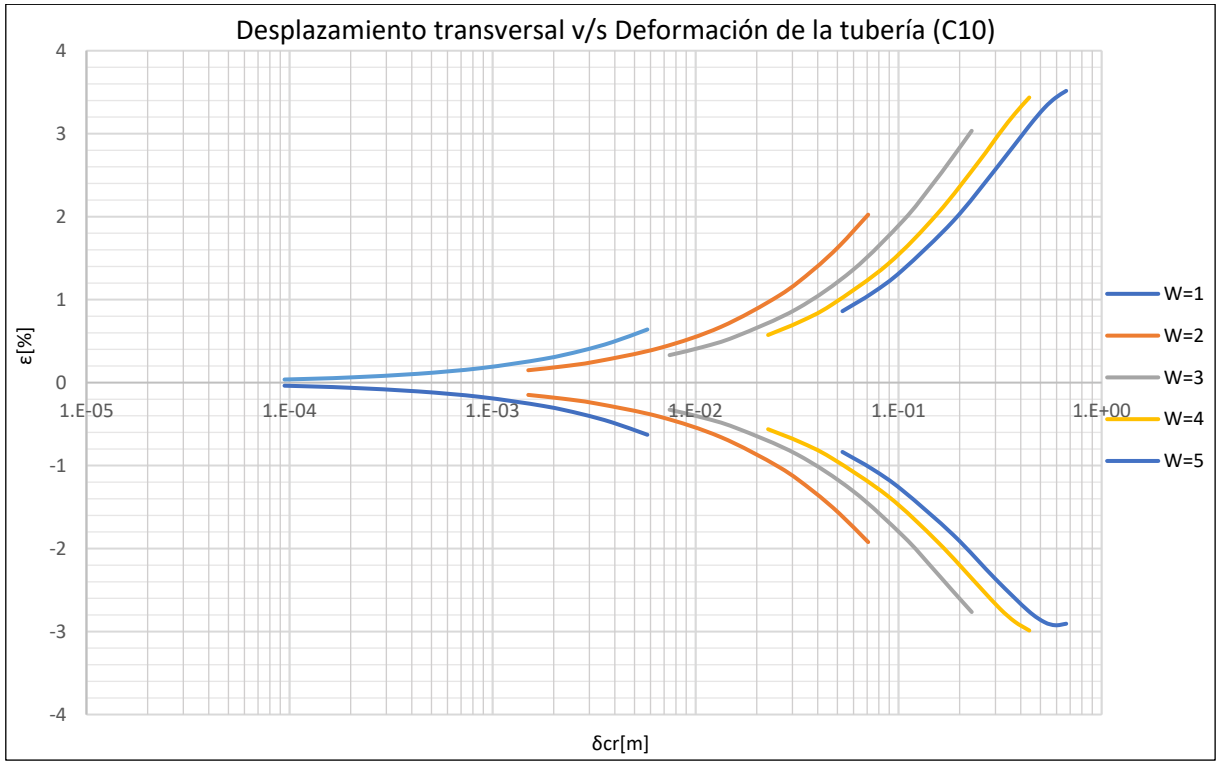


Gráfico 13-208: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C10, Suelo de Limoso de Baja Plasticidad.

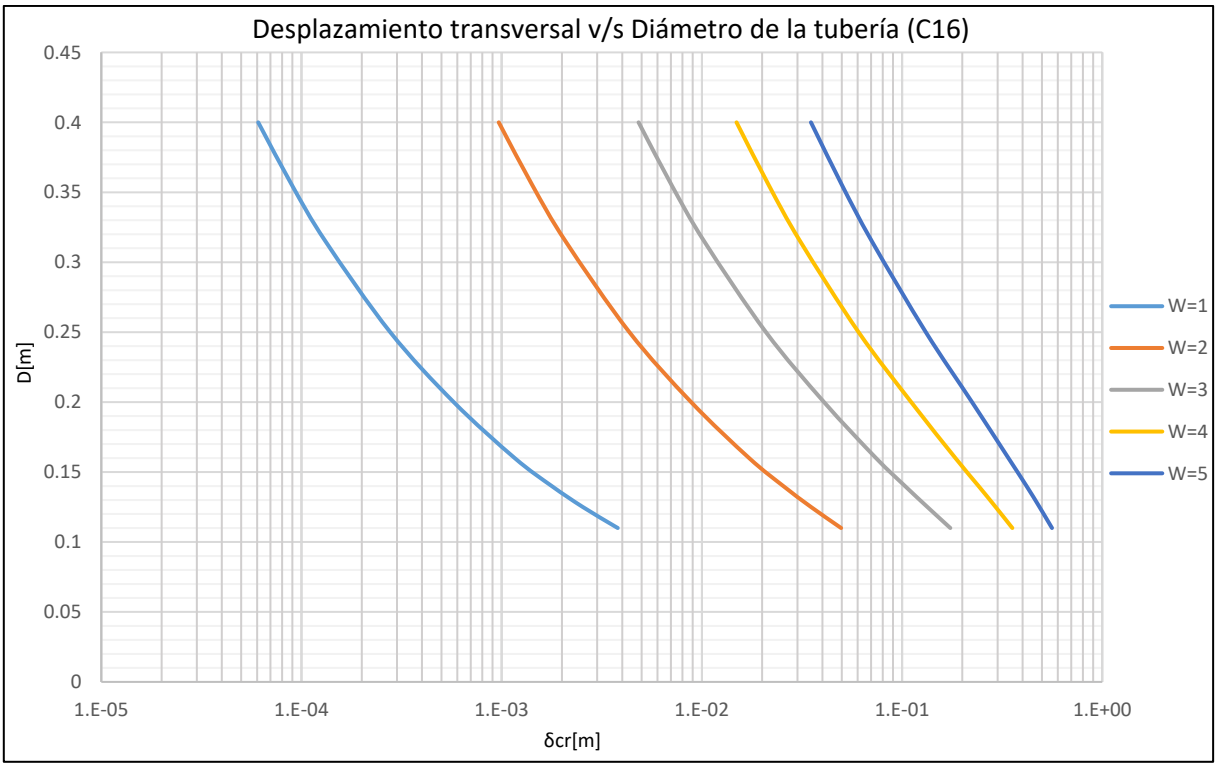


Gráfico 13-209: Desplazamiento transversal v/s Diámetro de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C16, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

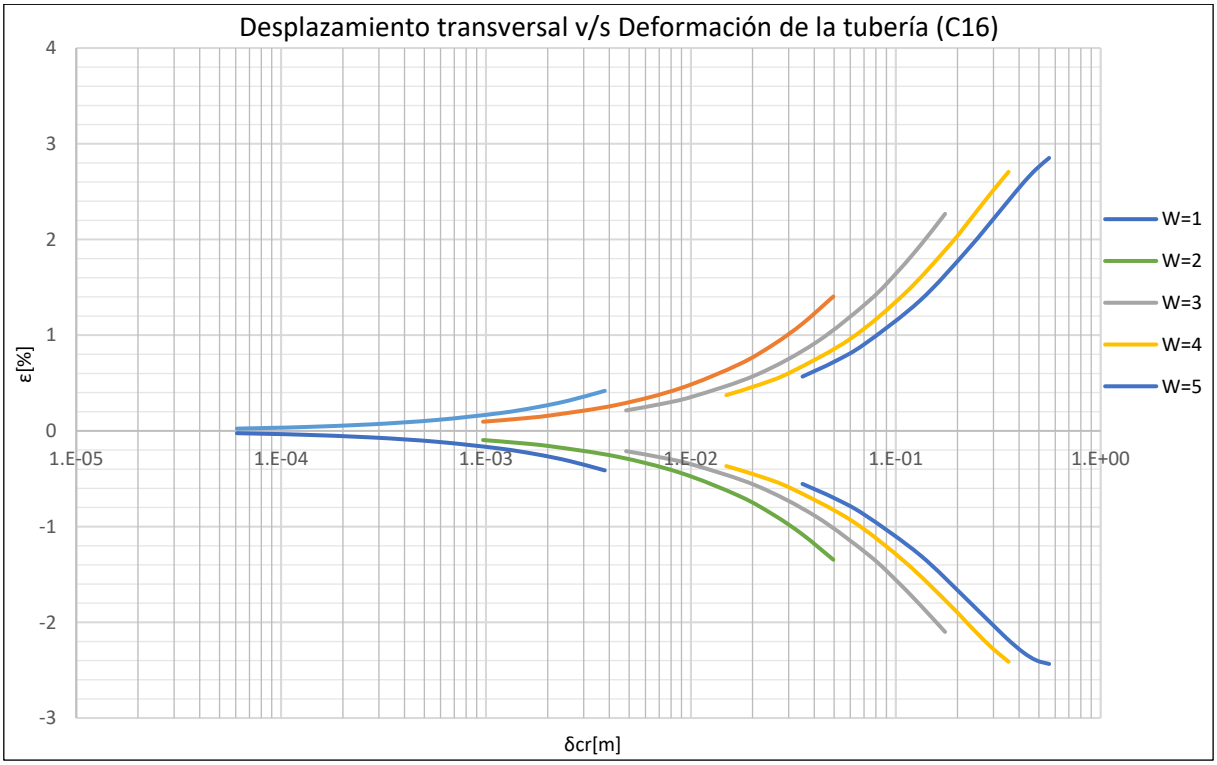


Gráfico 13-210: Desplazamiento transversal v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC y Presión máxima nominal C16, Suelo de Limoso de Baja Plasticidad.

L. Gráficos de deformación de la tubería por desplazamientos del terreno longitudinal a su eje.

L.1. Tuberías de Acero

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

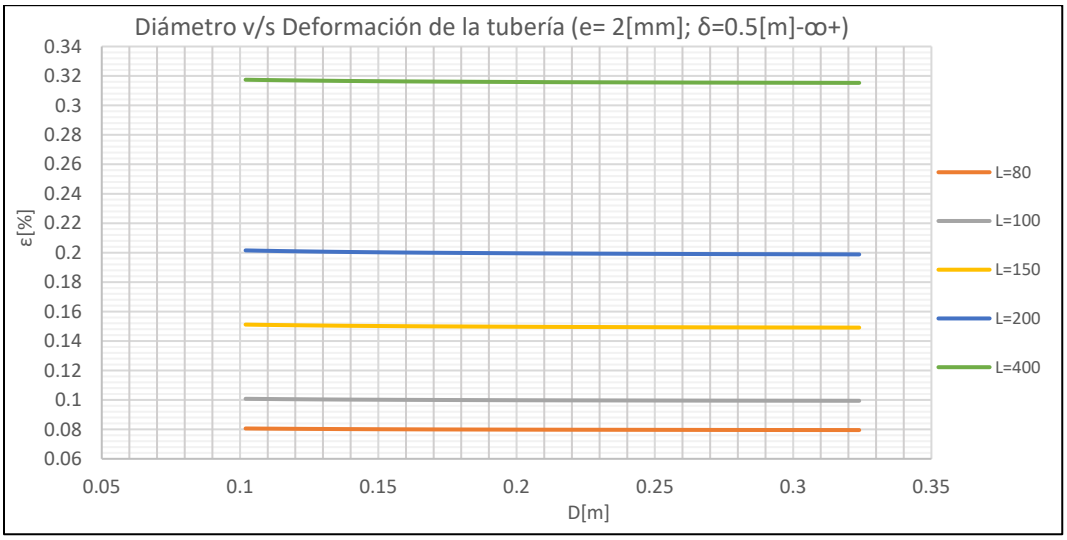


Gráfico 13-211: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m], Suelo de Arena Fina.

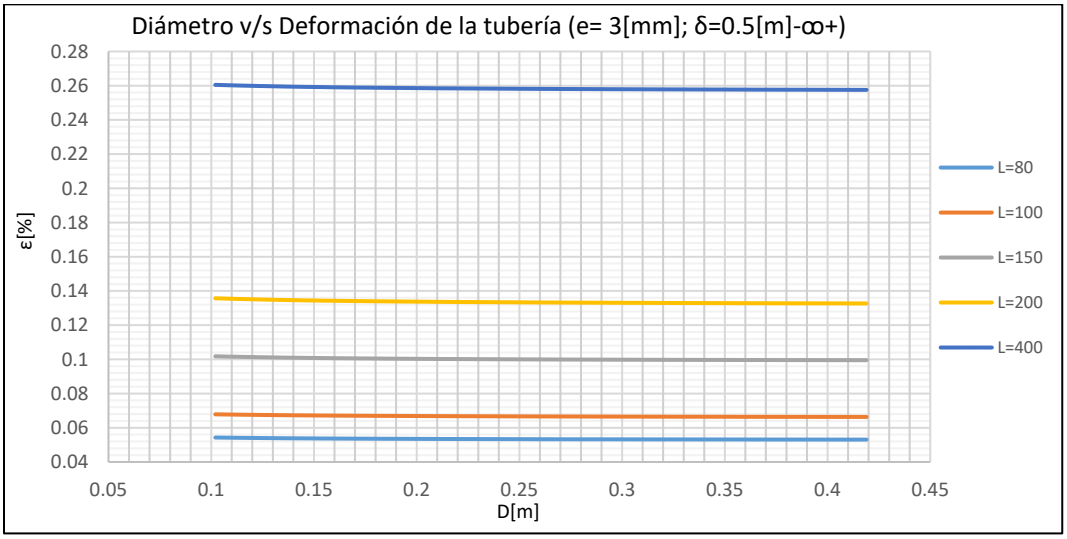


Gráfico 13-212: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m]], Suelo de Arena Fina.

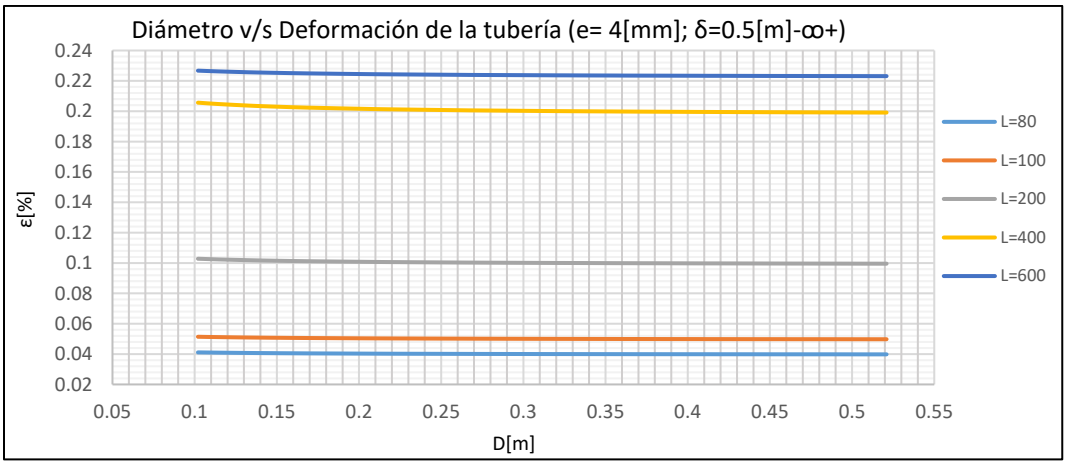


Gráfico 13-213: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m]], Suelo de Arena Fina.

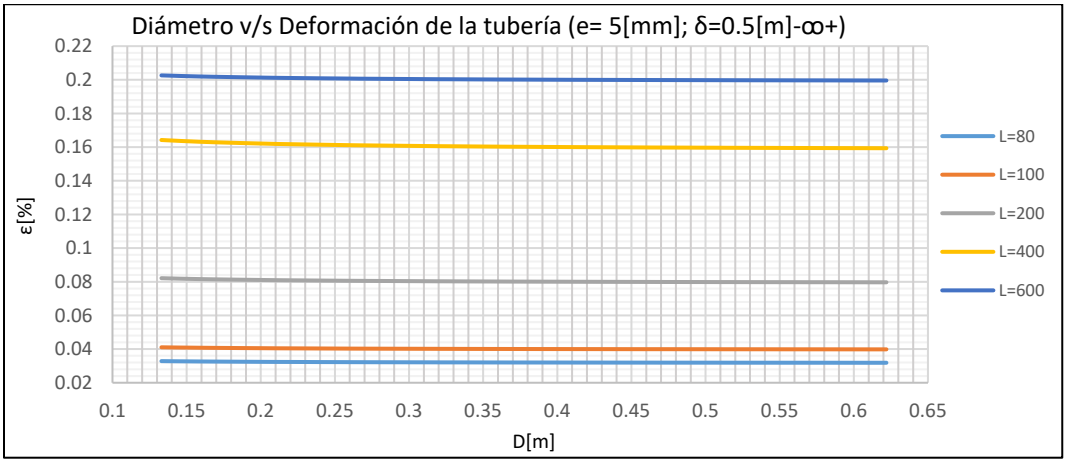


Gráfico 13-214: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m]], Suelo de Arena Fina.

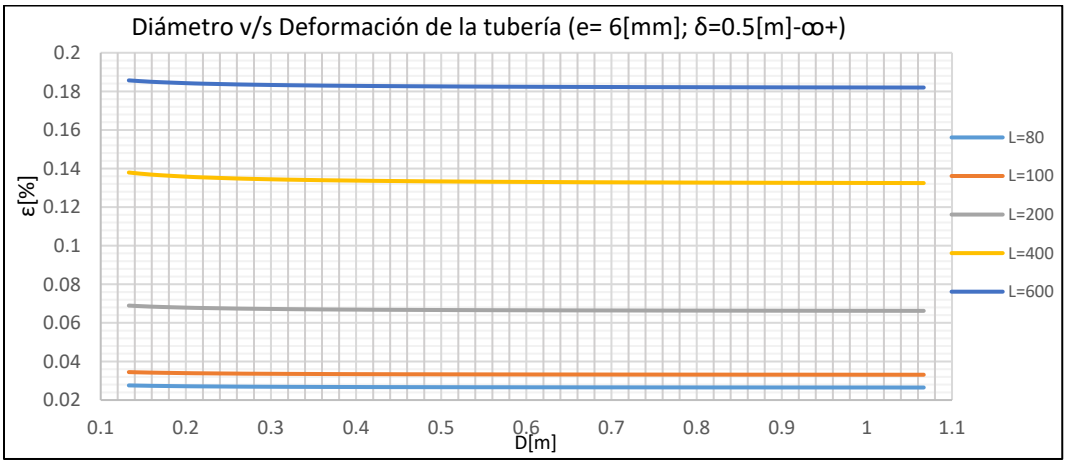


Gráfico 13-215: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m]], Suelo de Arena Fina.

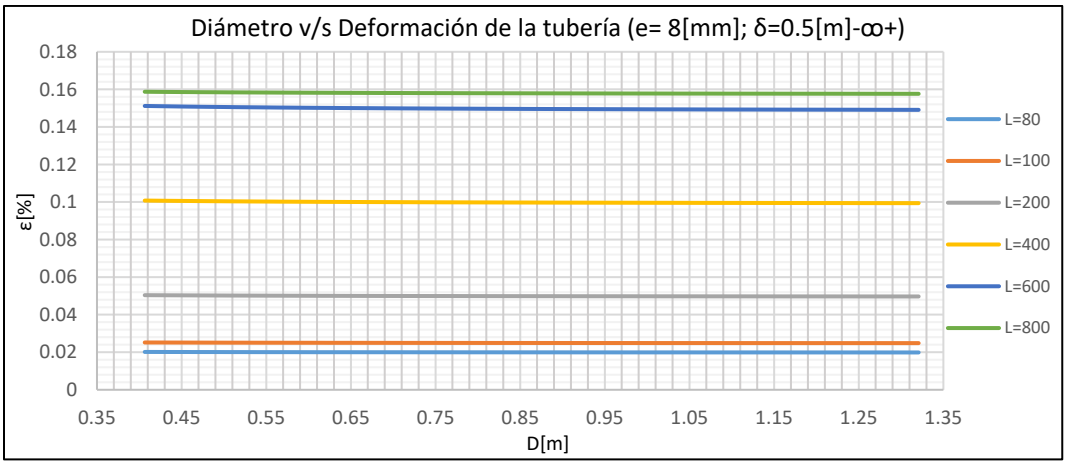


Gráfico 13-216: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m]], Suelo de Arena Fina.

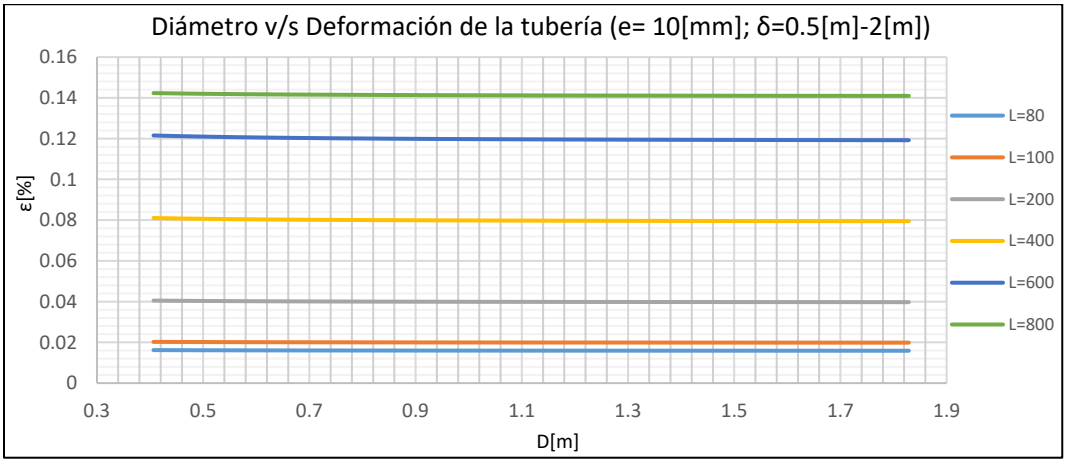


Gráfico 13-217: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m]], Suelo de Arena Fina

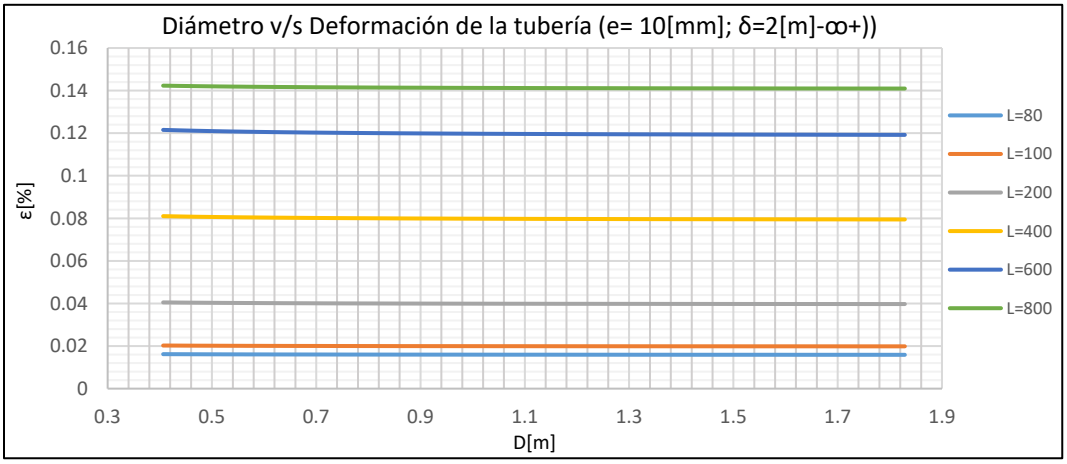


Gráfico 13-218: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m]], Suelo de Arena Fina.

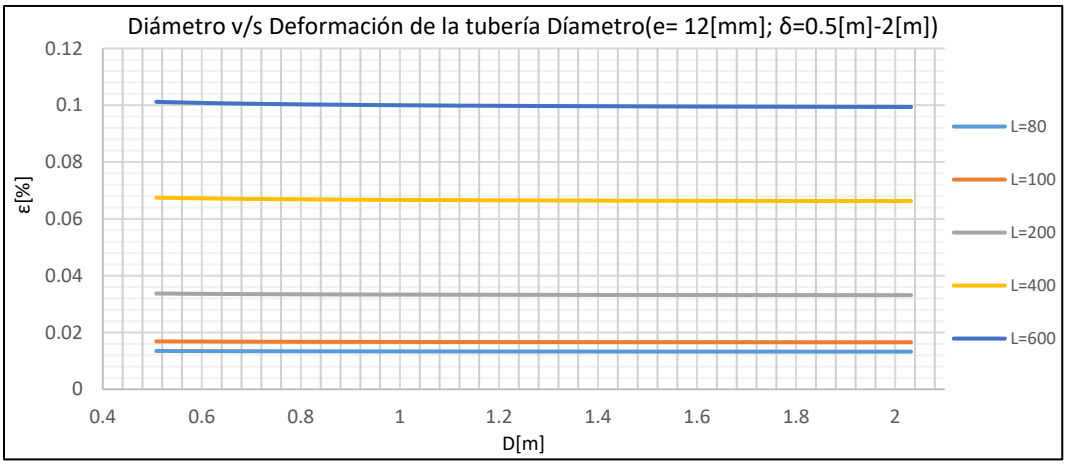


Gráfico 13-219: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m]], Suelo de Arena Fina.

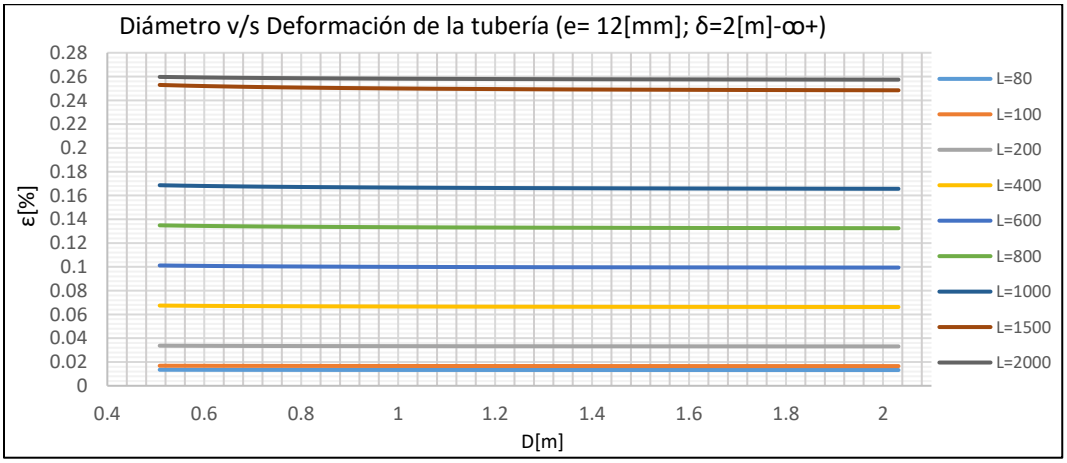


Gráfico 13-220: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m]], Suelo de Arena Fina.

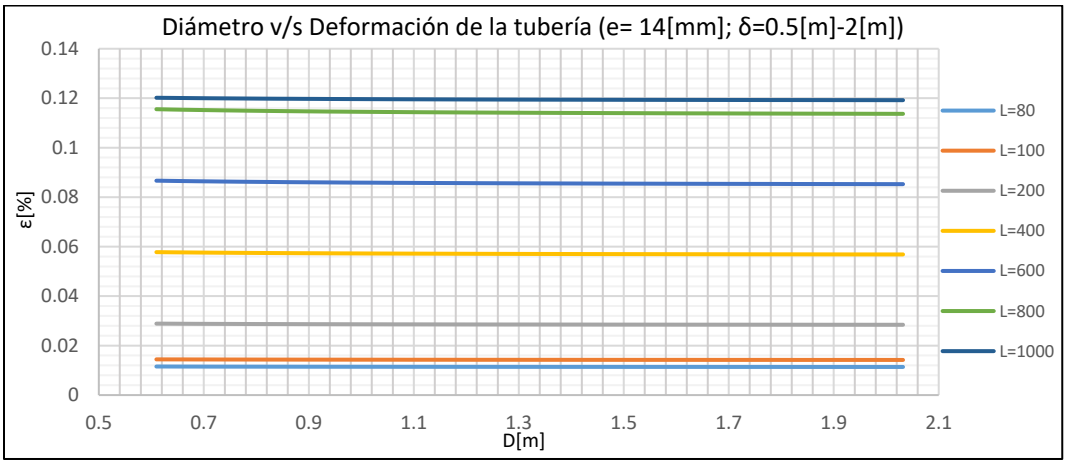


Gráfico 13-221: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m]], Suelo de Arena Fina.

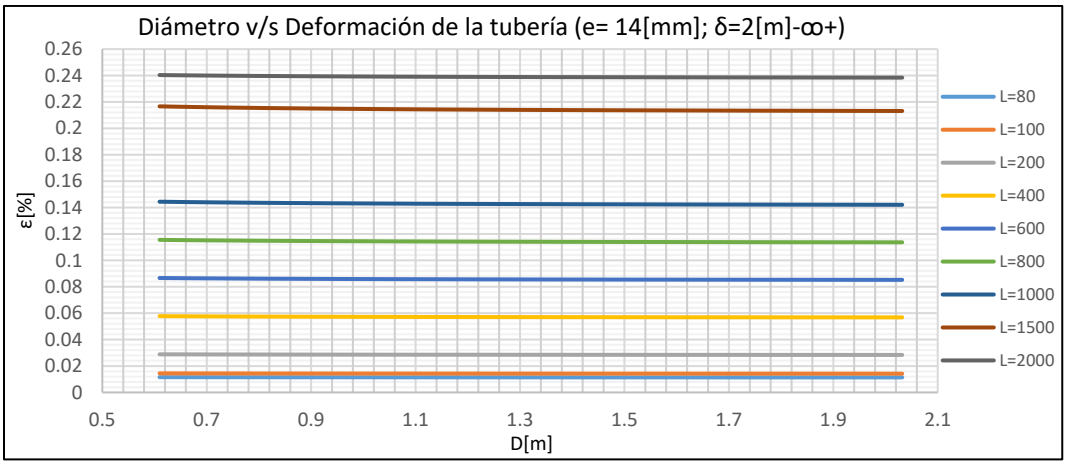


Gráfico 13-222: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m]], Suelo de Arena Fina.

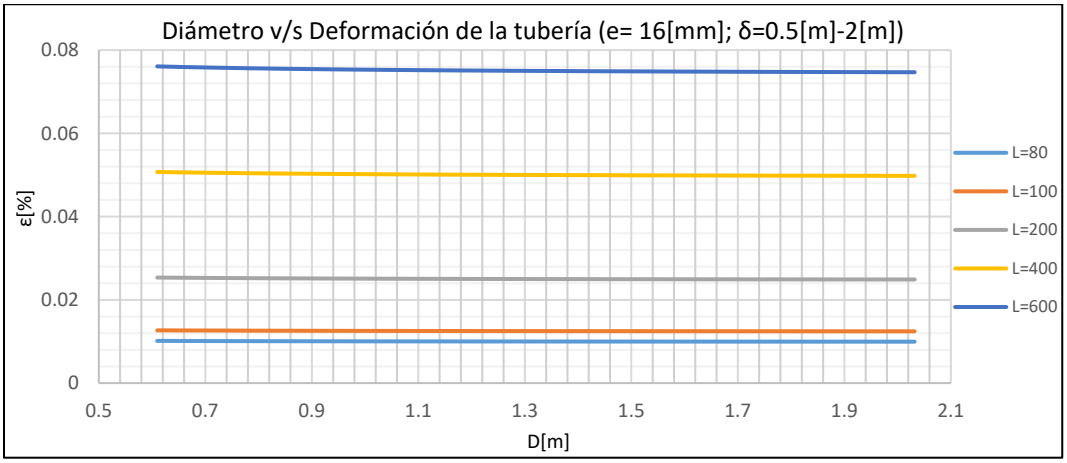


Gráfico 13-223: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m]], Suelo de Arena Fina.

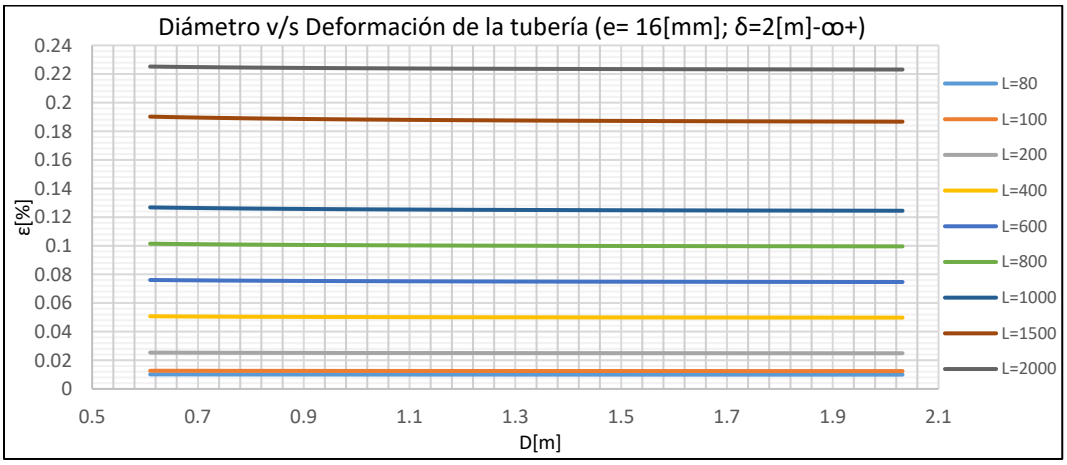


Gráfico 13-224: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m]], Suelo de Arena Fina.

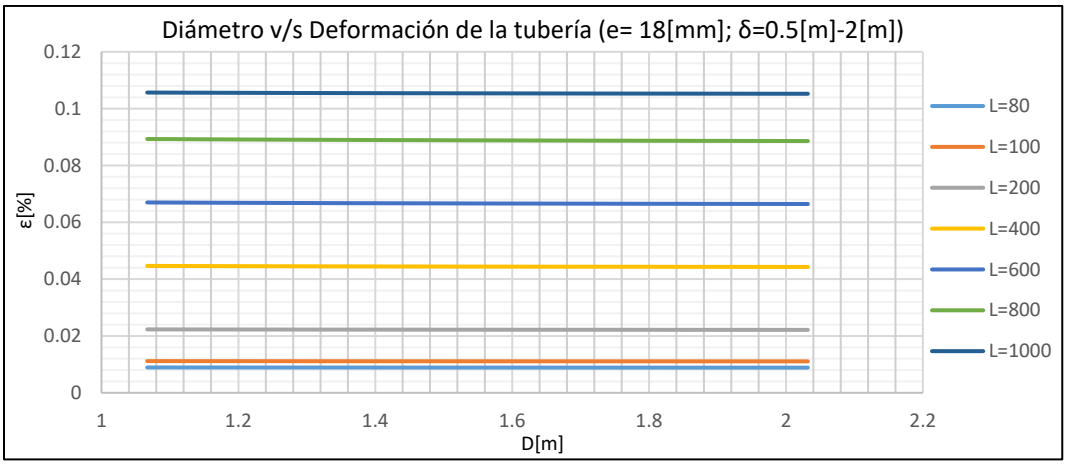


Gráfico 13-225: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m]], Suelo de Arena Fina.

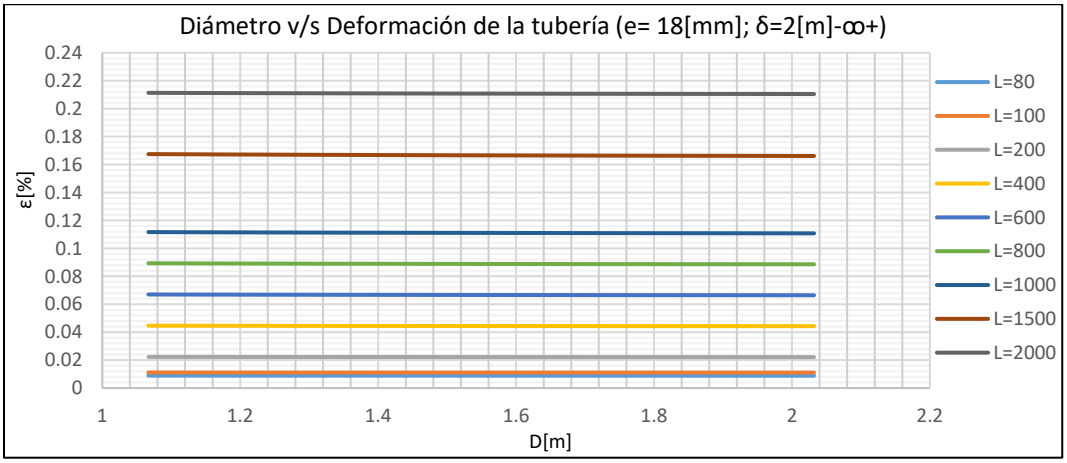


Gráfico 13-226: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m]], Suelo de Arena Fina.

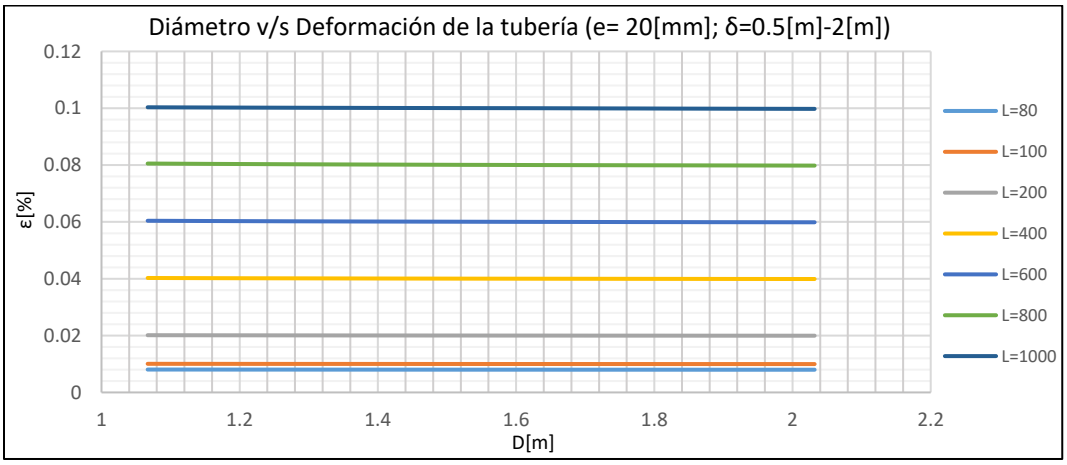


Gráfico 13-227: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m]], Suelo de Arena Fina.

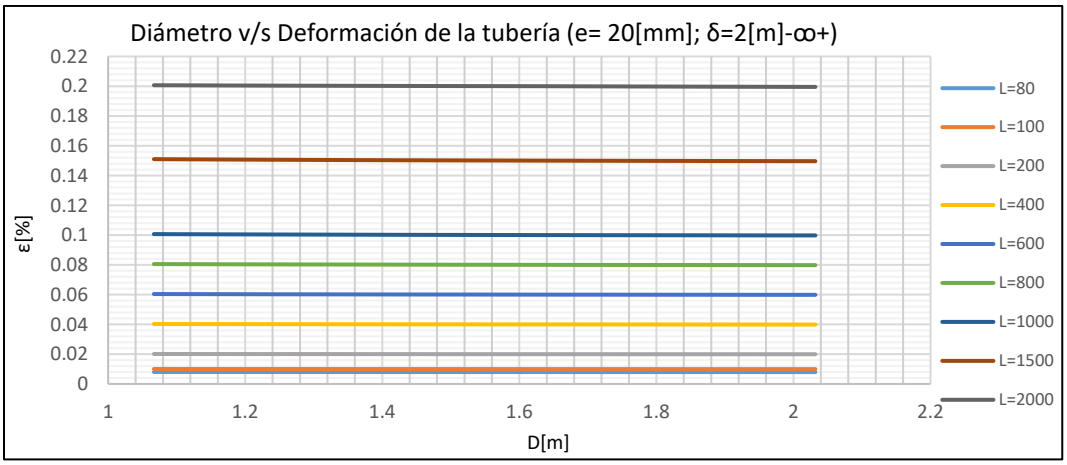


Gráfico 13-228: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m]], Suelo de Arena Fina.

- **Tipo de Suelo 2: Arena Gruesa**

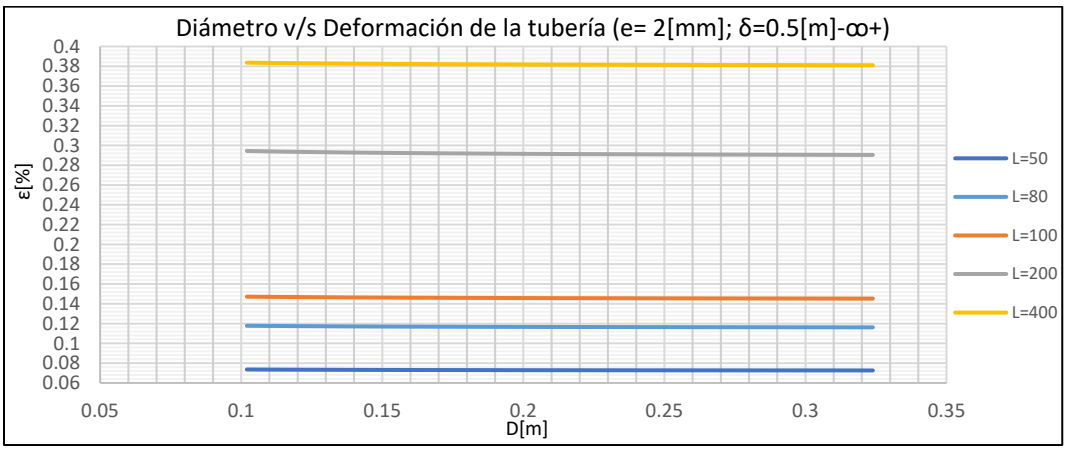


Gráfico 13-229: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m], Suelo Arena Gruesa.

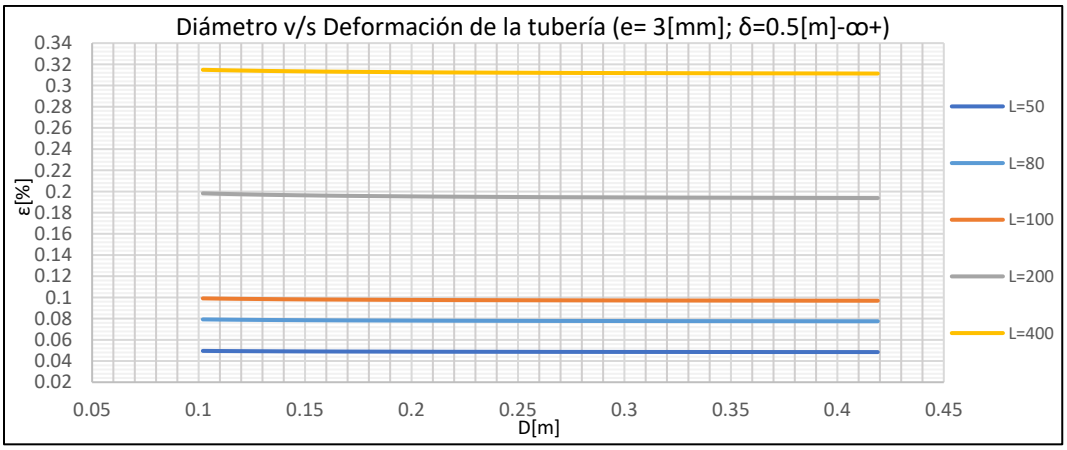


Gráfico 13-230: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Arena Gruesa.

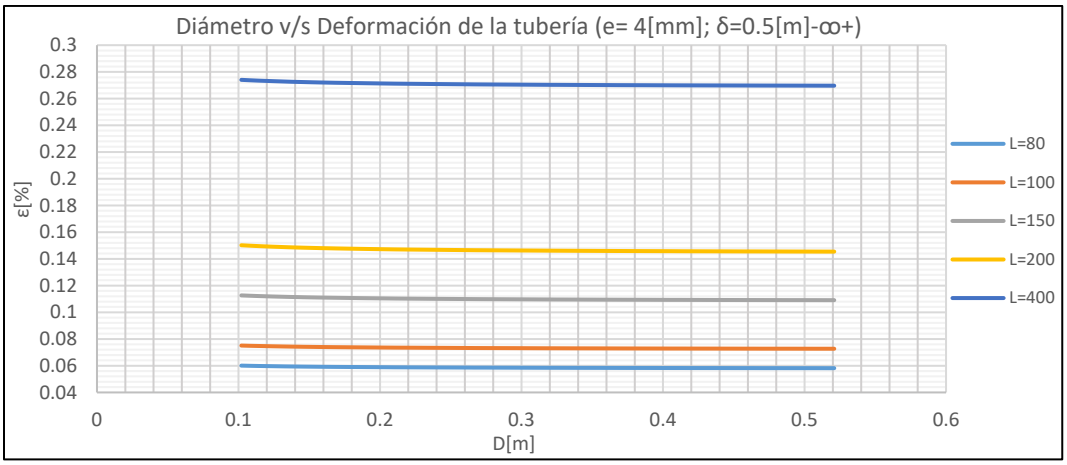


Gráfico 13-231: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Arena Gruesa.

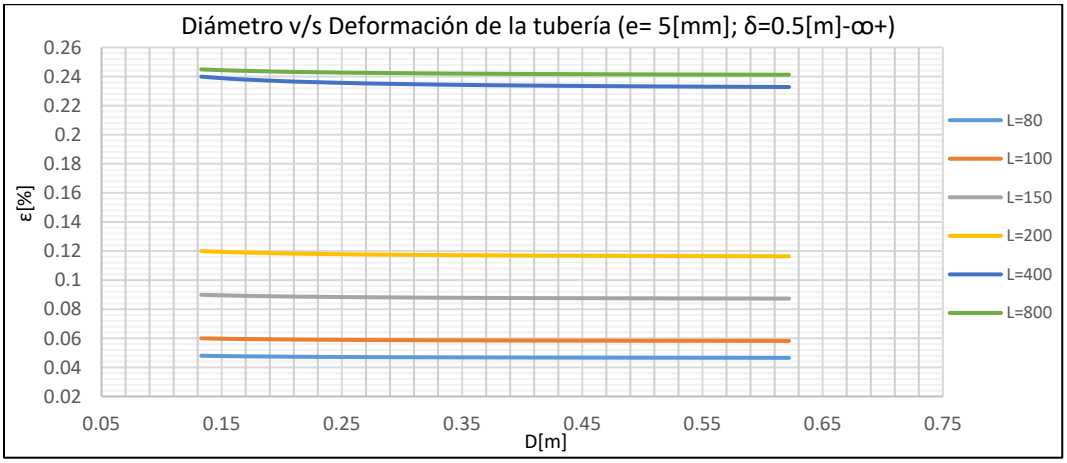


Gráfico 13-232: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Arena Gruesa.

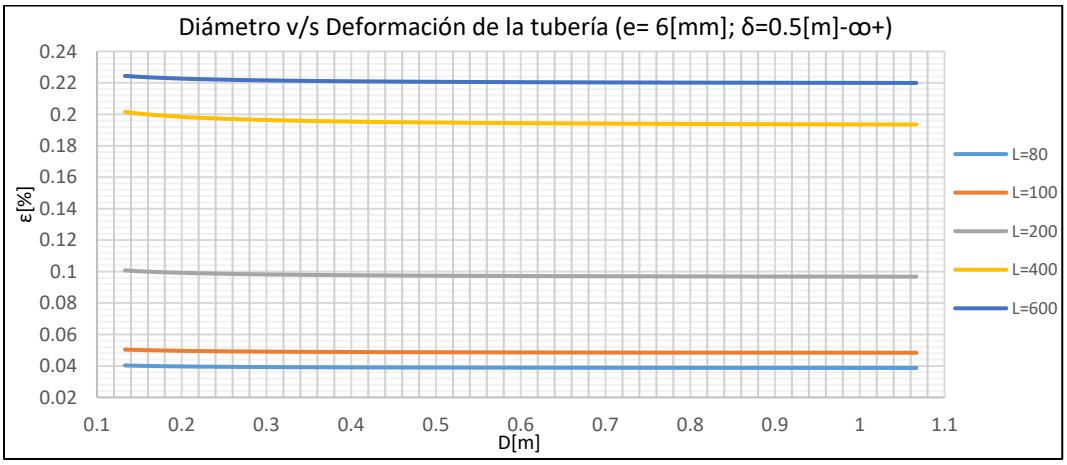


Gráfico 13-233: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Arena Gruesa.

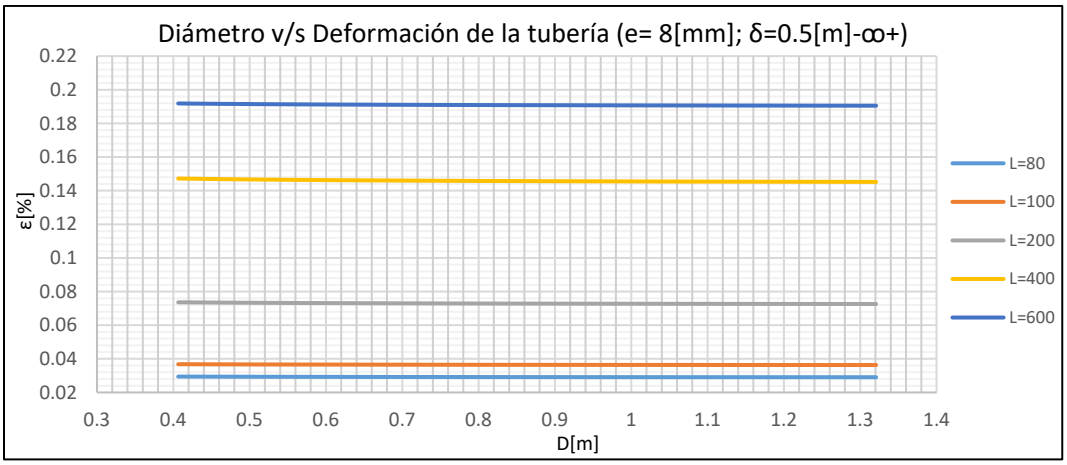


Gráfico 13-234: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Arena Gruesa.

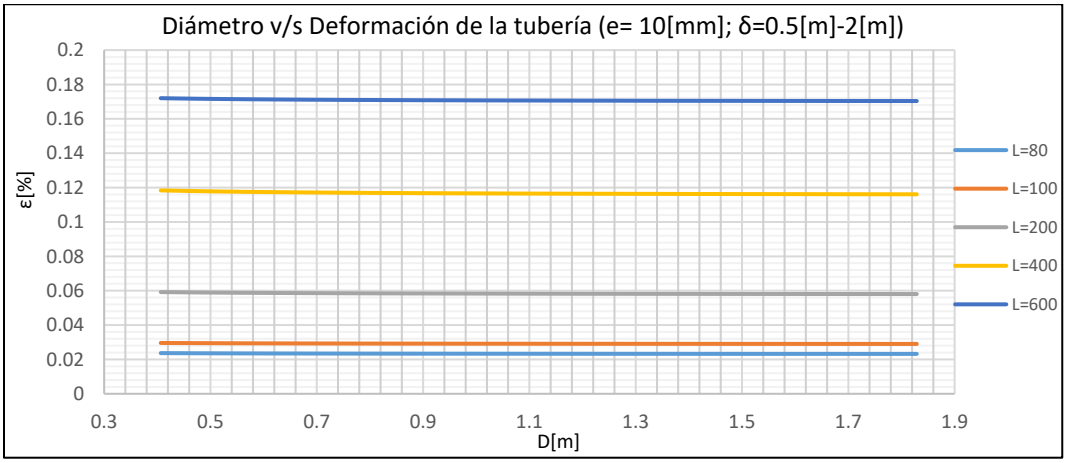


Gráfico 13-235: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m] , Suelo Arena Gruesa.

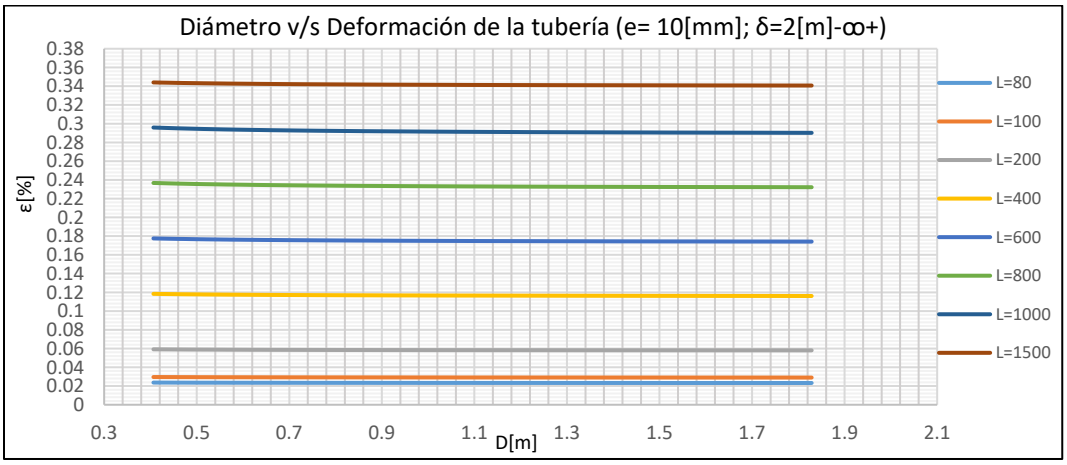


Gráfico 13-236: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m] , Suelo Arena Gruesa.

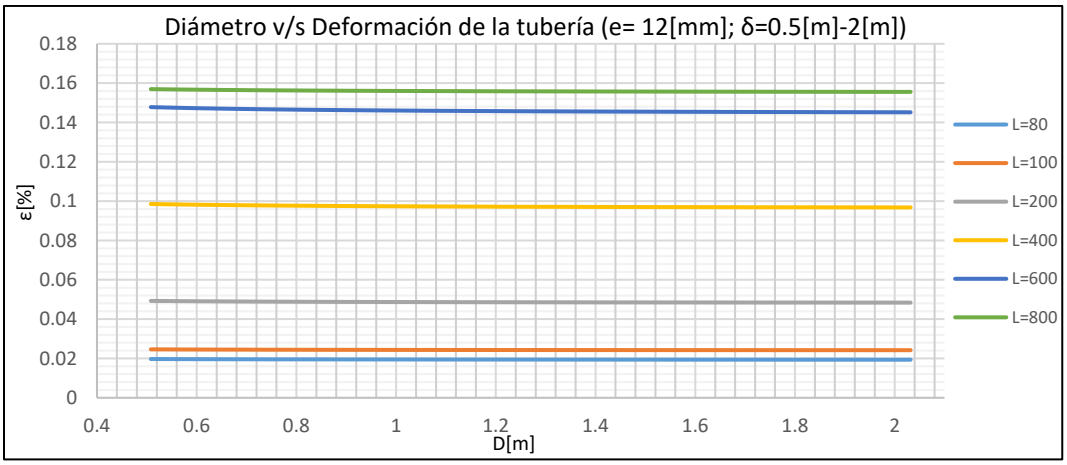


Gráfico 13-237: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m] , Suelo Arena Gruesa.

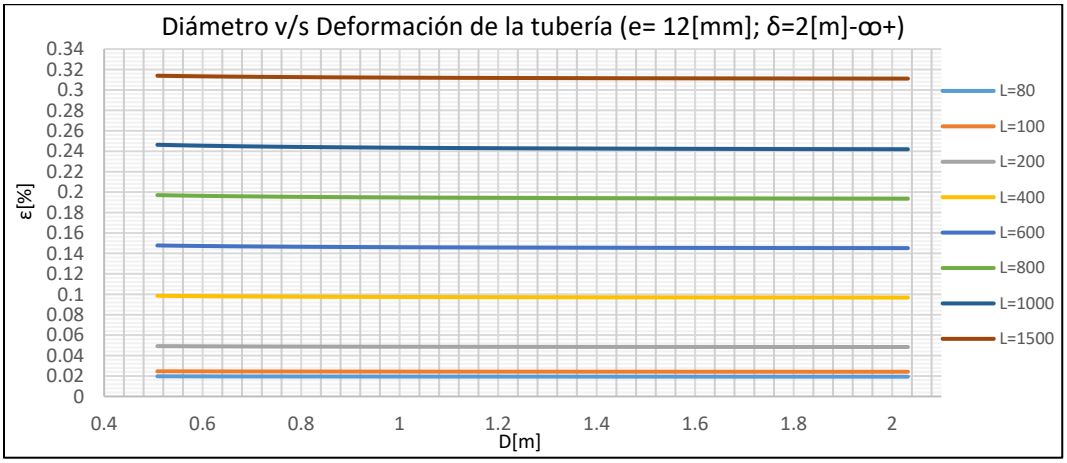


Gráfico 13-238: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m] , Suelo Arena Gruesa.

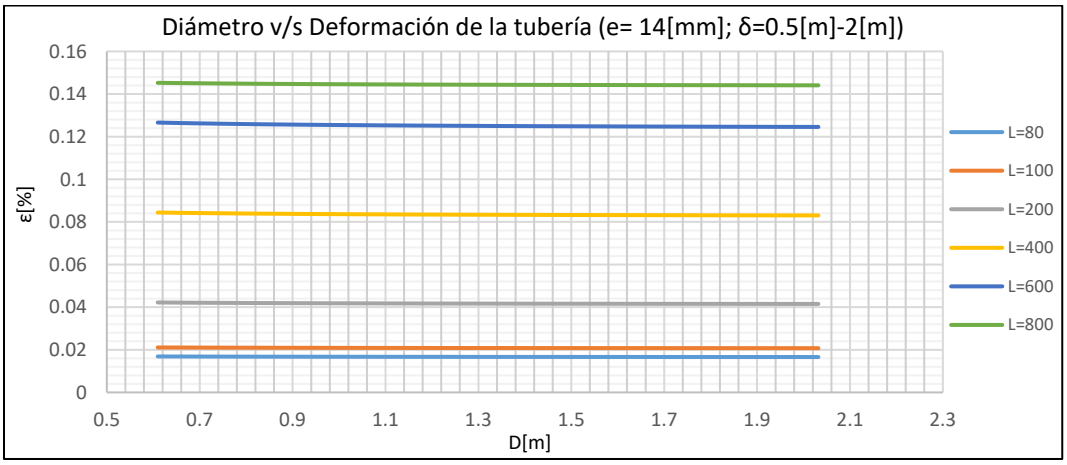


Gráfico 13-239: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m] , Suelo Arena Gruesa.

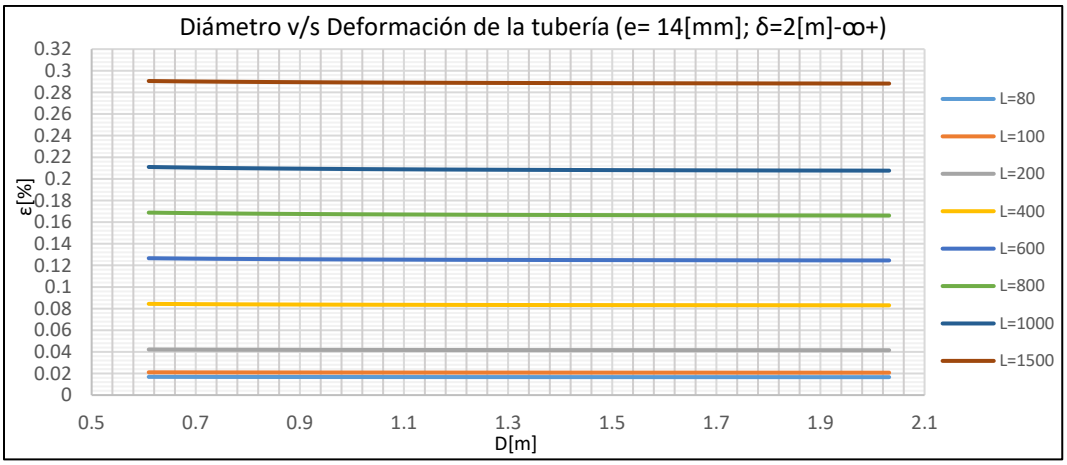


Gráfico 13-240: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m] , Suelo Arena Gruesa.

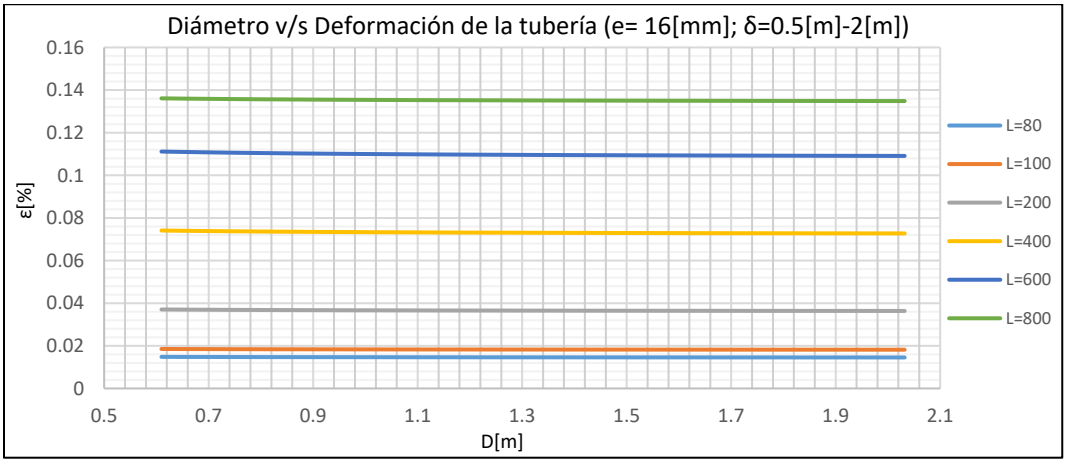


Gráfico 13-241: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m] , Suelo Arena Gruesa.

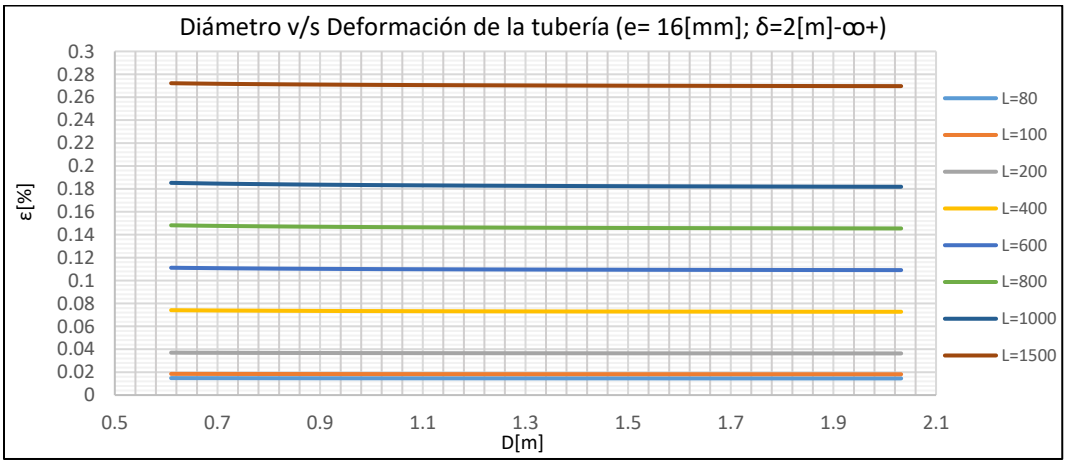


Gráfico 13-242: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m] , Suelo Arena Gruesa.

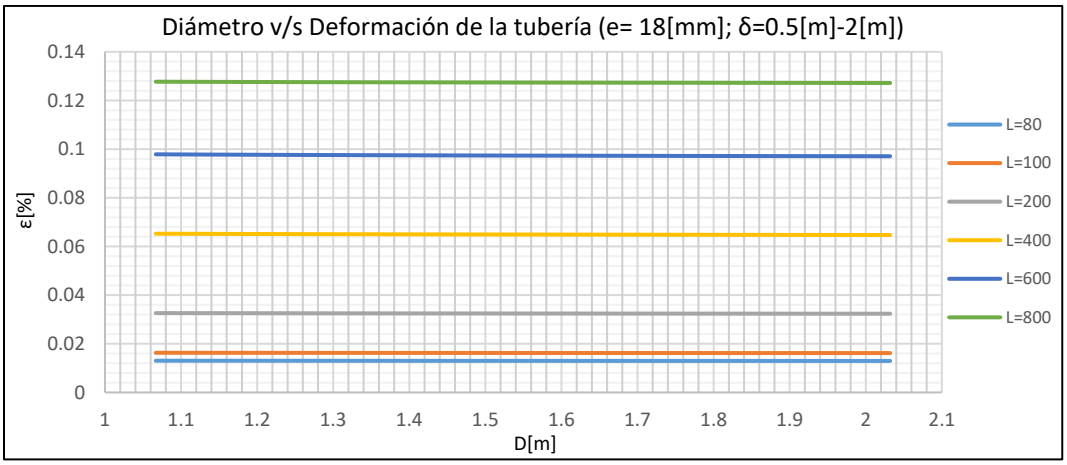


Gráfico 13-243: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m] , Suelo Arena Gruesa.

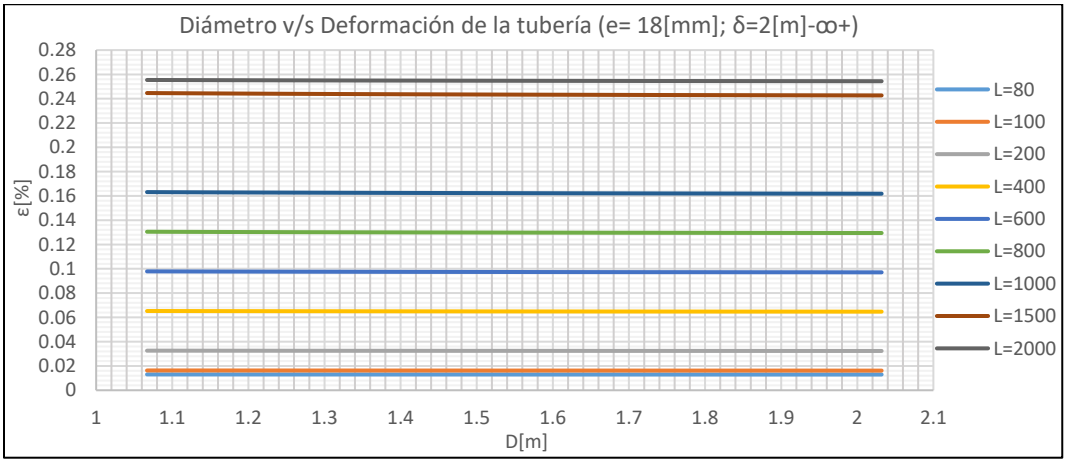


Gráfico 13-244: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m] , Suelo Arena Gruesa.

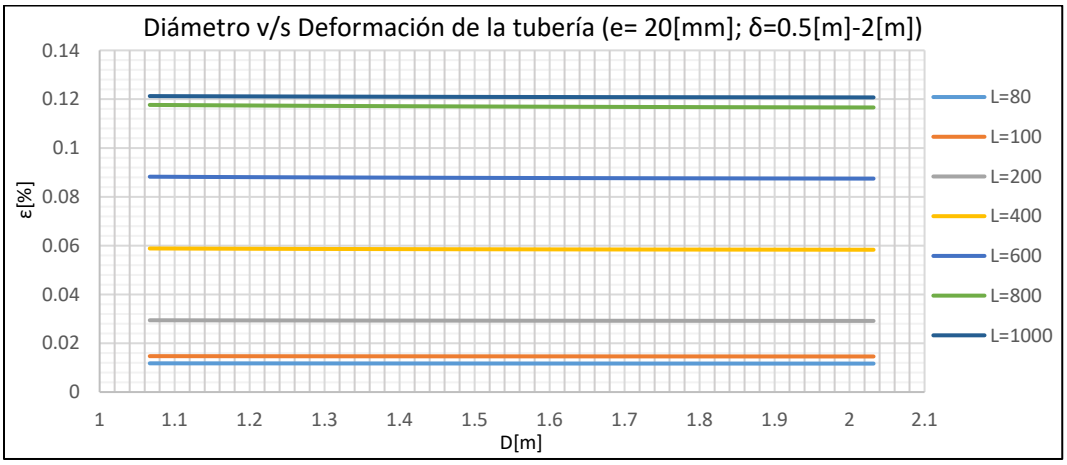


Gráfico 13-245: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m] , Suelo Arena Gruesa.

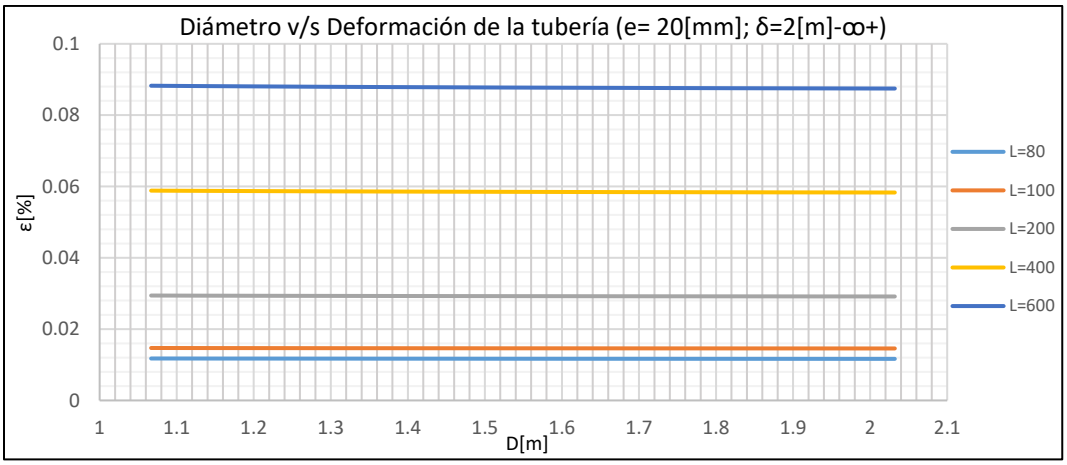


Gráfico 13-246: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2 [m] , Suelo Arena Gruesa.

- **Tipo de Suelo 3: Limo de Plasticidad Baja**

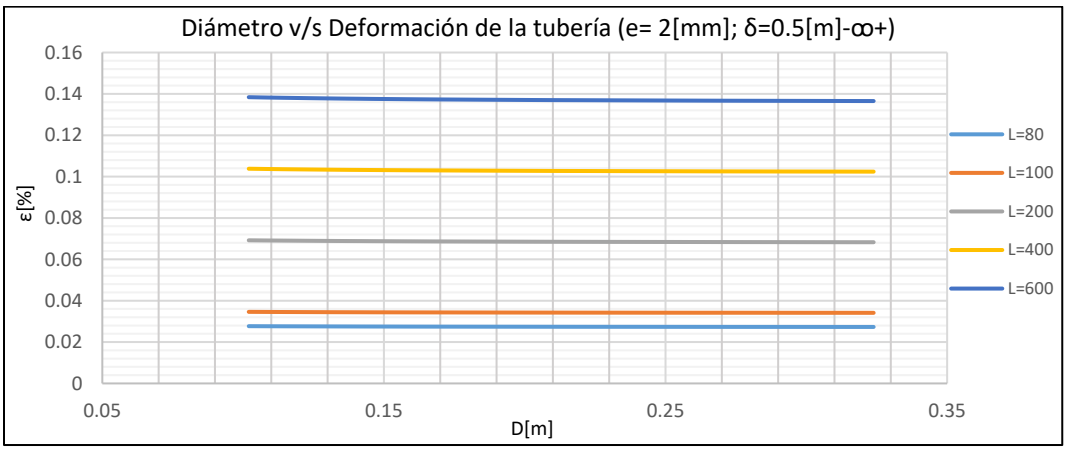


Gráfico 13-247: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 2[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Limoso de baja Plasticidad.

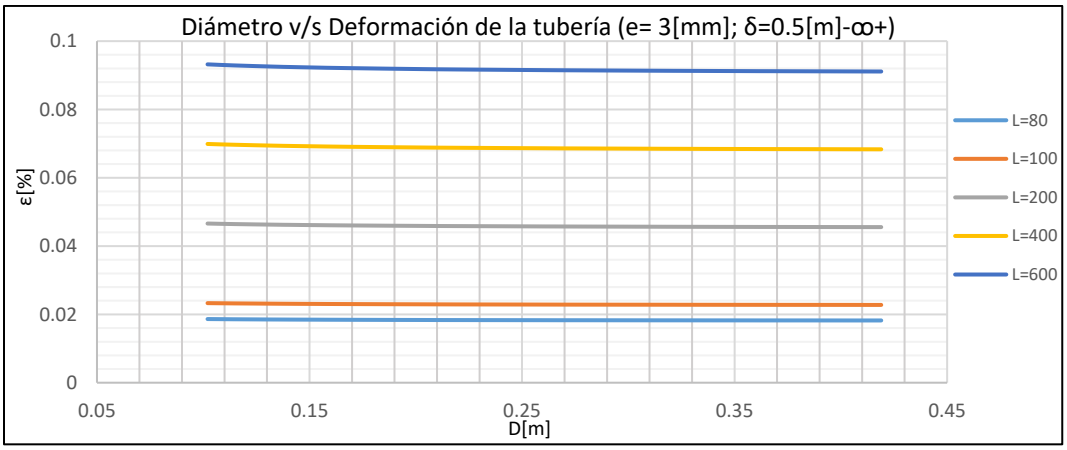


Gráfico 13-248: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 3[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Limoso de baja Plasticidad.

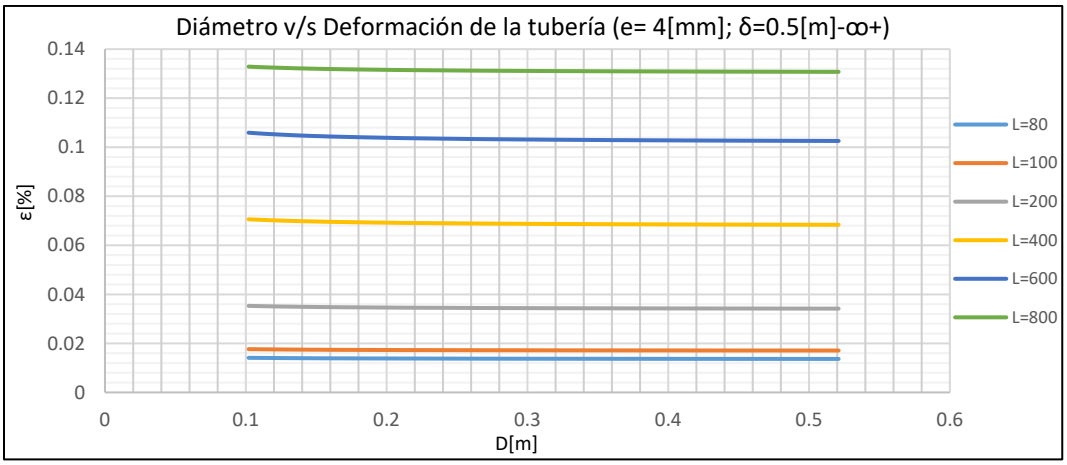


Gráfico 13-249: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 4[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 0.5 [m] , Suelo Limoso de baja Plasticidad.

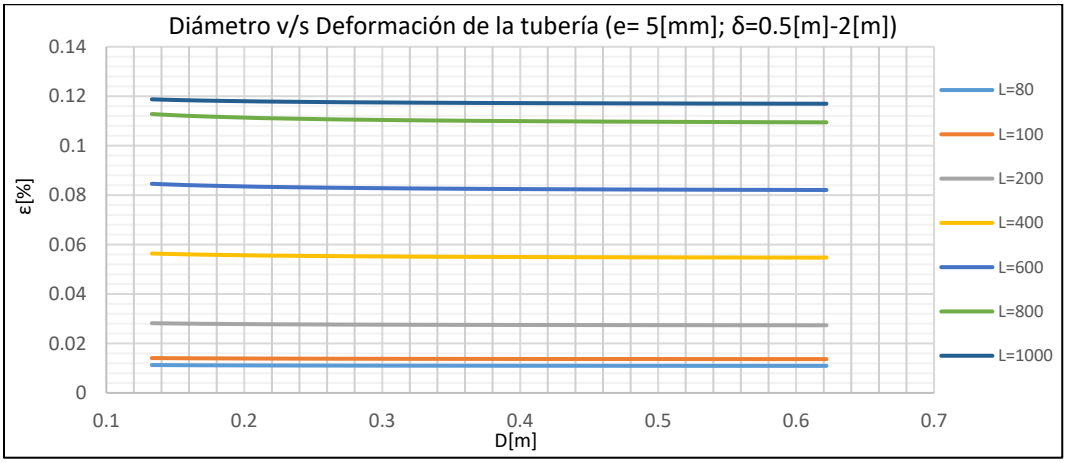


Gráfico 13-250: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

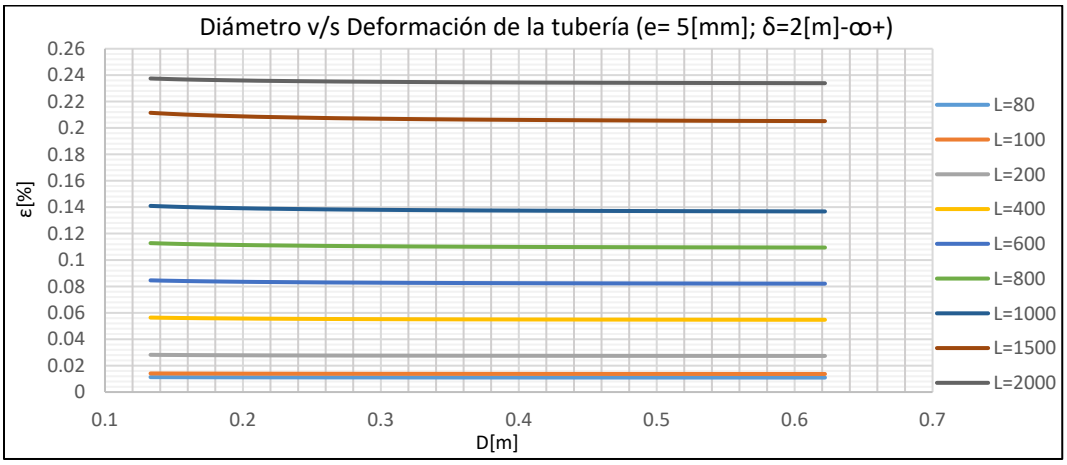


Gráfico 13-251: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 5[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

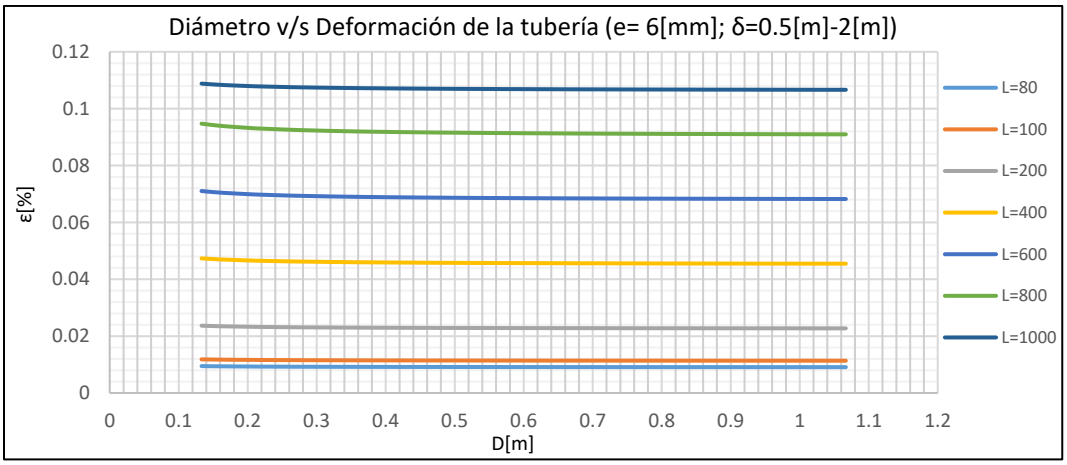


Gráfico 13-252: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

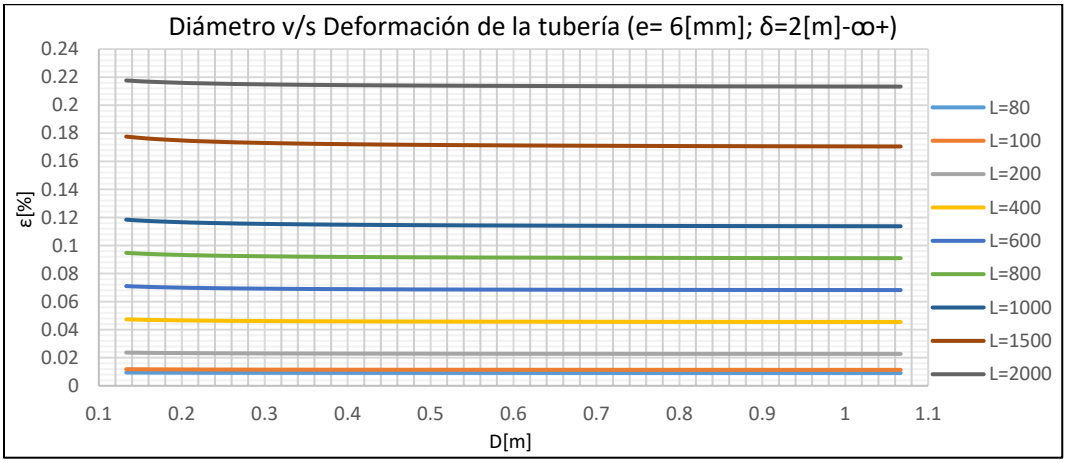


Gráfico 13-253: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 6[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

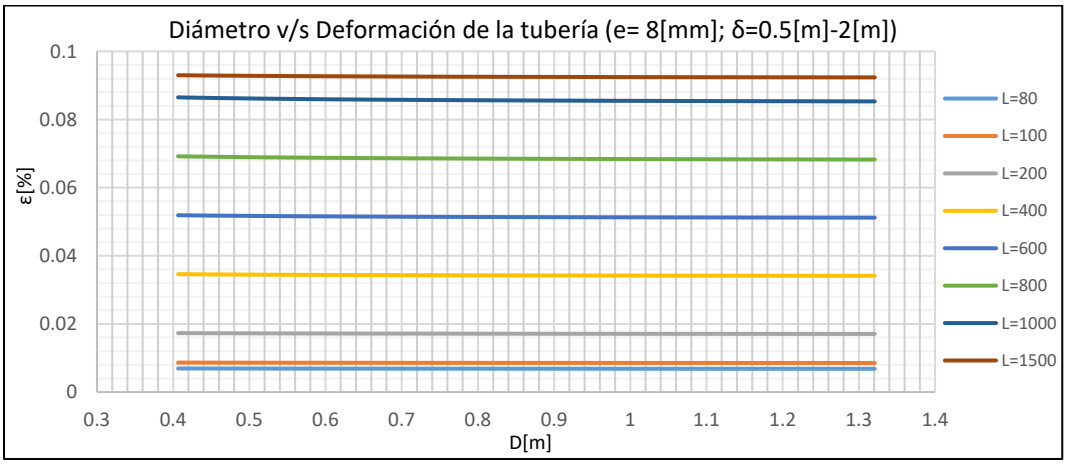


Gráfico 13-254: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

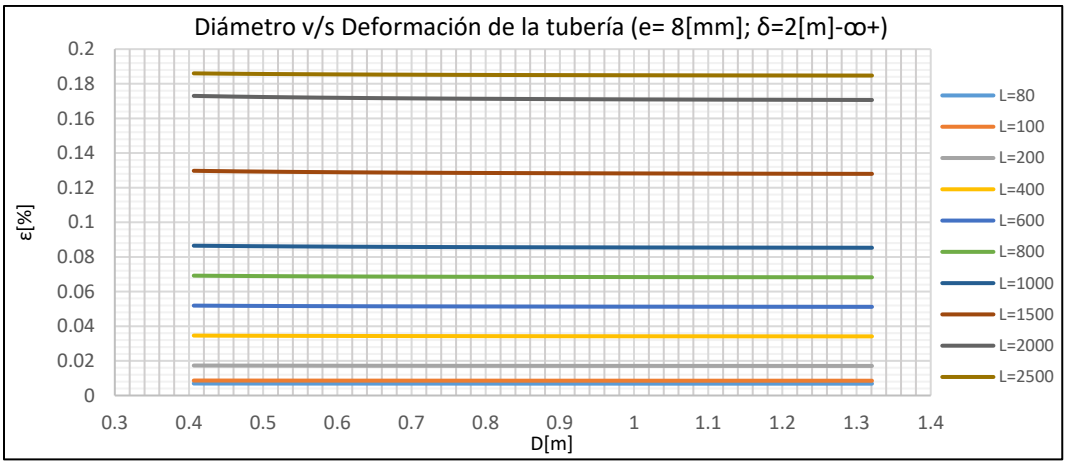


Gráfico 13-255: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 8[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

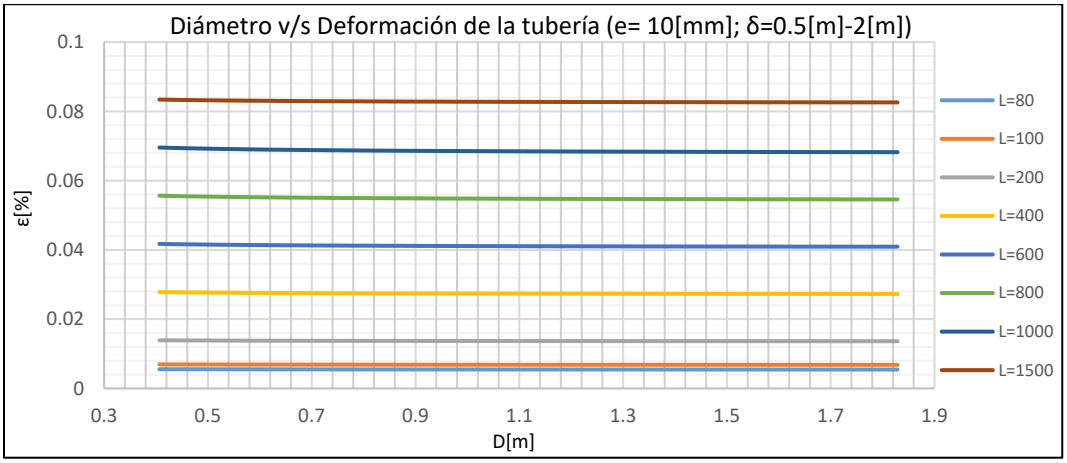


Gráfico 13-256: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

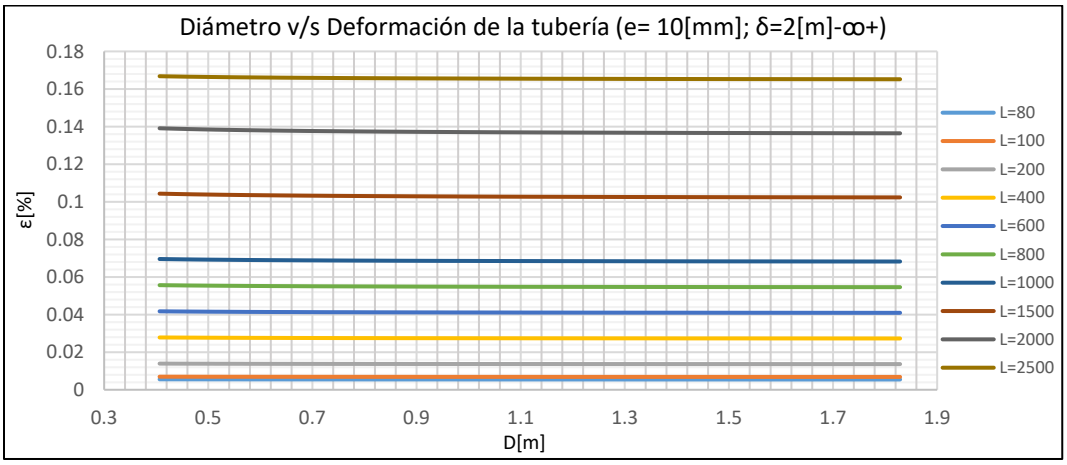


Gráfico 13-257: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 10[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

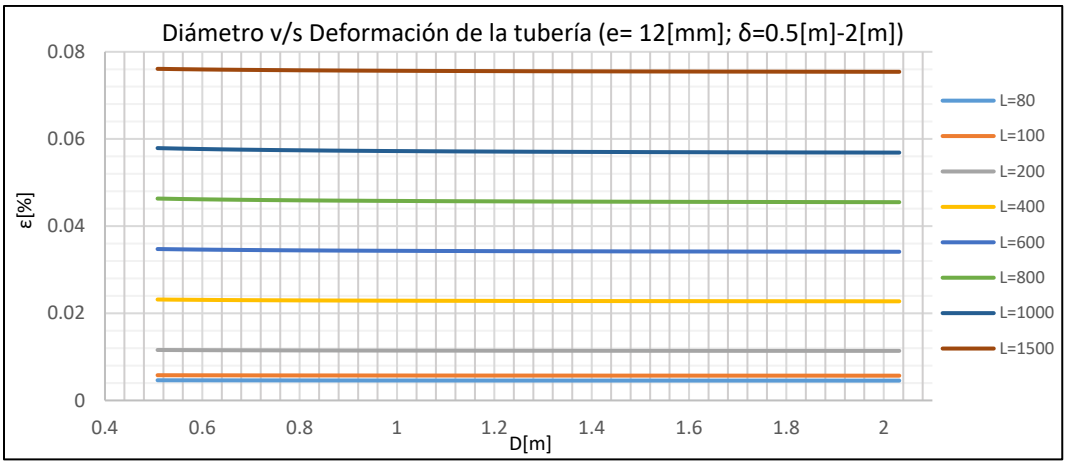


Gráfico 13-258: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

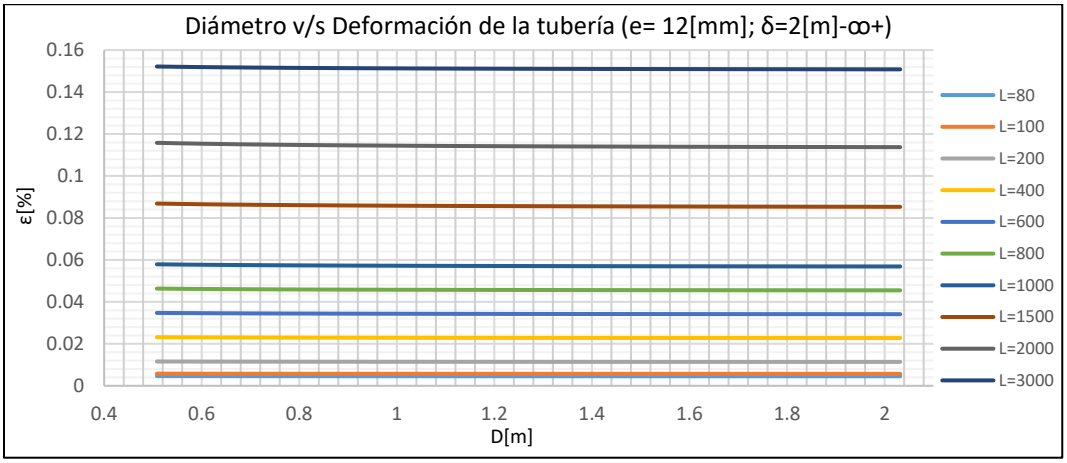


Gráfico 13-259: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 12[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

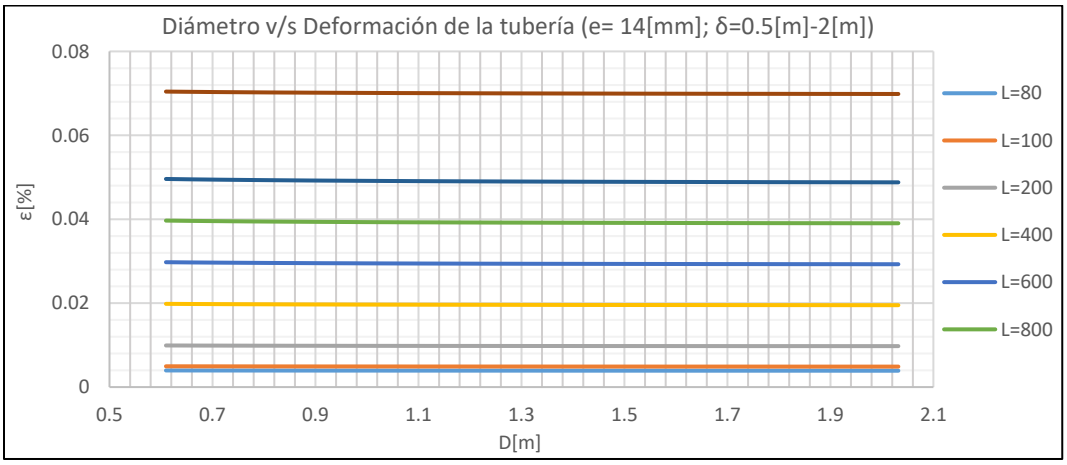


Gráfico 13-260: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

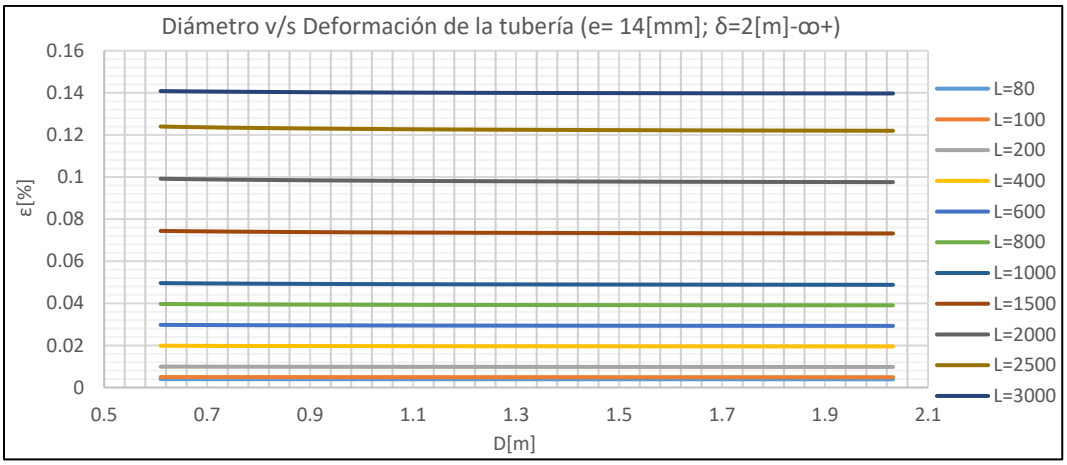


Gráfico 13-261: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 14[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

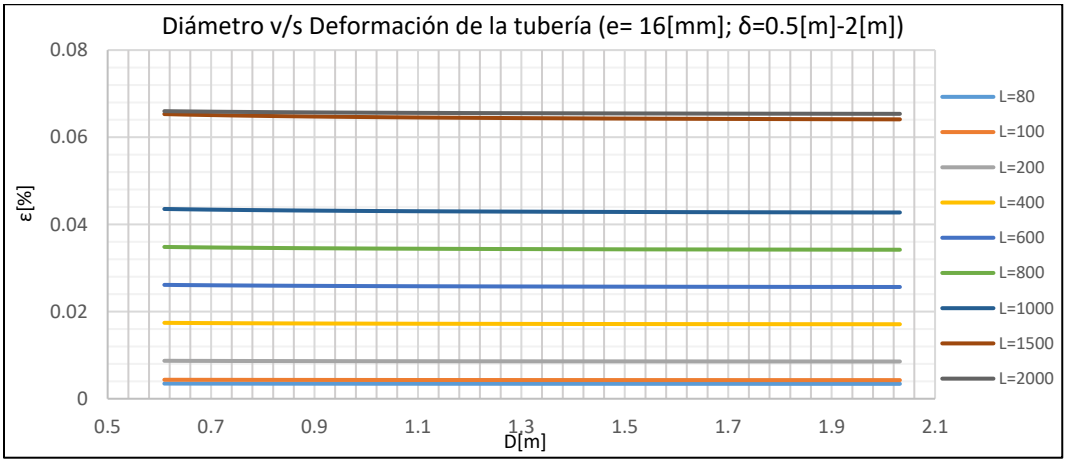


Gráfico 13-262: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

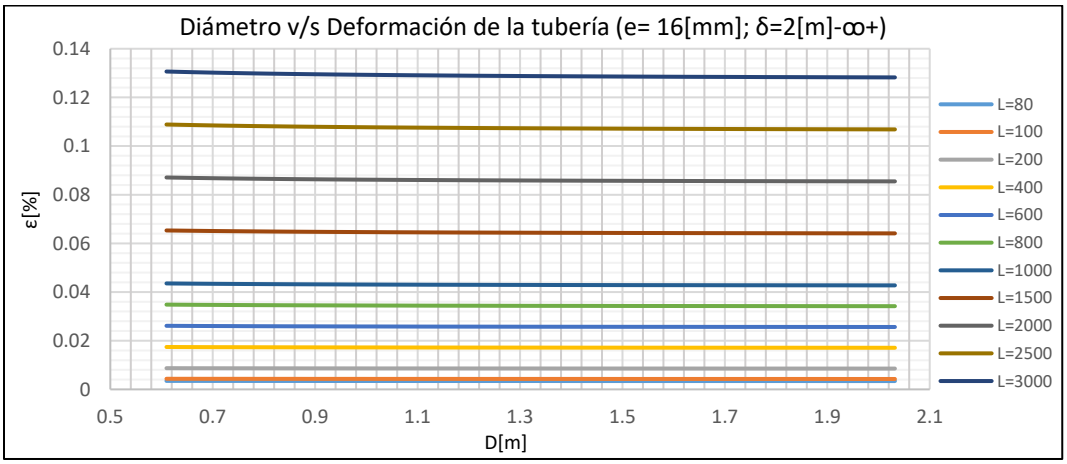


Gráfico 13-263: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 16[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

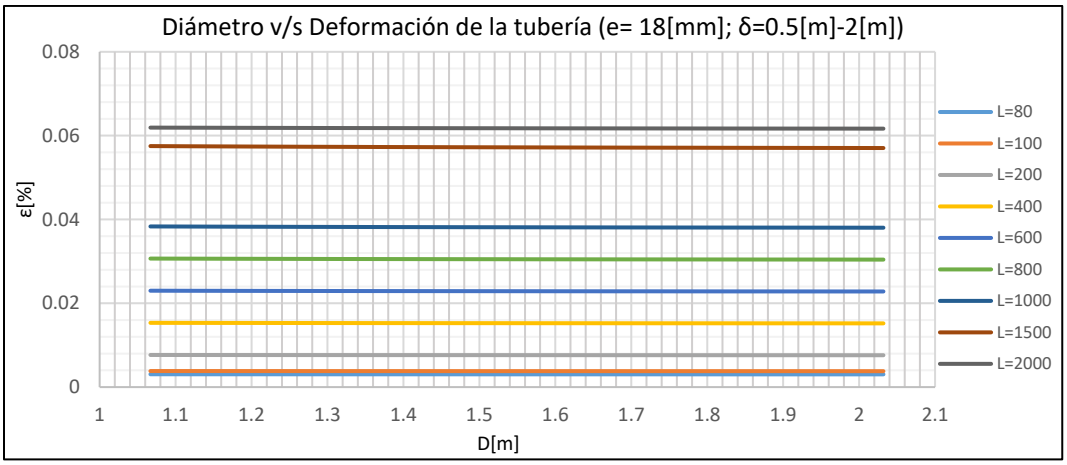


Gráfico 13-264: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

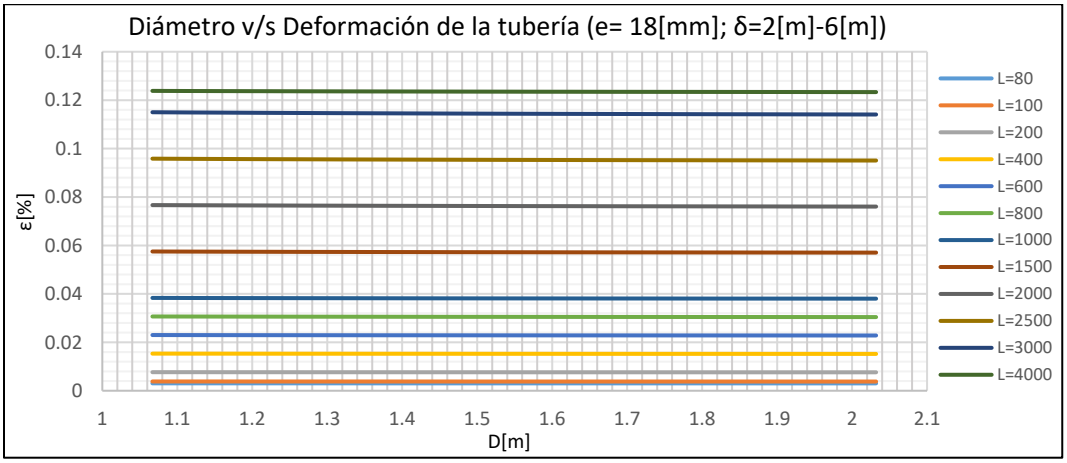


Gráfico 13-265: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

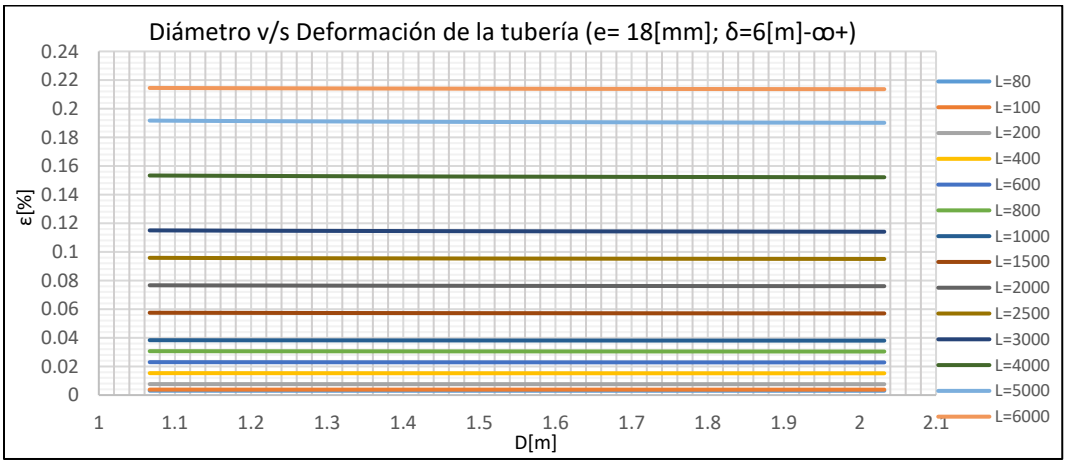


Gráfico 13-266: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 18[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

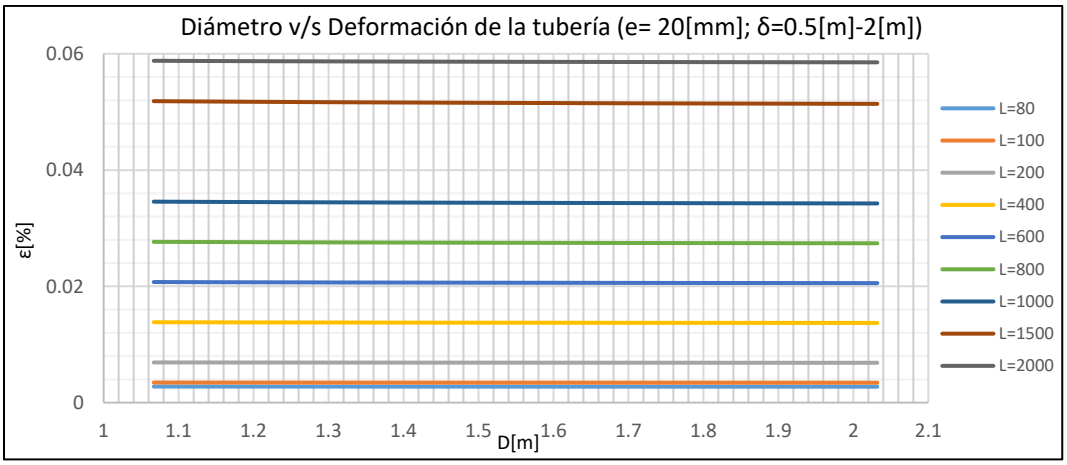


Gráfico 13-267: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

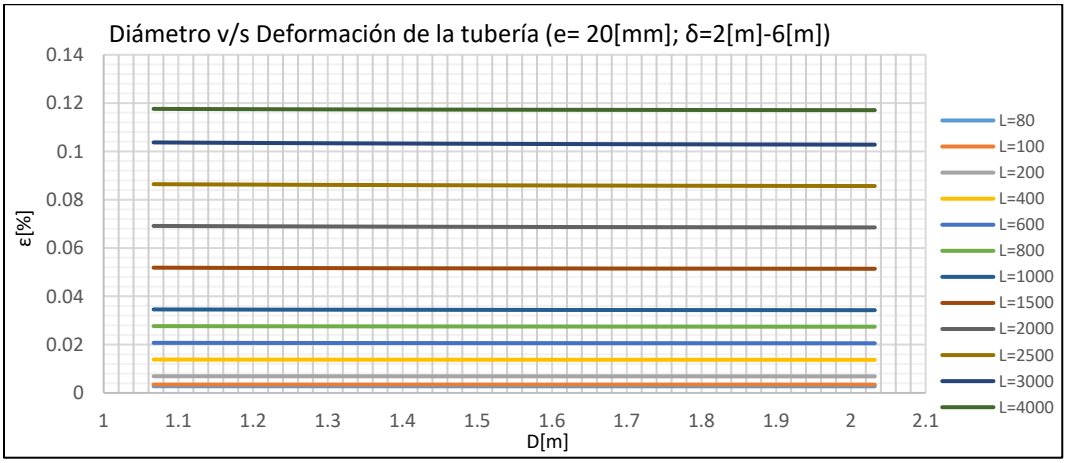


Gráfico 13-268: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

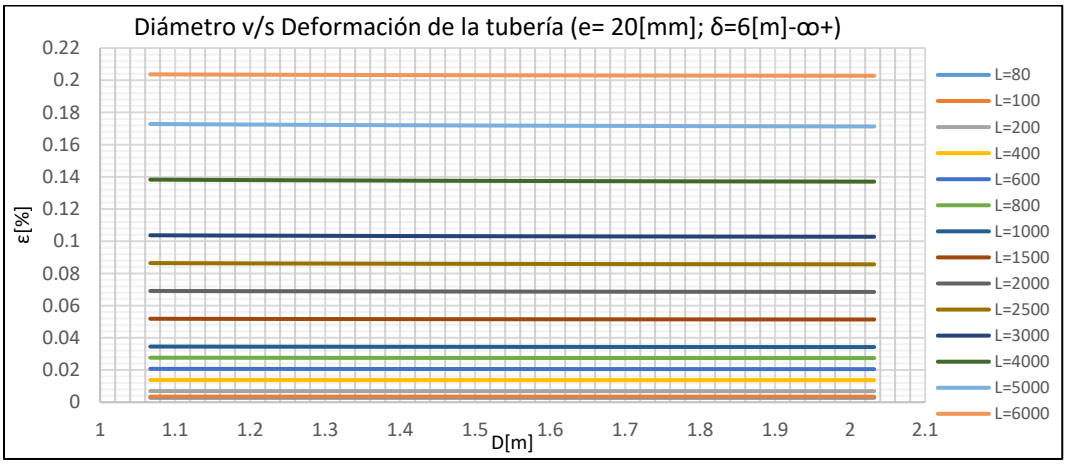


Gráfico 13-269: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Acero de espesor 20[mm], desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de baja Plasticidad.

L.2. Tuberías de HDPE

L.2.1. Tuberías de densidad PE80

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

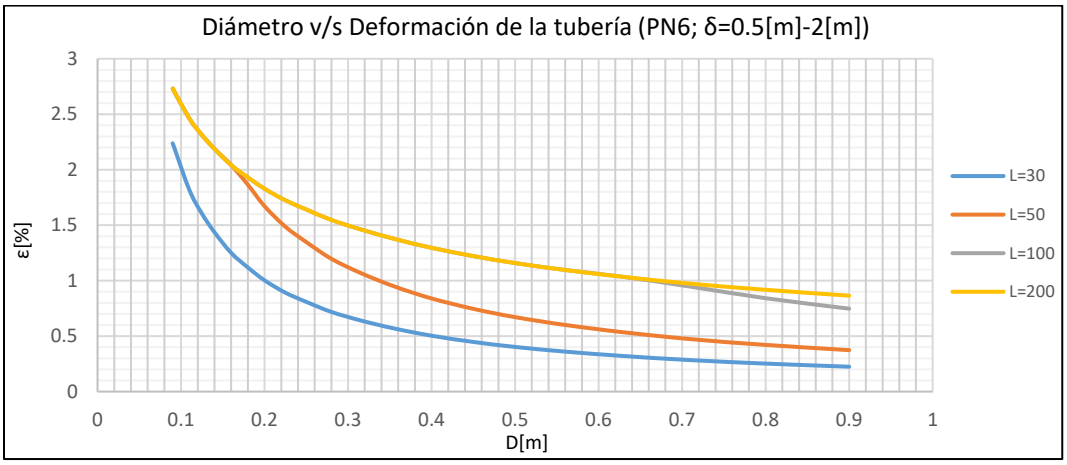


Gráfico 13-270: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

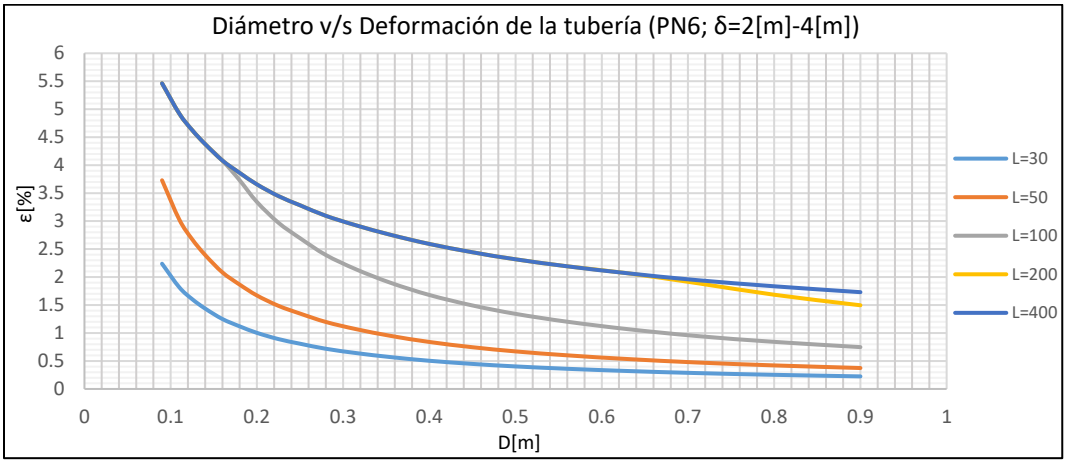


Gráfico 13-271: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo de Arena Fina.

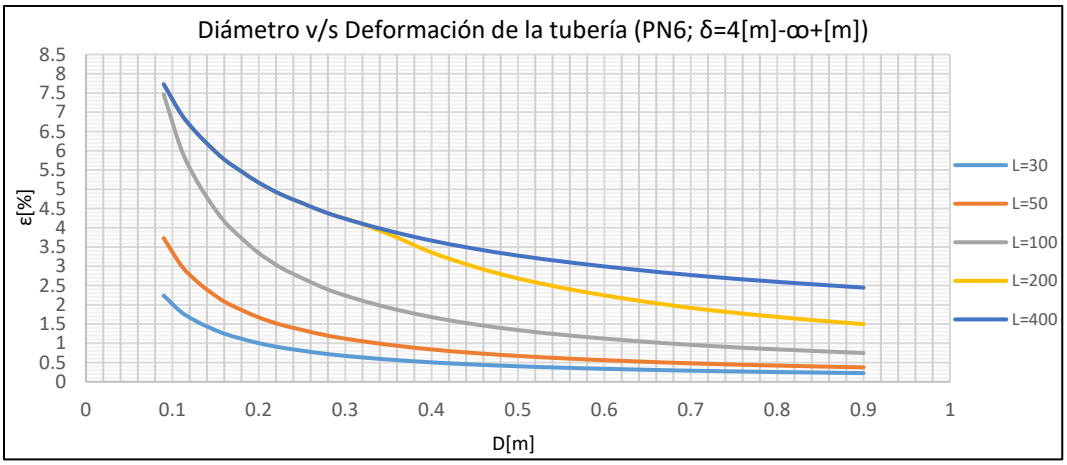


Gráfico 13-272: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena Fina.

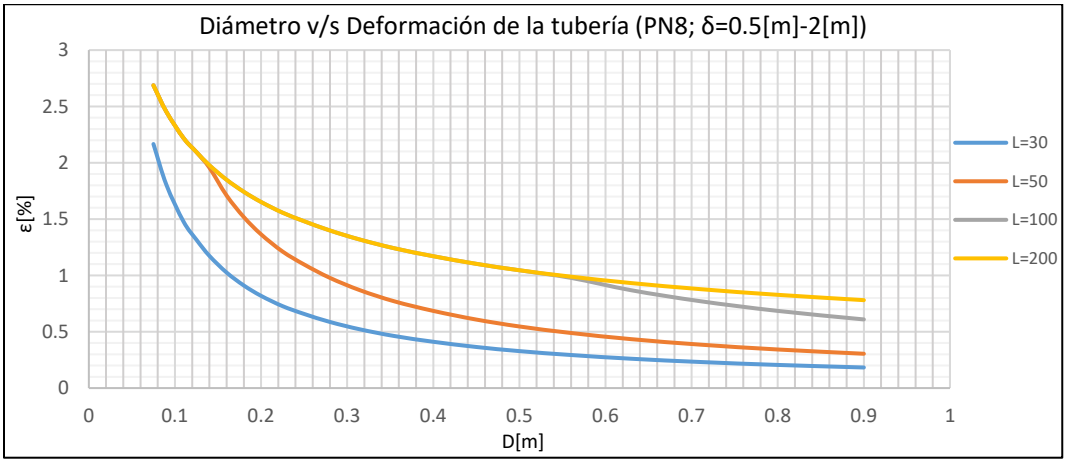


Gráfico 13-273: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

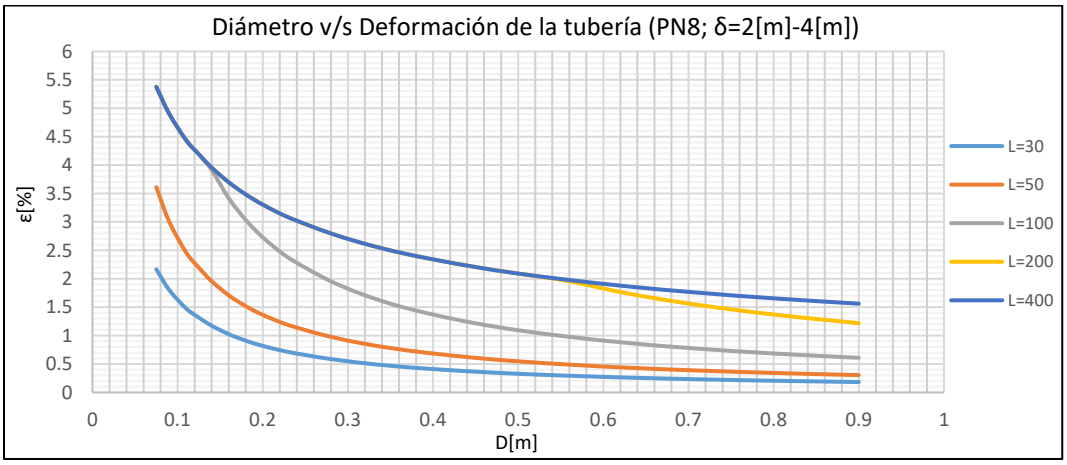


Gráfico 13-274: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo de Arena Fina.

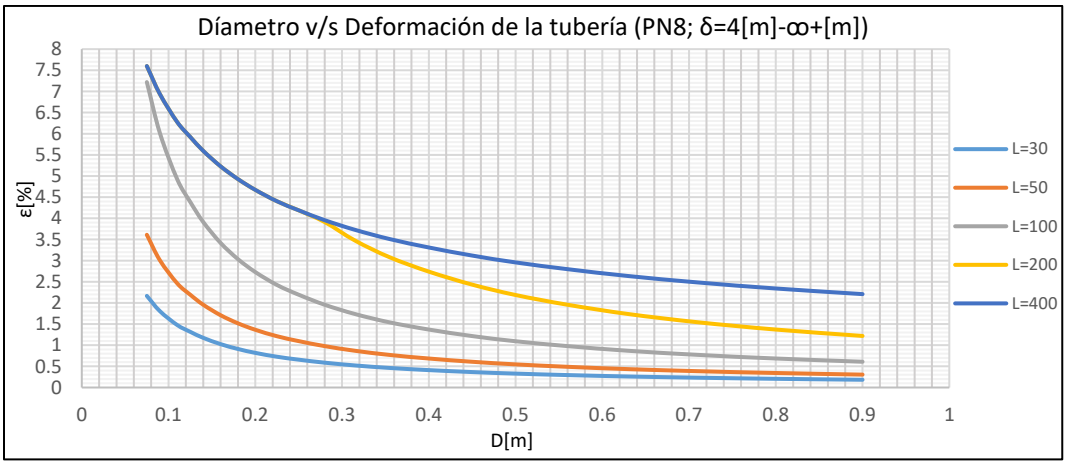


Gráfico 13-275: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena Fina.

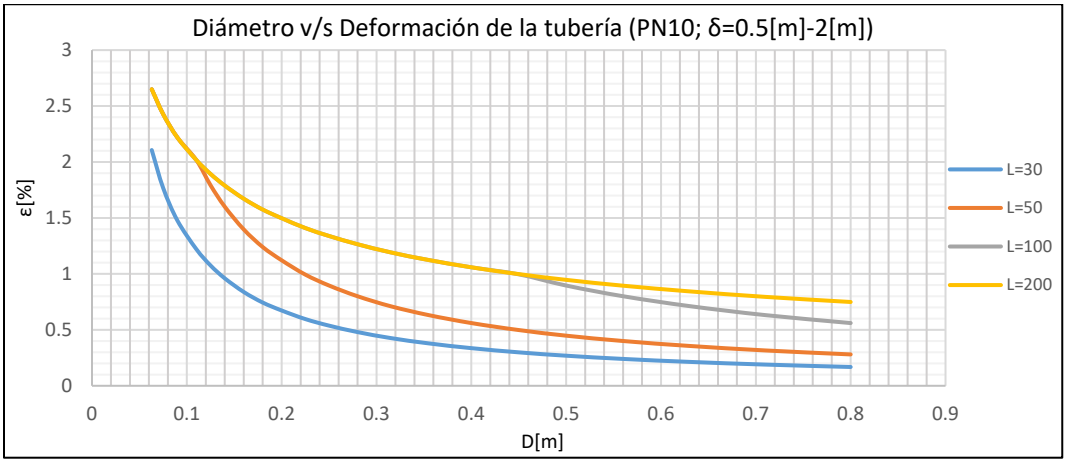


Gráfico 13-276: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

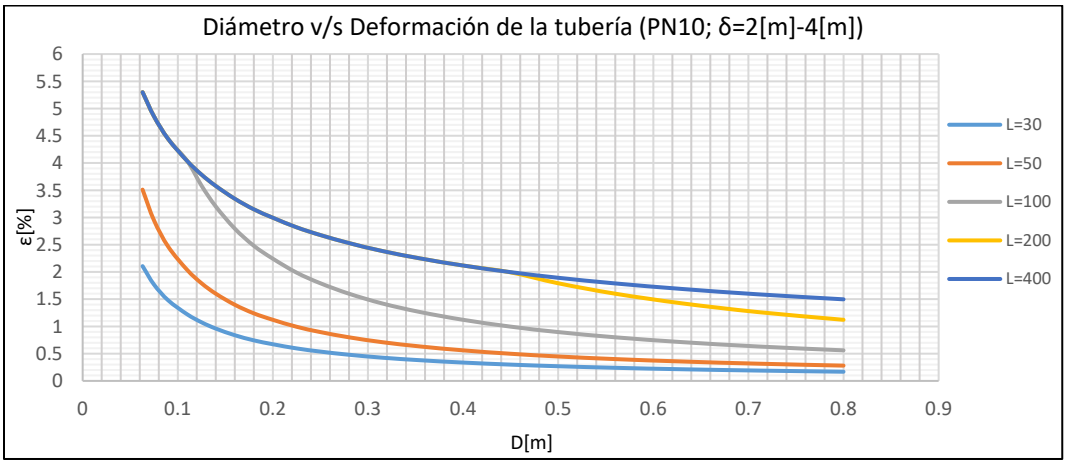


Gráfico 13-277: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo de Arena Fina.

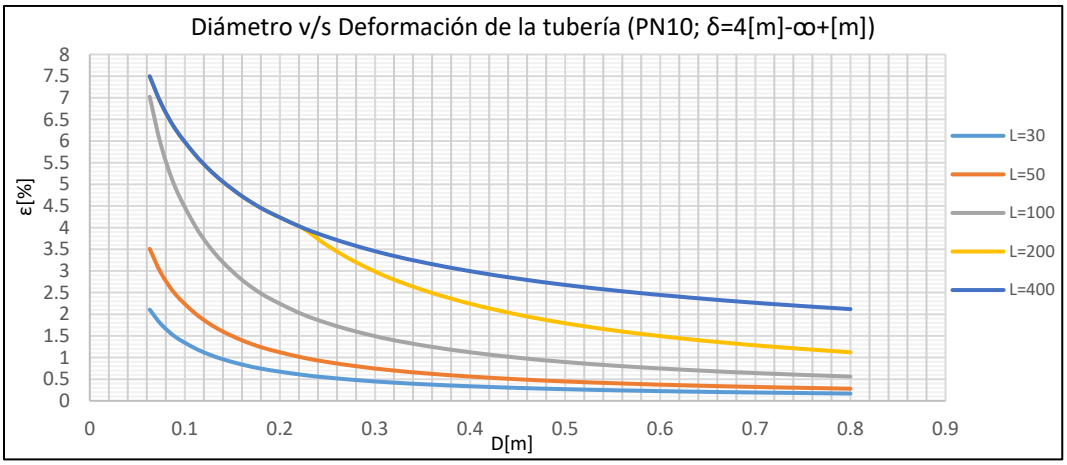


Gráfico 13-278: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena Fina.

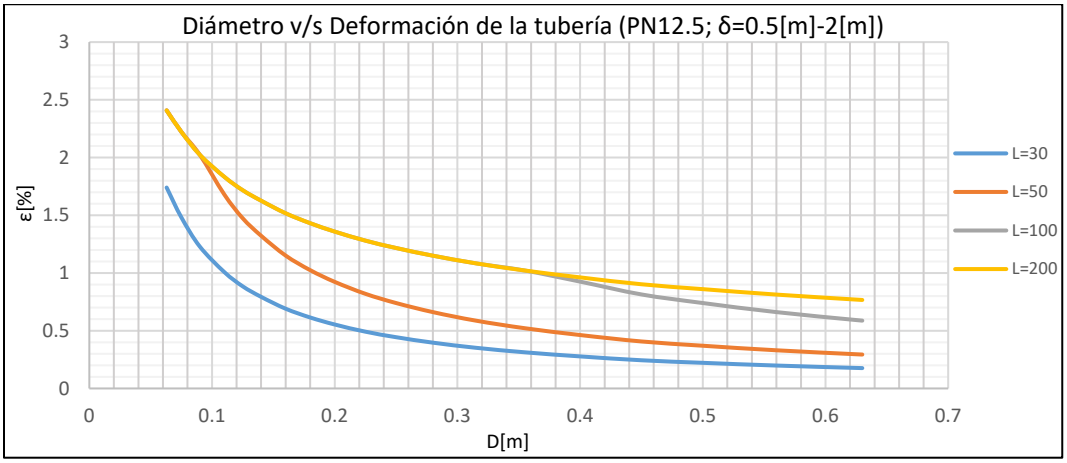


Gráfico 13-279: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

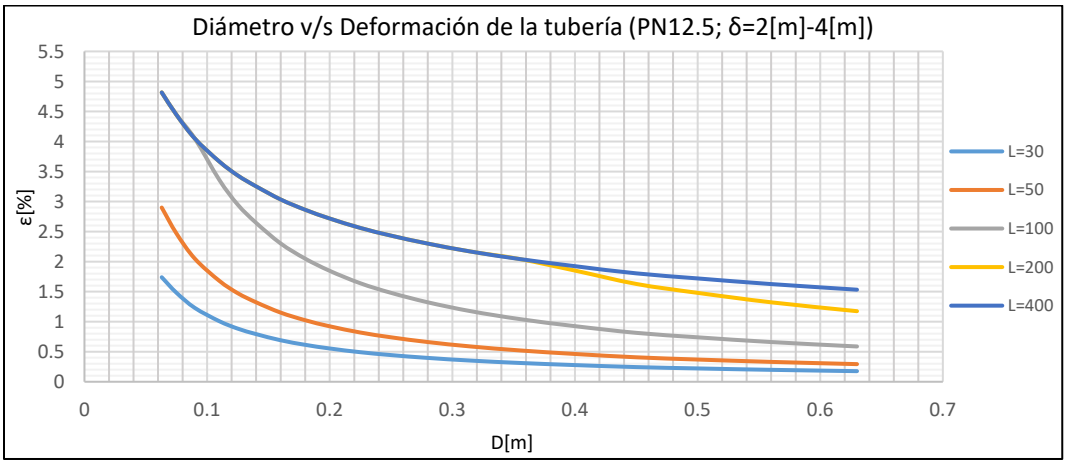


Gráfico 13-280: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo de Arena Fina.

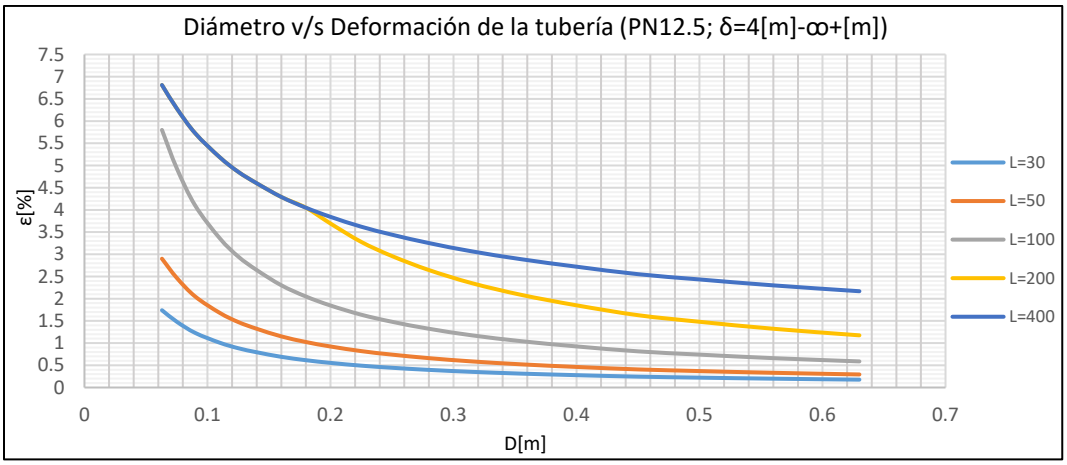


Gráfico 13-281: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena Fina.

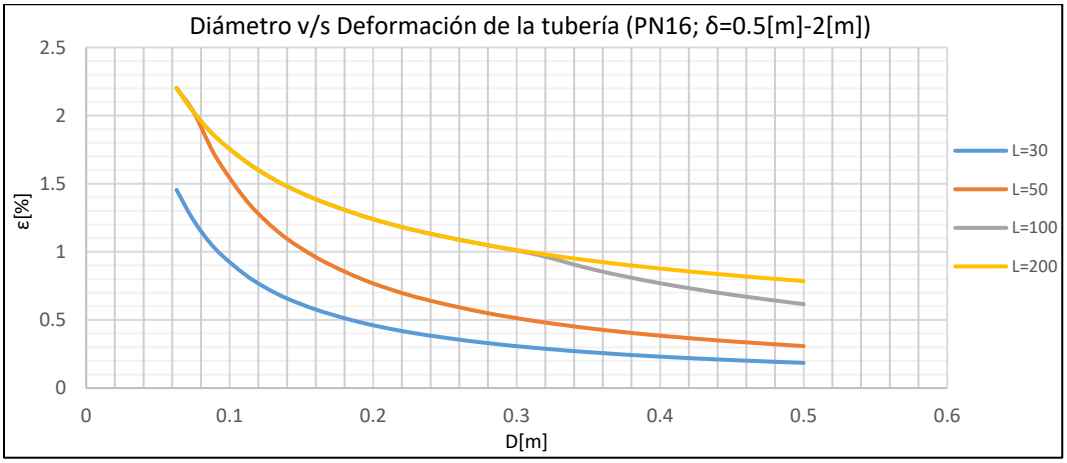


Gráfico 13-282: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

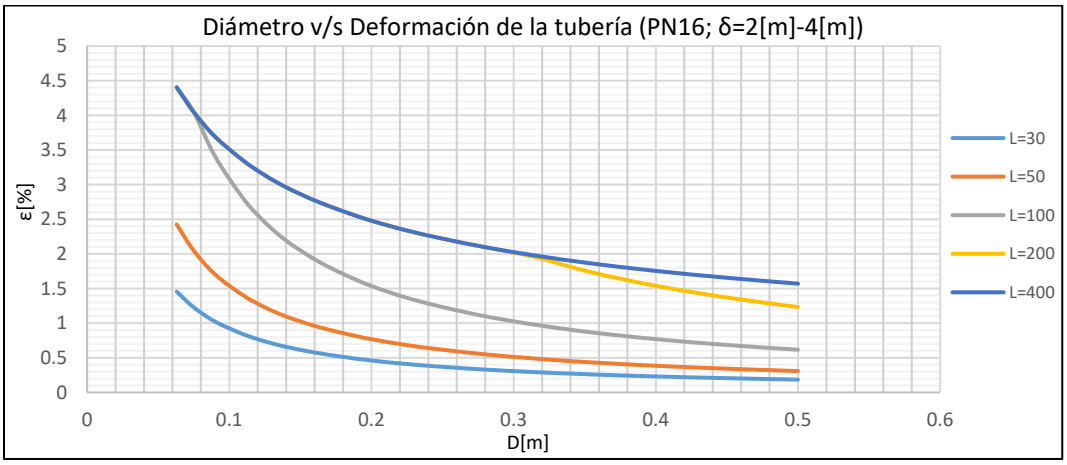


Gráfico 13-283: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo de Arena Fina..

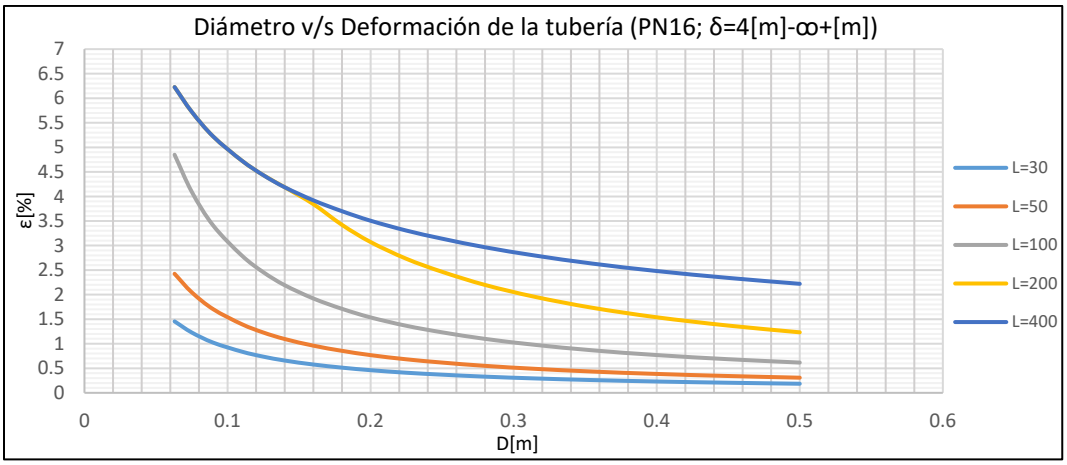


Gráfico 13-284: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena gruesa**

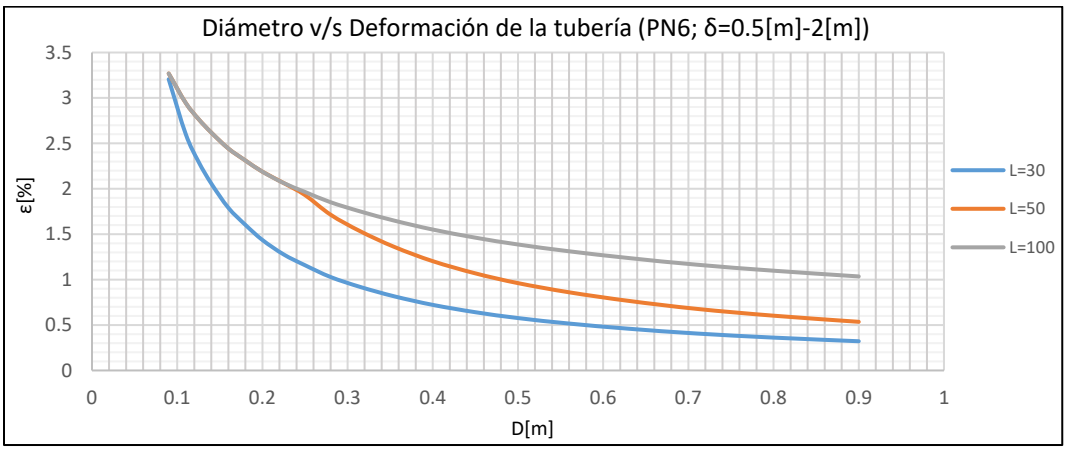


Gráfico 13-285: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

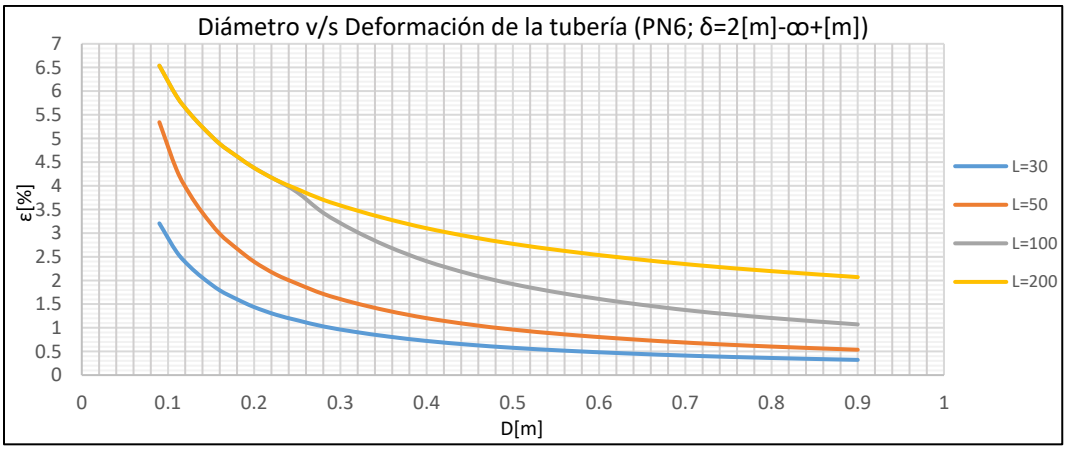


Gráfico 13-286: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo de Arena gruesa.

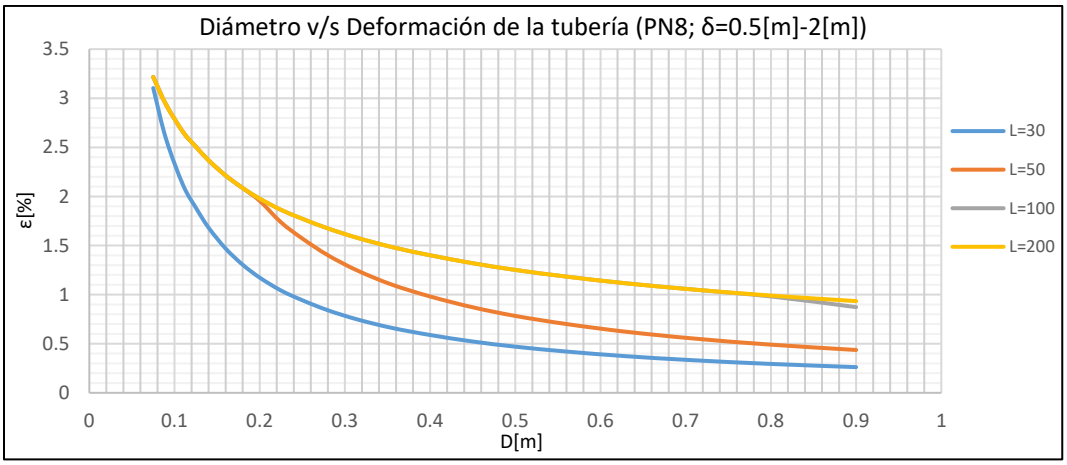


Gráfico 13-287: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

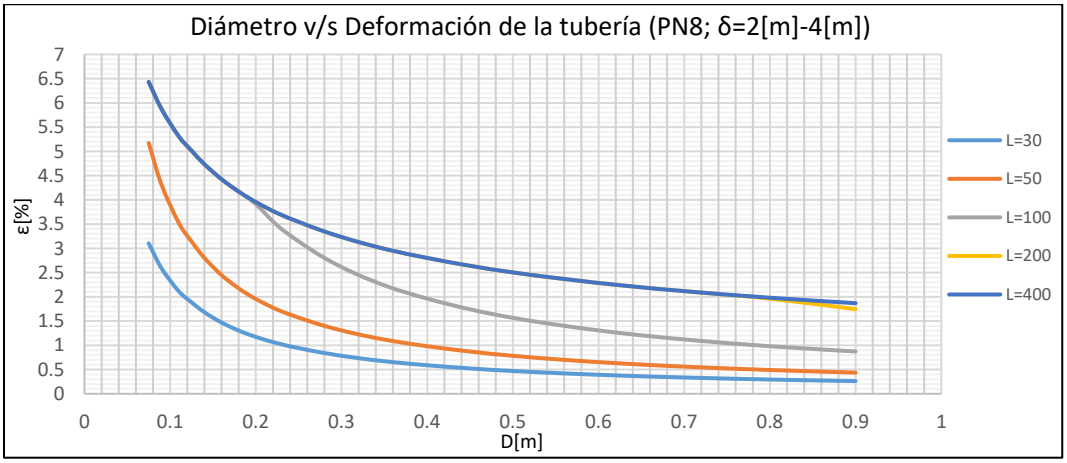


Gráfico 13-288: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo de Arena gruesa.

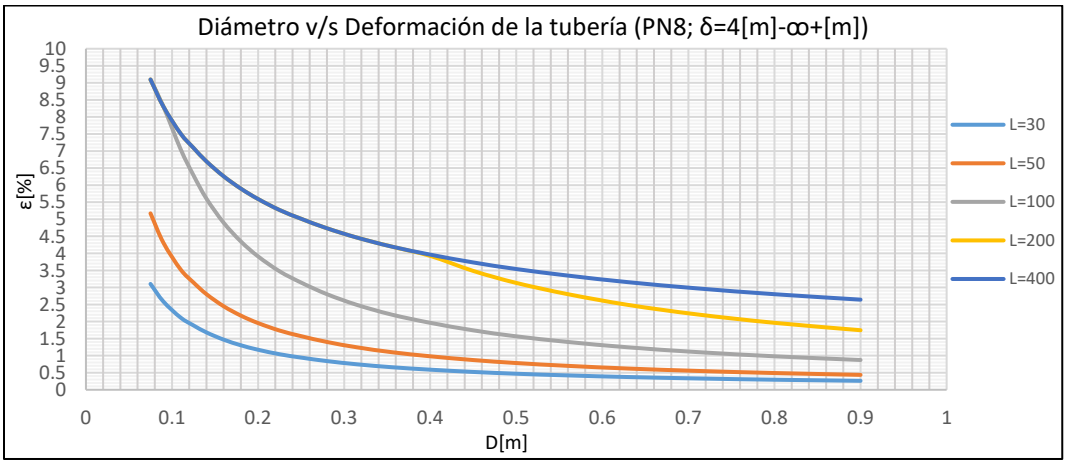


Gráfico 13-289: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena gruesa.

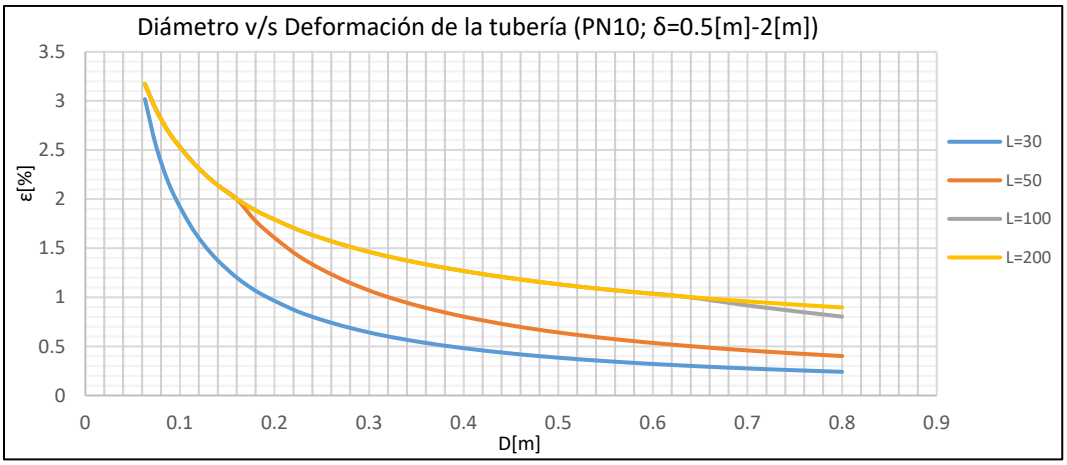


Gráfico 13-290: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

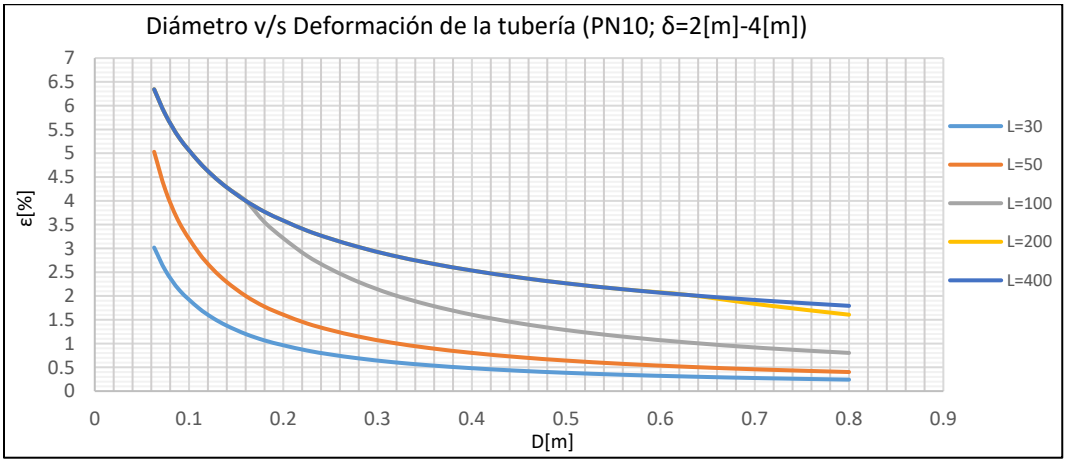


Gráfico 13-291: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo de Arena gruesa.

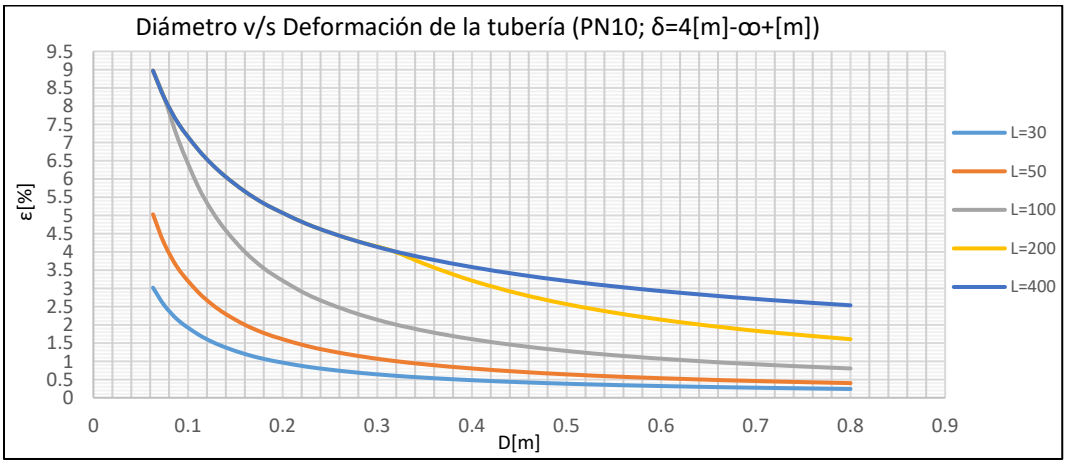


Gráfico 13-292: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena gruesa.

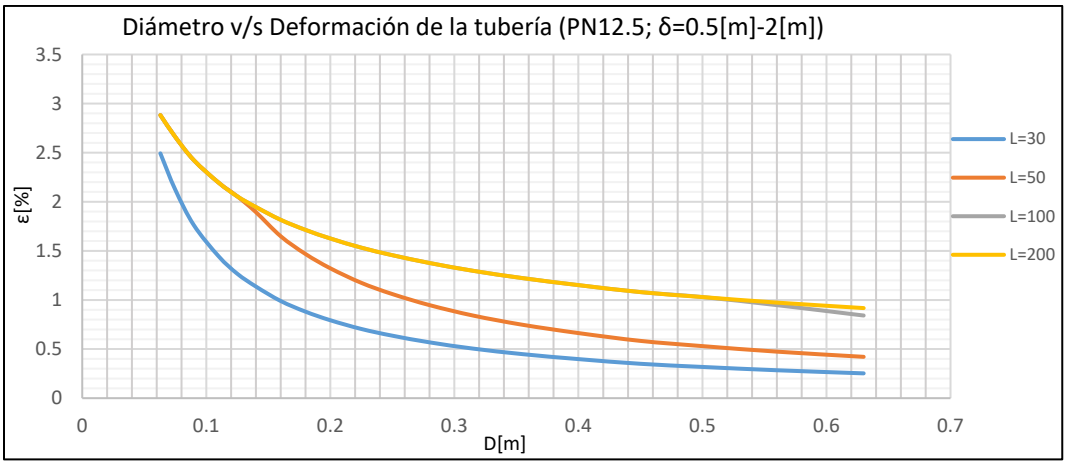


Gráfico 13-293: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

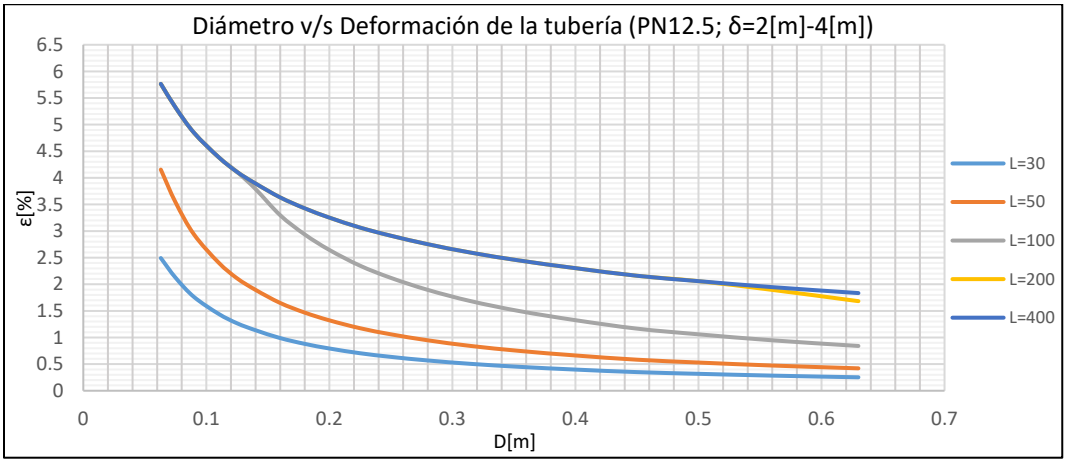


Gráfico 13-294: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo de Arena gruesa.

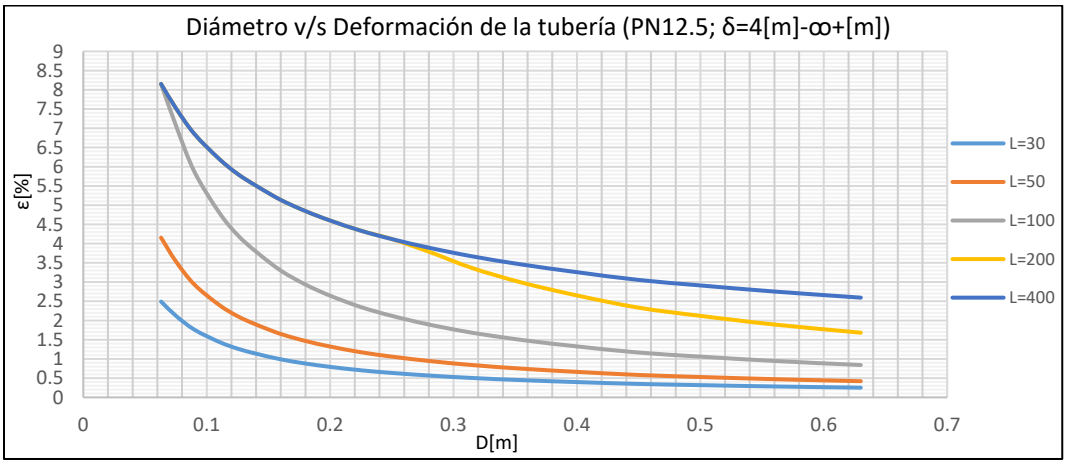


Gráfico 13-295: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena gruesa.

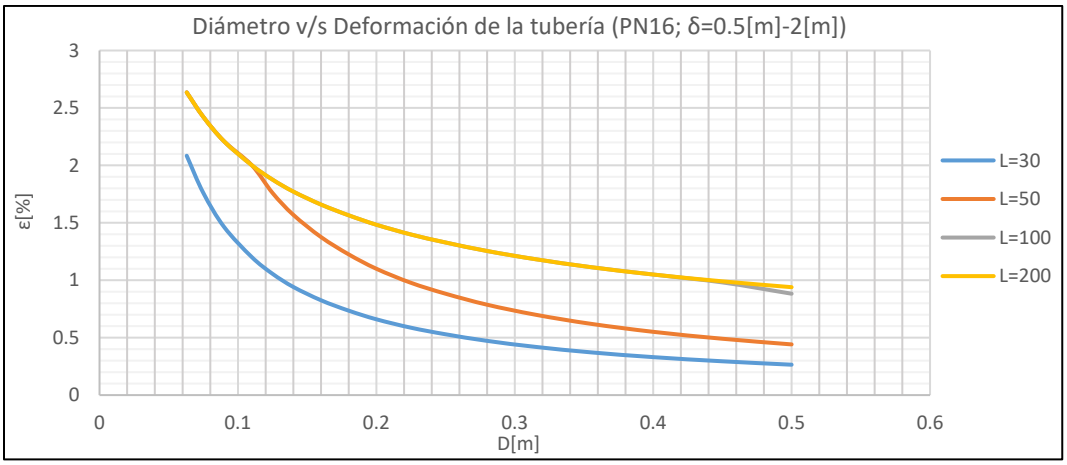


Gráfico 13-296: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

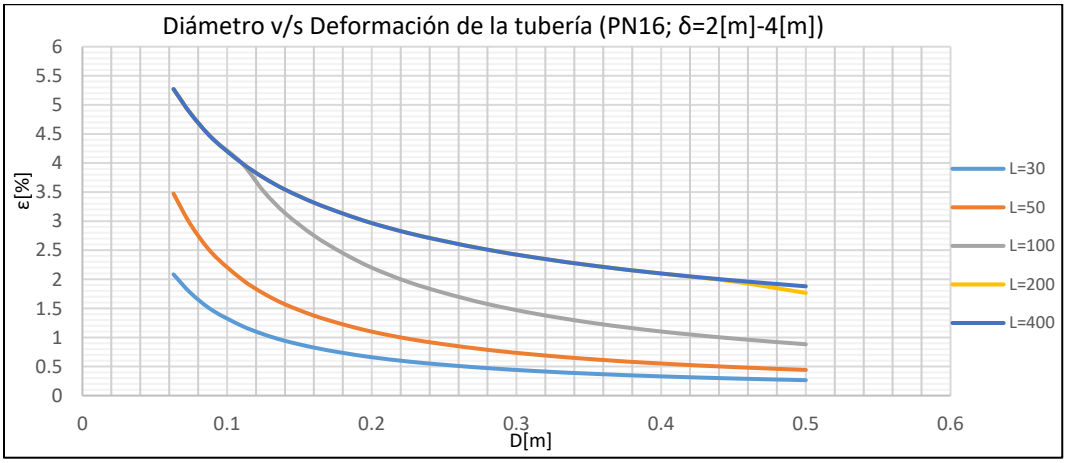


Gráfico 13-297: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo de Arena gruesa.

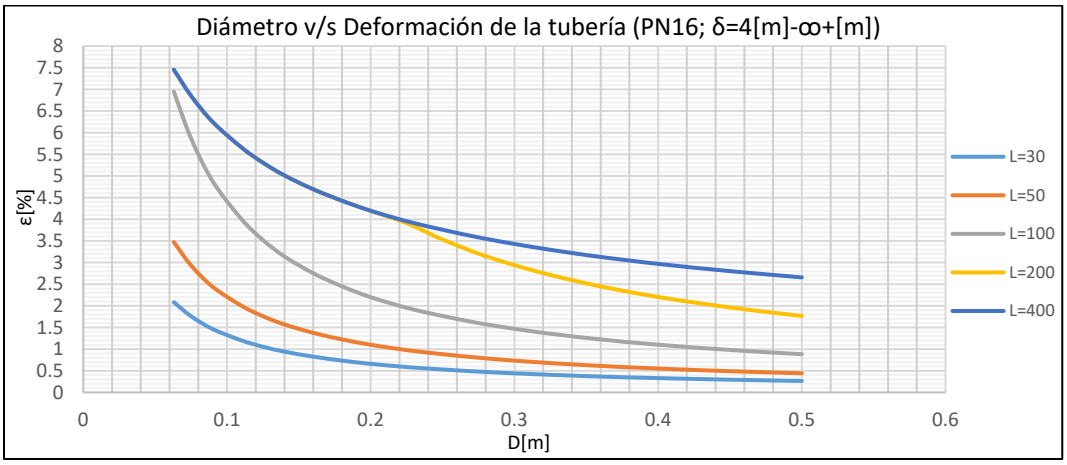


Gráfico 13-298: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 4[m], Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

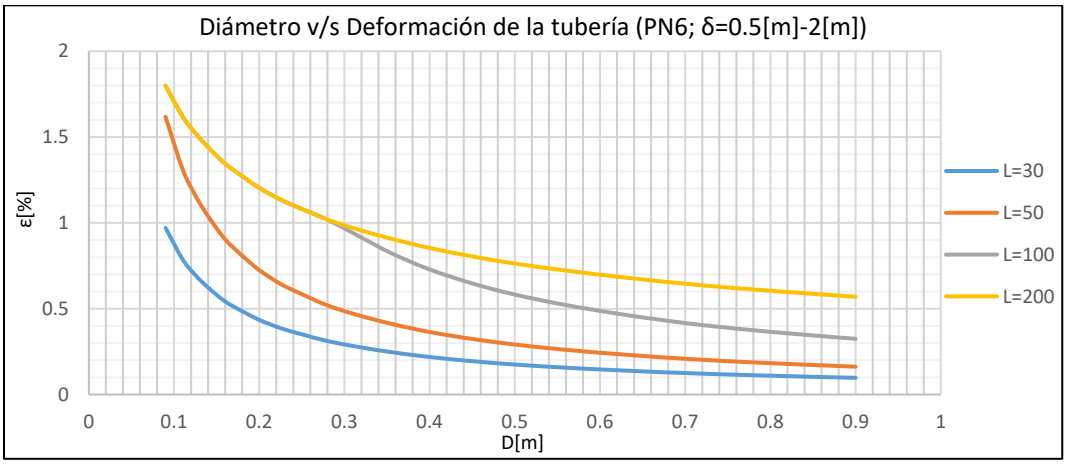


Gráfico 13-299: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

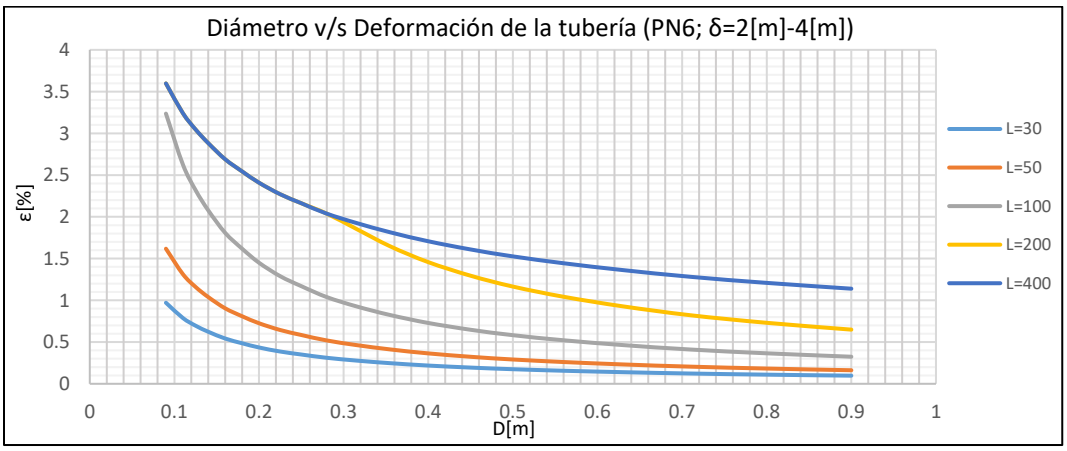


Gráfico 13-300: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

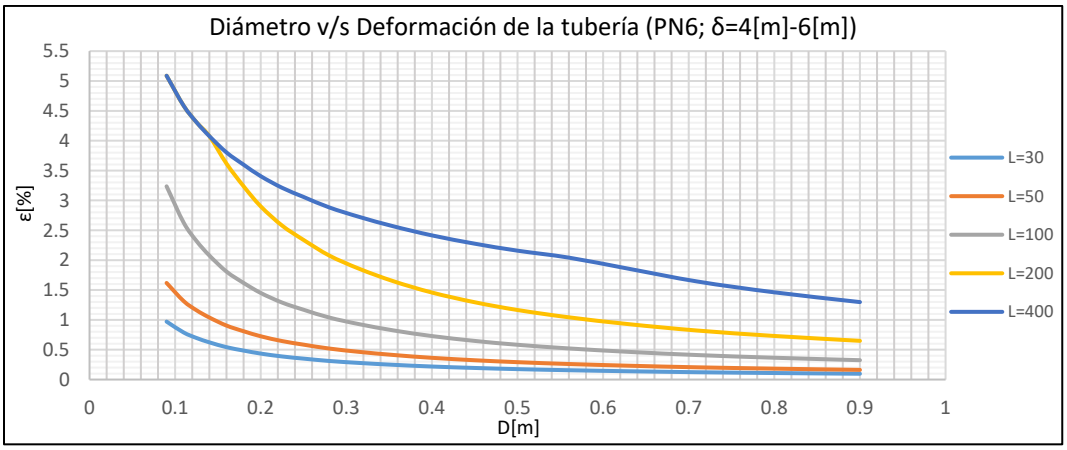


Gráfico 13-301: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 4 [m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

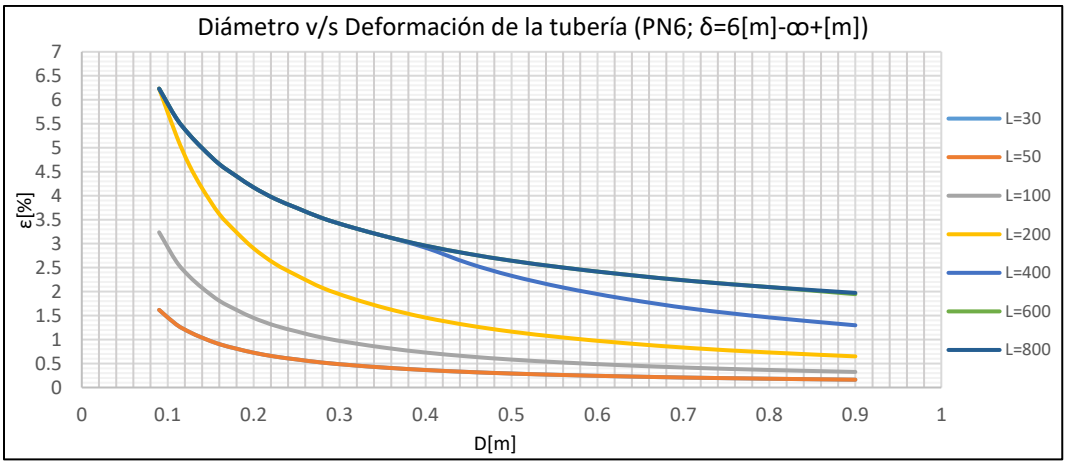


Gráfico 13-302: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

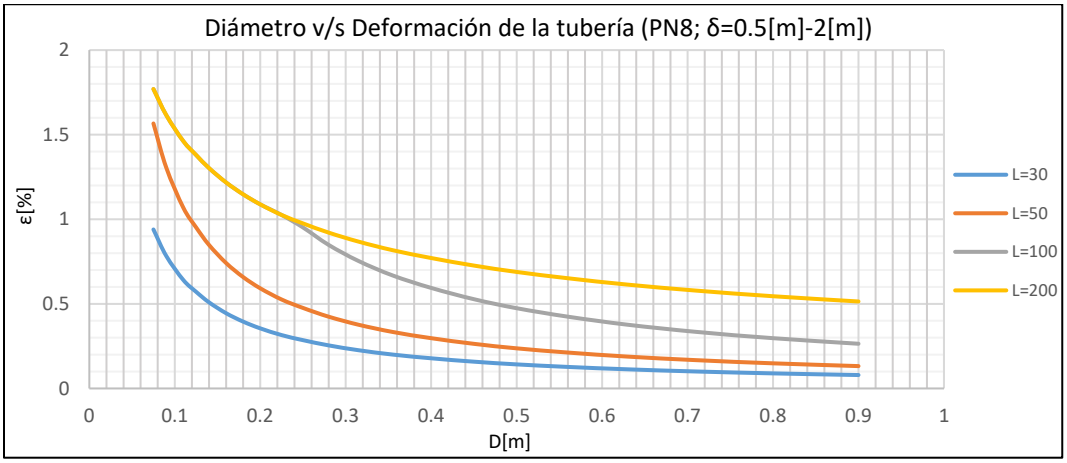


Gráfico 13-303: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

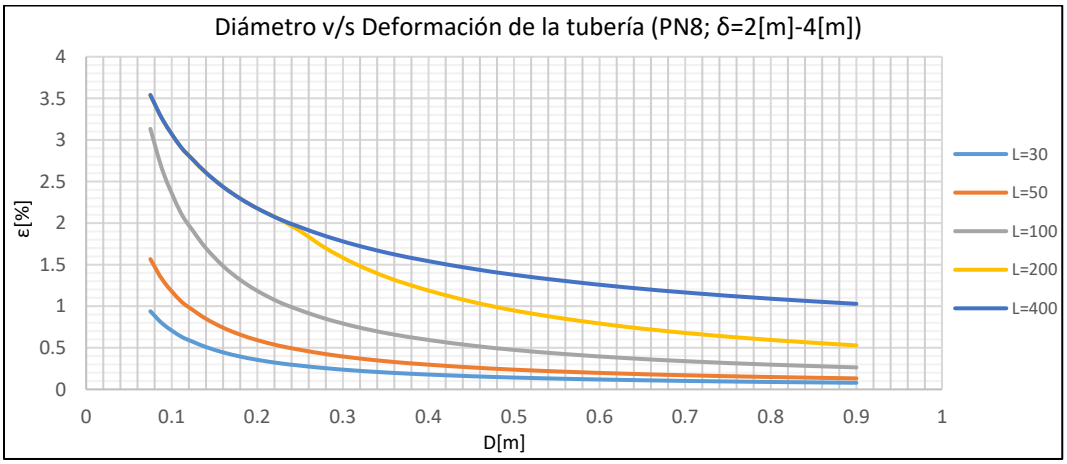


Gráfico 13-304: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

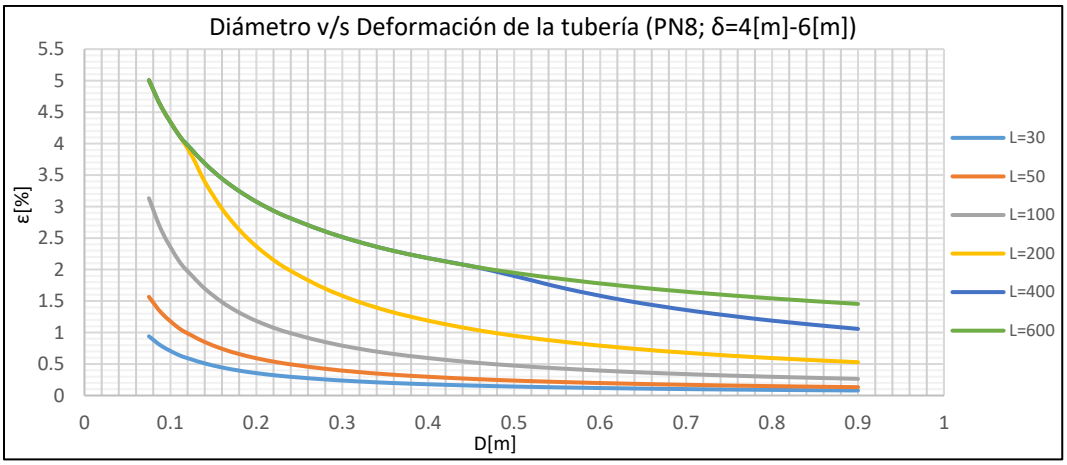


Gráfico 13-305: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 4 [m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

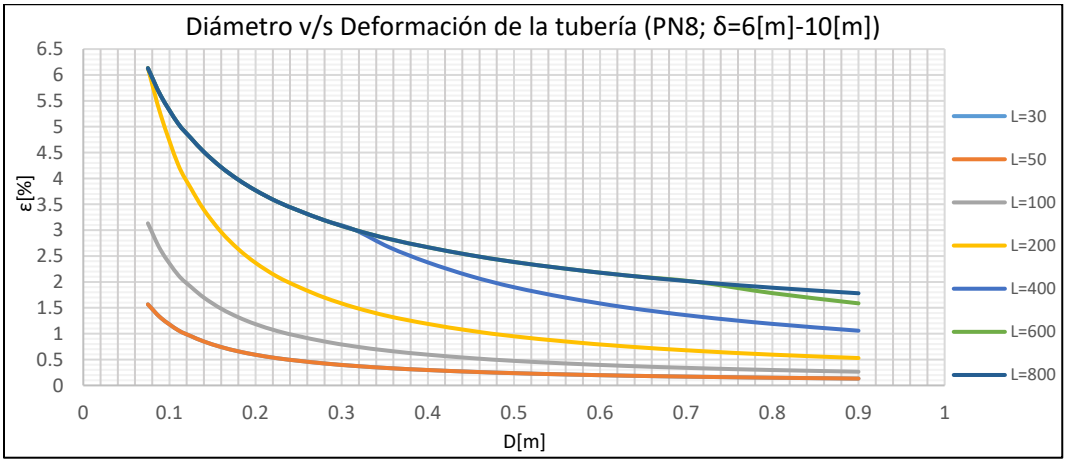


Gráfico 13-306: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

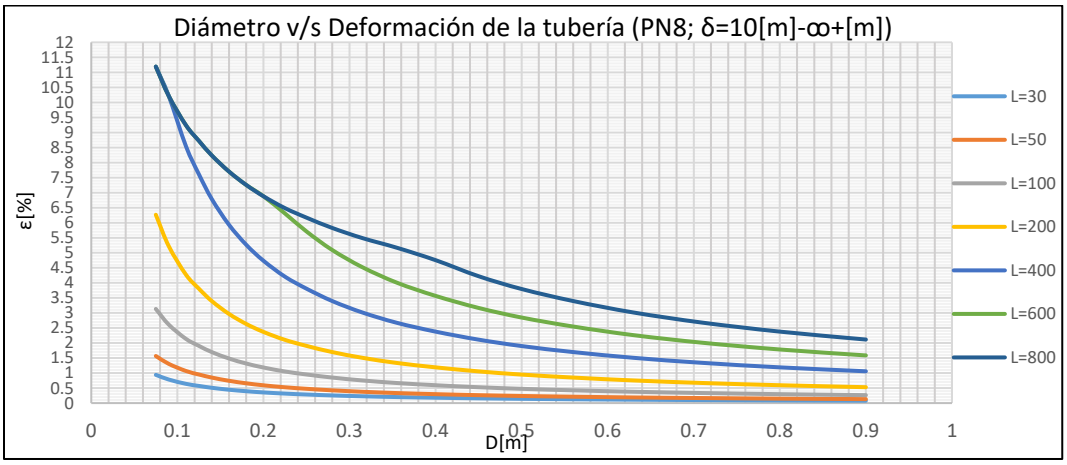


Gráfico 13-307: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

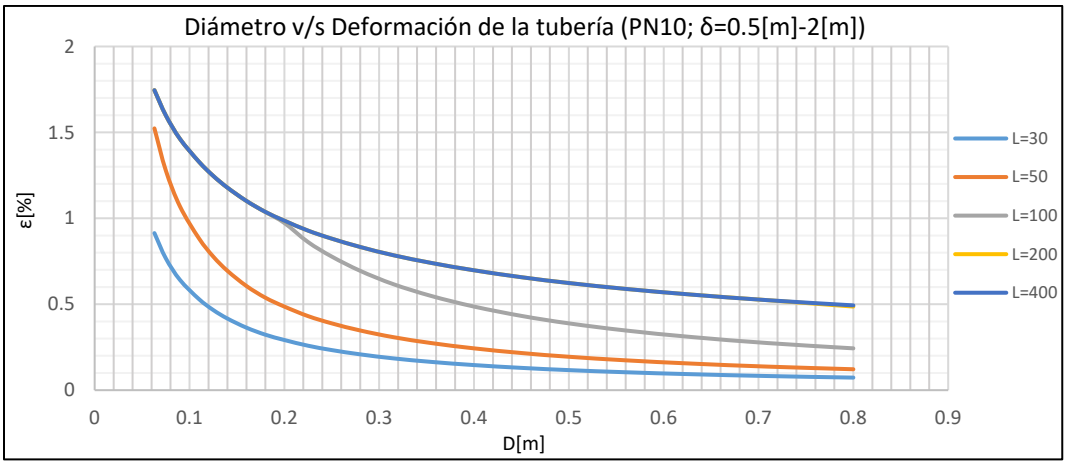


Gráfico 13-308: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5 [m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

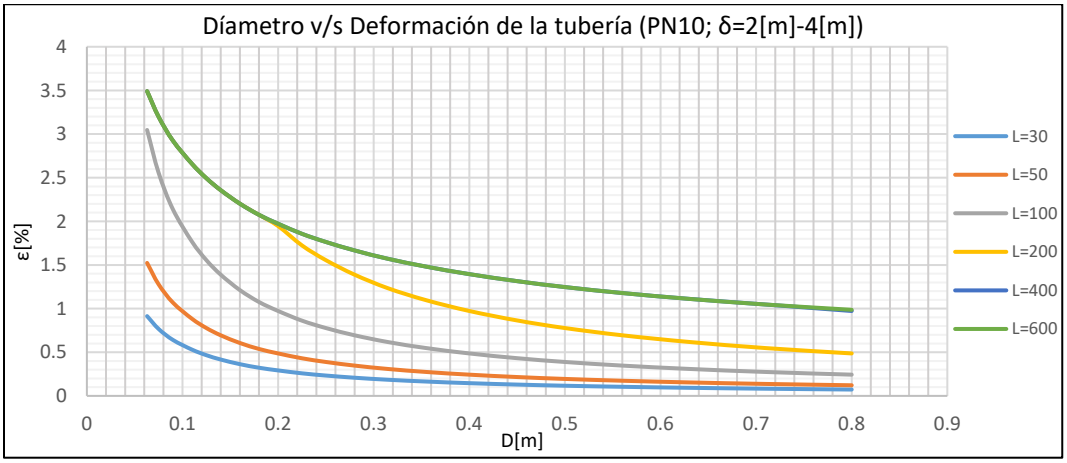


Gráfico 13-309: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2 [m] y 4[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

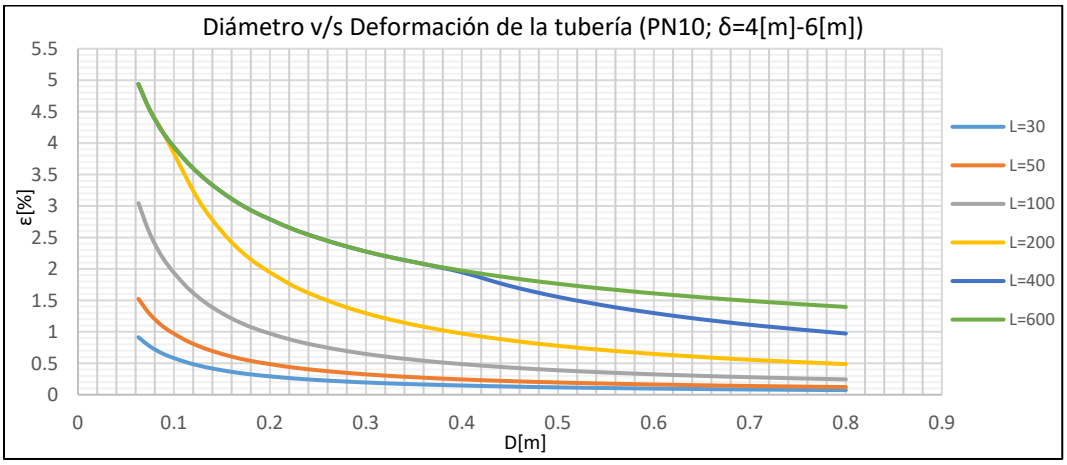


Gráfico 13-310: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 4[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

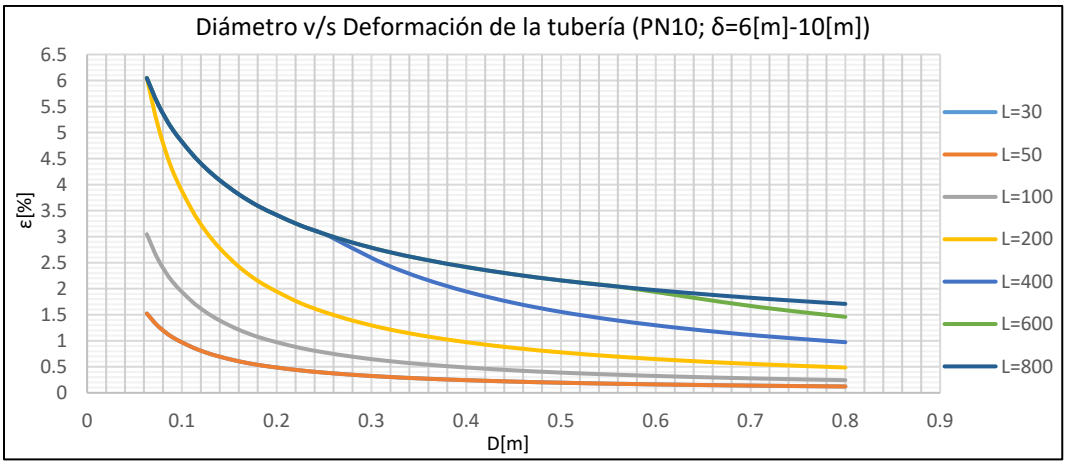


Gráfico 13-311: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

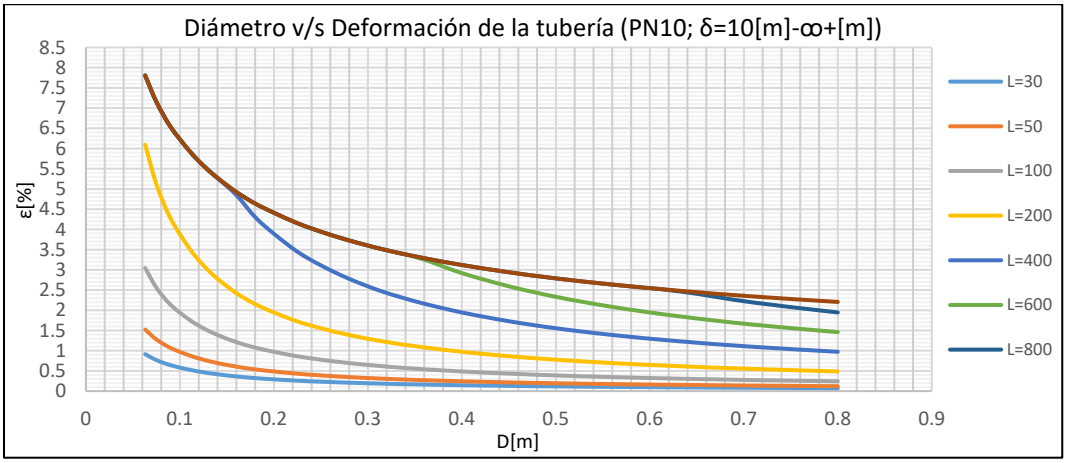


Gráfico 13-312: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

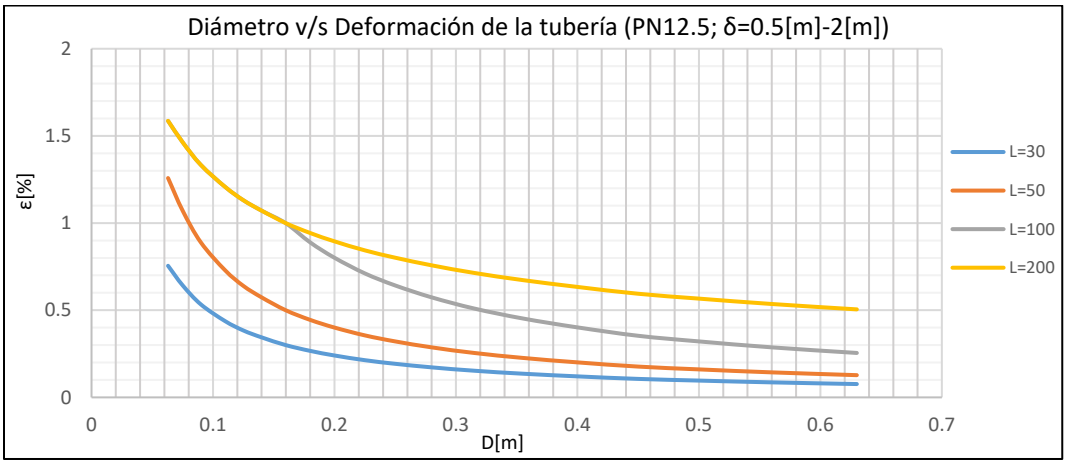


Gráfico 13-313: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

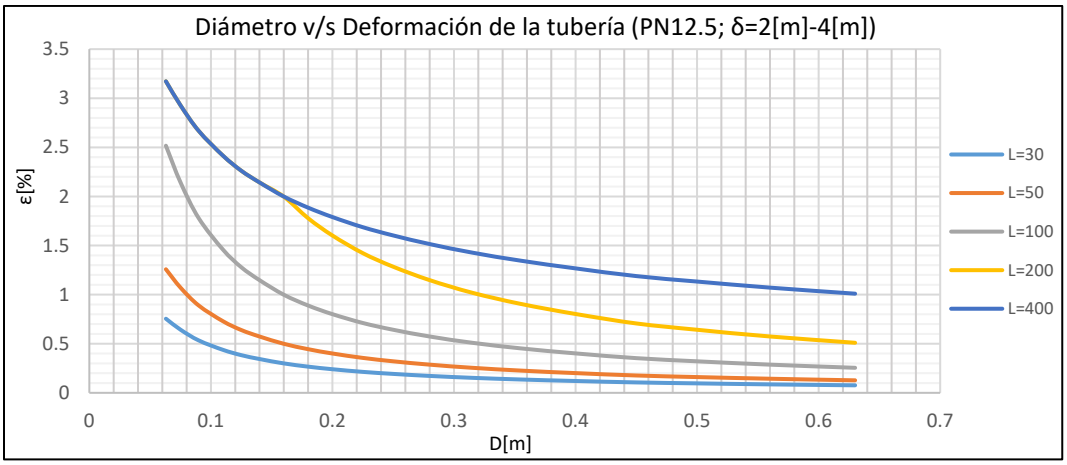


Gráfico 13-314: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

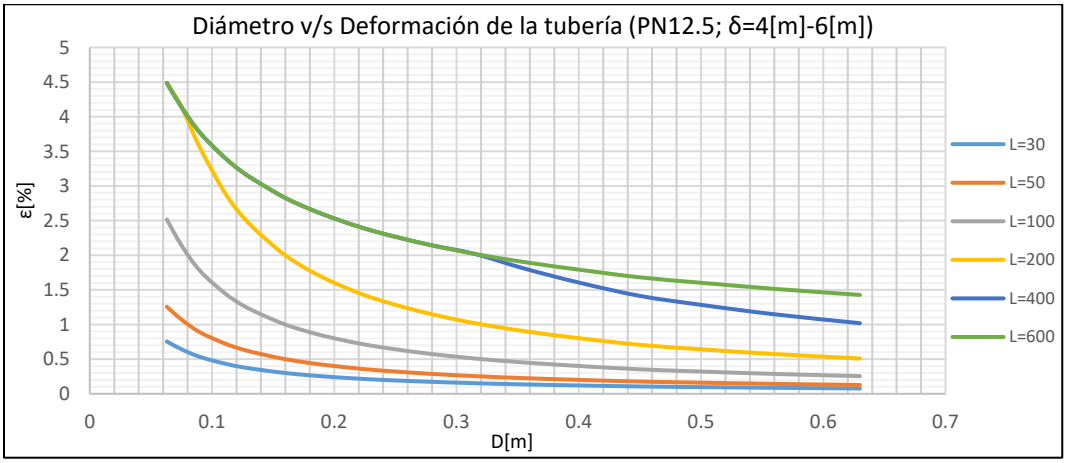


Gráfico 13-315: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 4[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

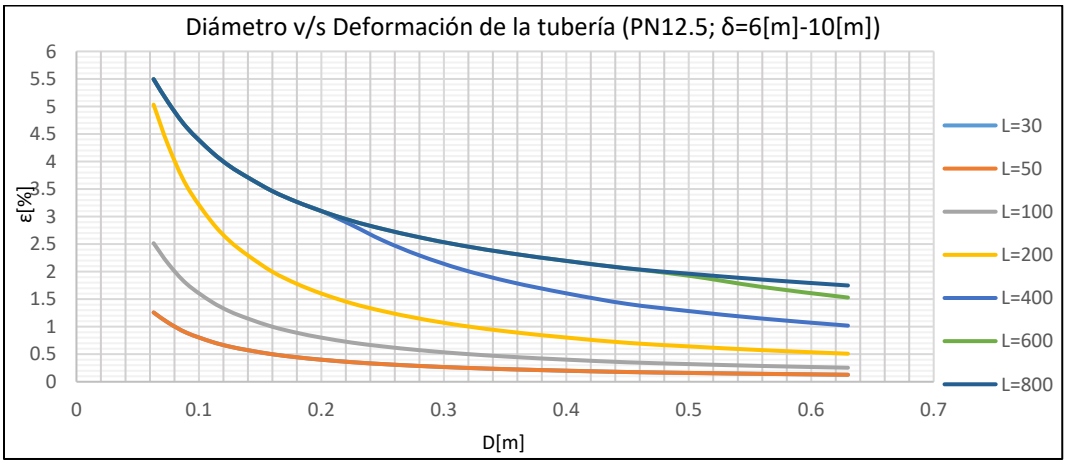


Gráfico 13-316: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

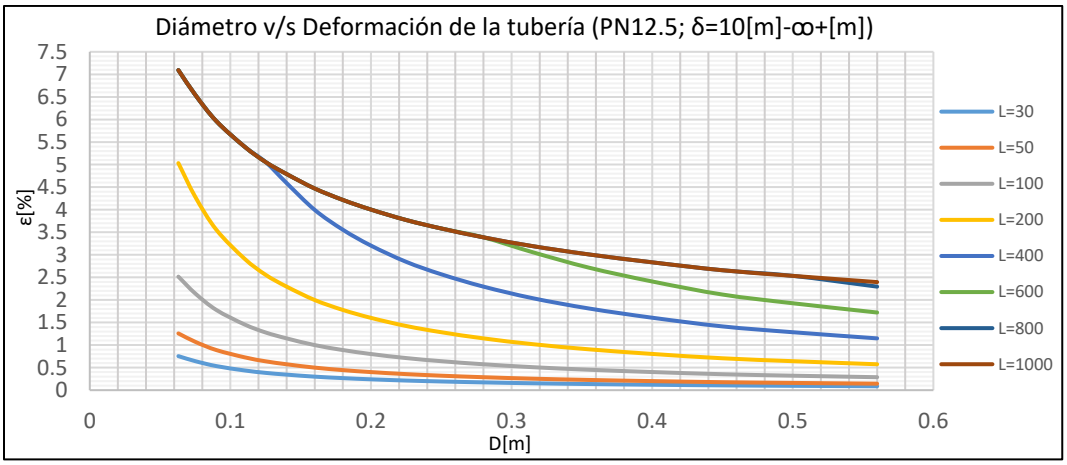


Gráfico 13-317: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

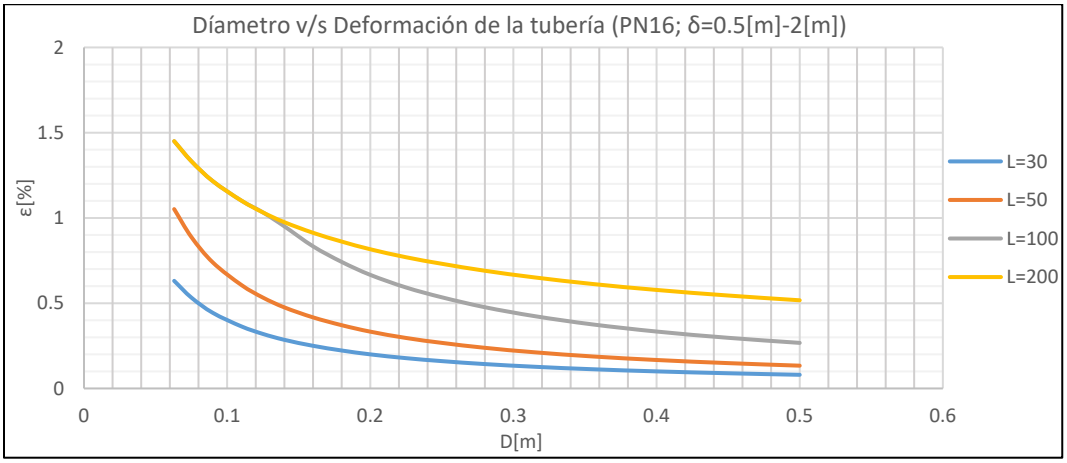


Gráfico 13-318: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

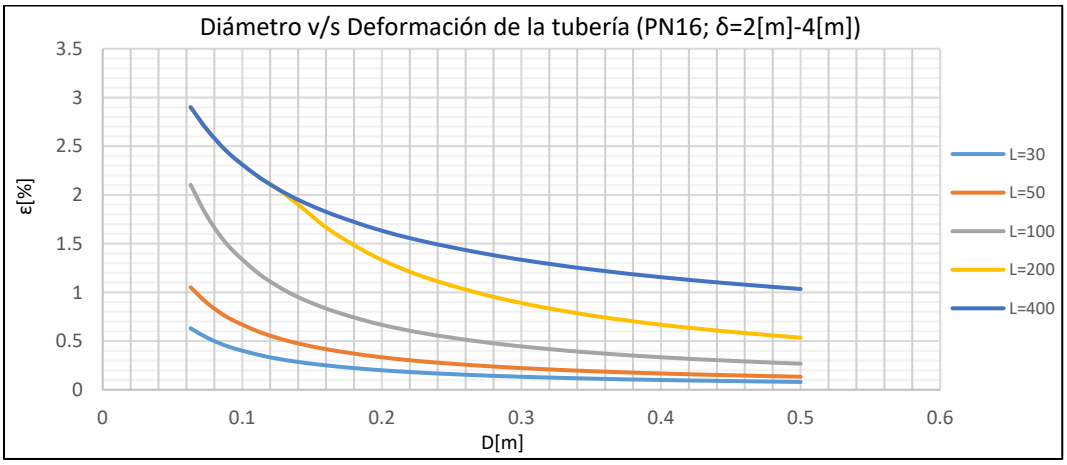


Gráfico 13-319: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 4[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

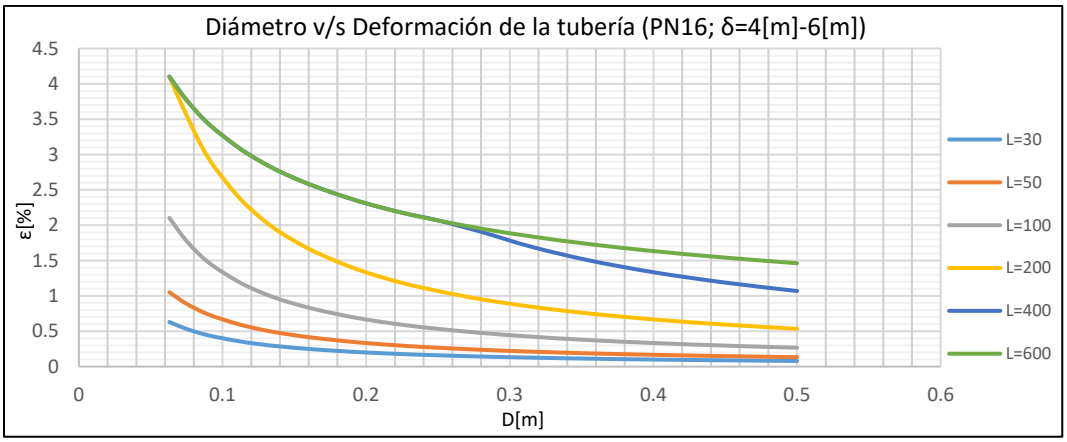


Gráfico 13-320: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 4[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

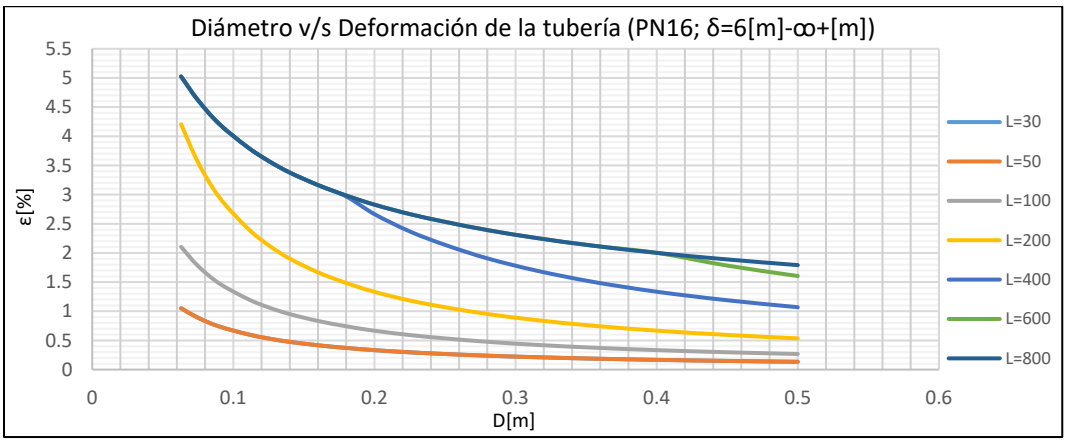


Gráfico 13-321: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE80 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

L.2.2. Tuberías de densidad PE100

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

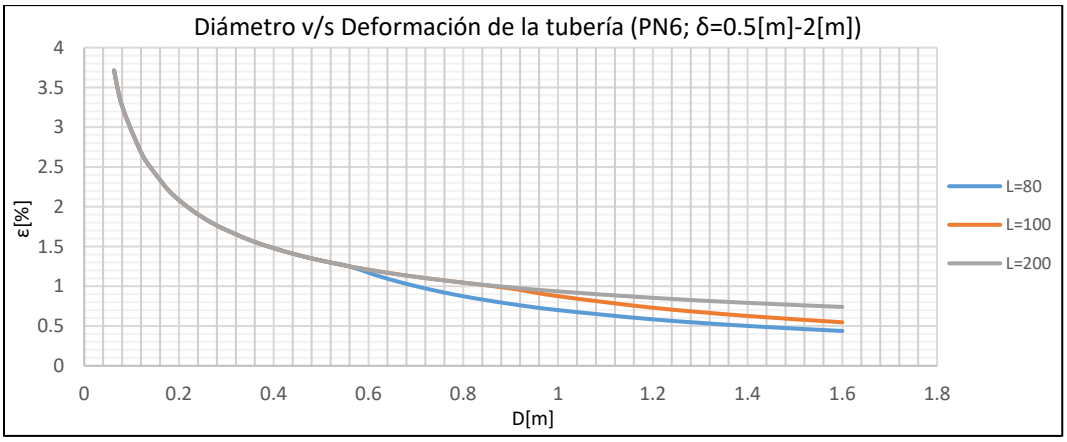


Gráfico 13-322: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

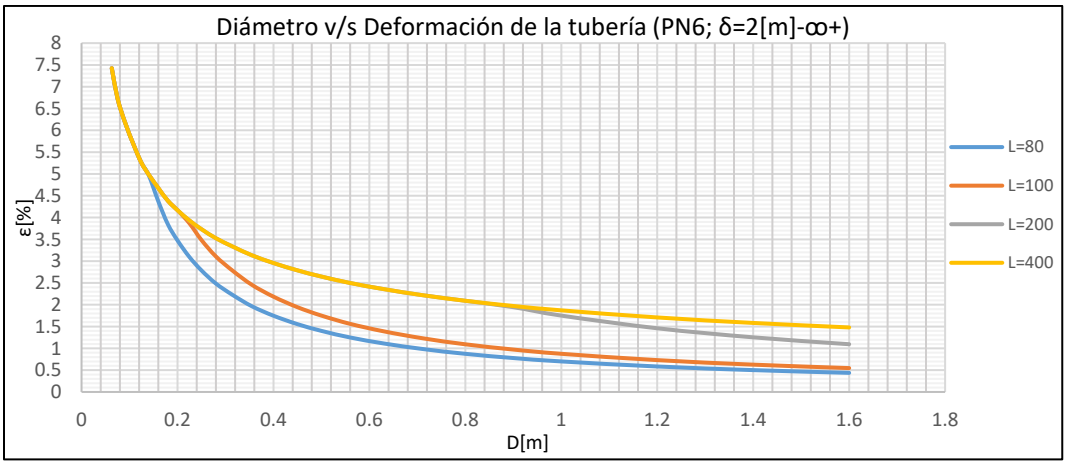


Gráfico 13-323: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

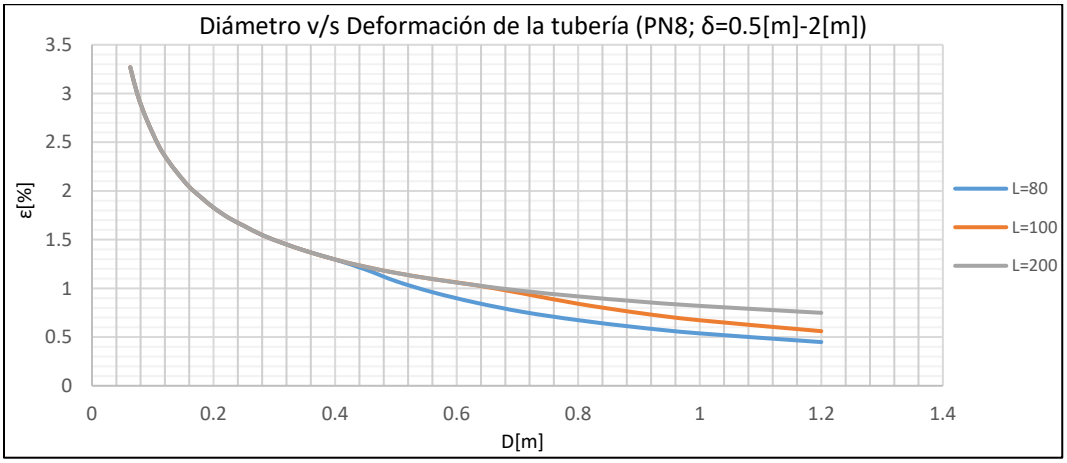


Gráfico 13-324: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

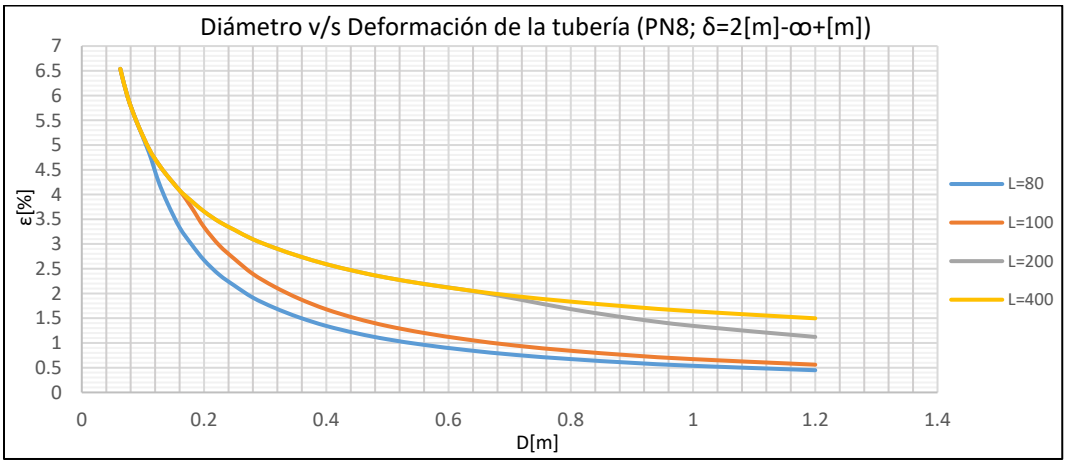


Gráfico 13-325: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

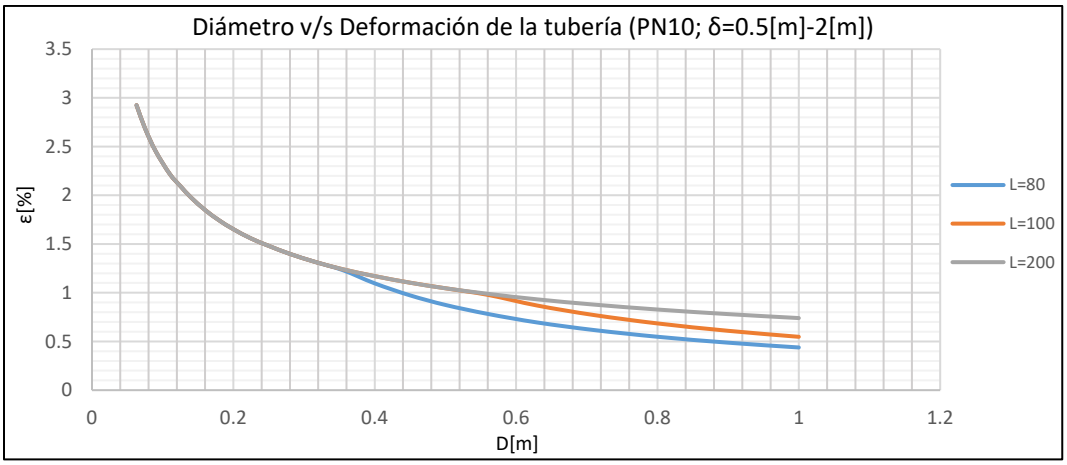


Gráfico 13-326: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

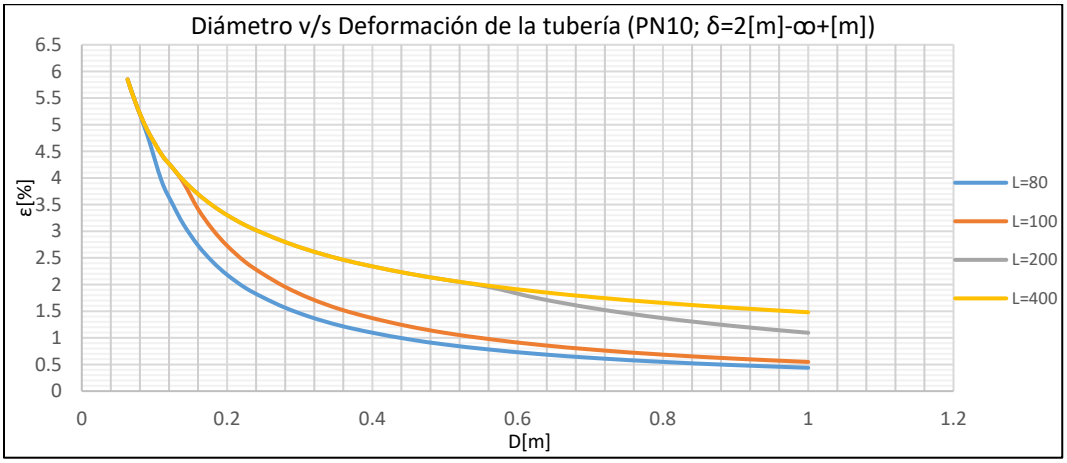


Gráfico 13-327: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

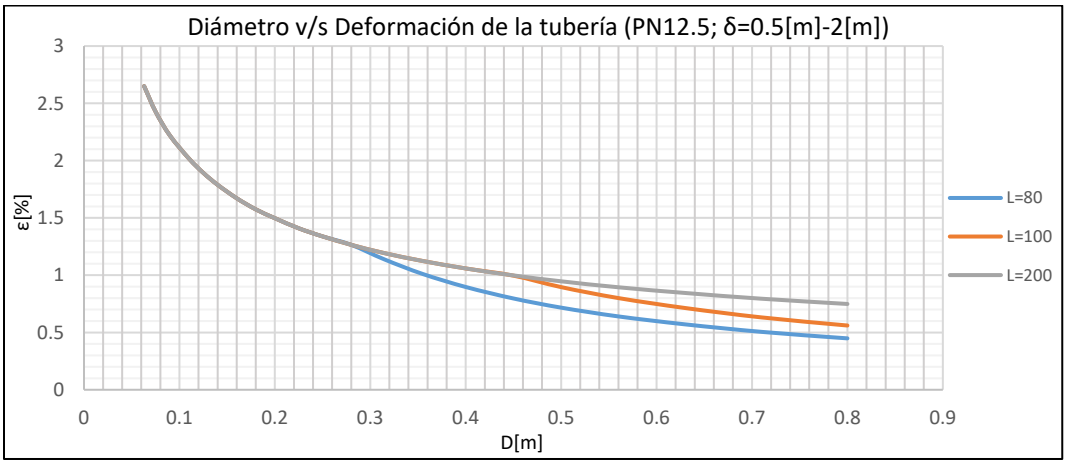


Gráfico 13-328: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

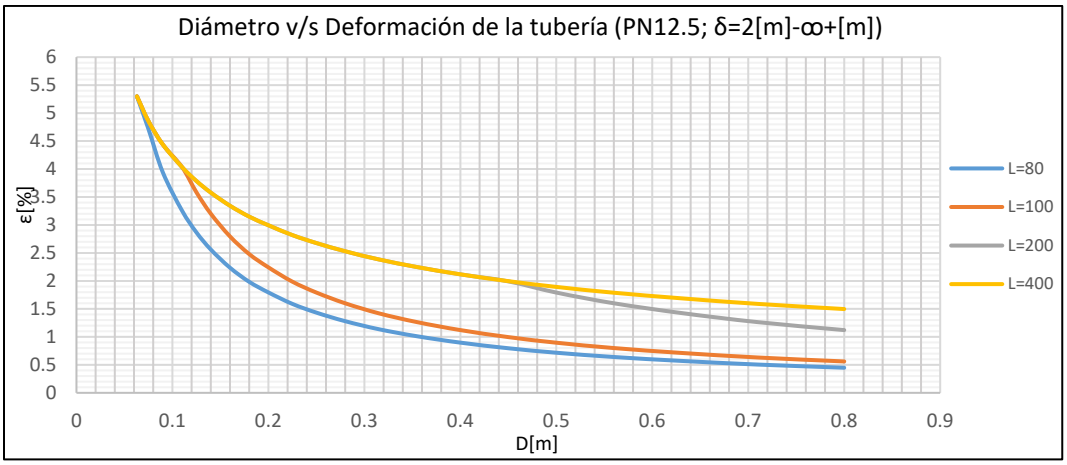


Gráfico 13-329: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

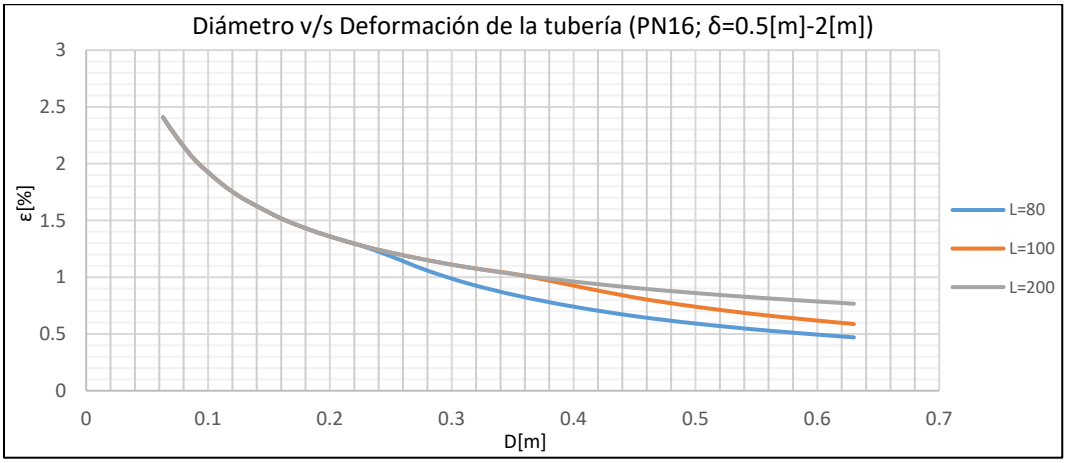


Gráfico 13-330: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

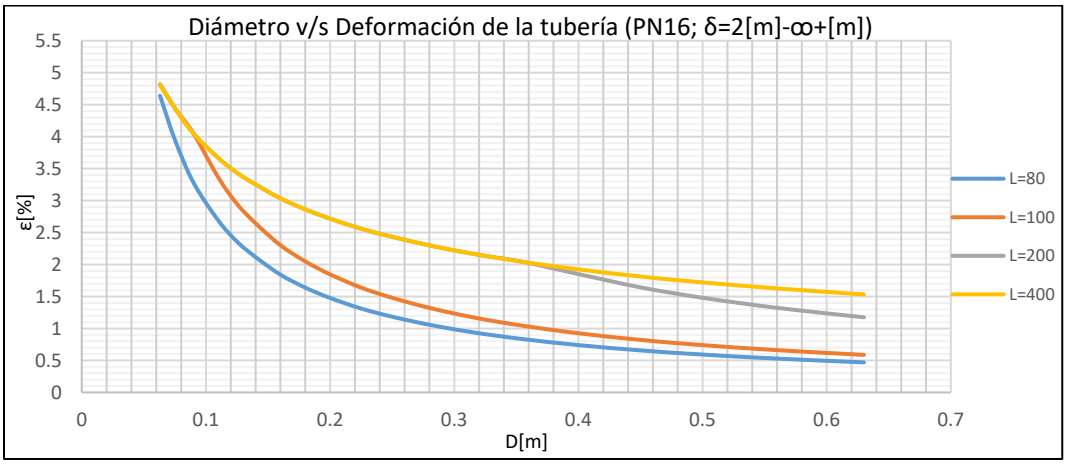


Gráfico 13-331: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

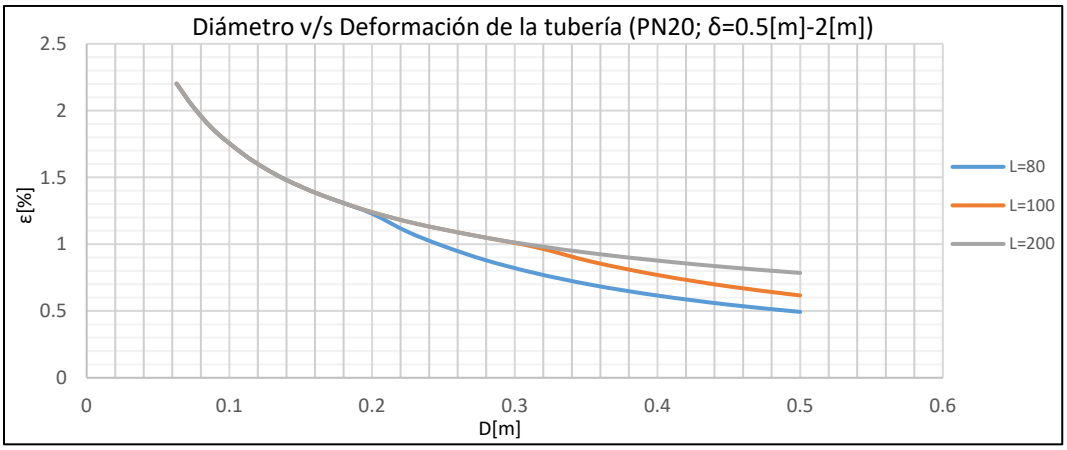


Gráfico 13-332: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Fina.

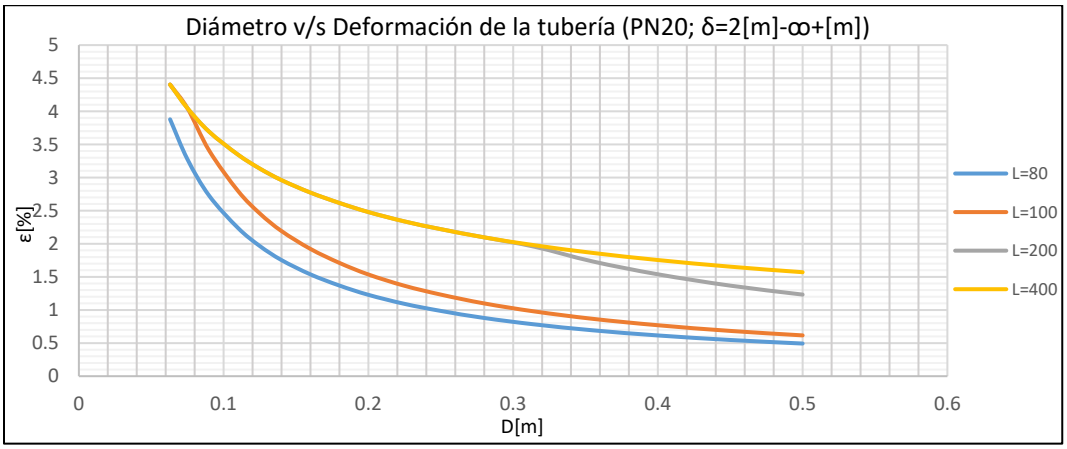


Gráfico 13-333: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

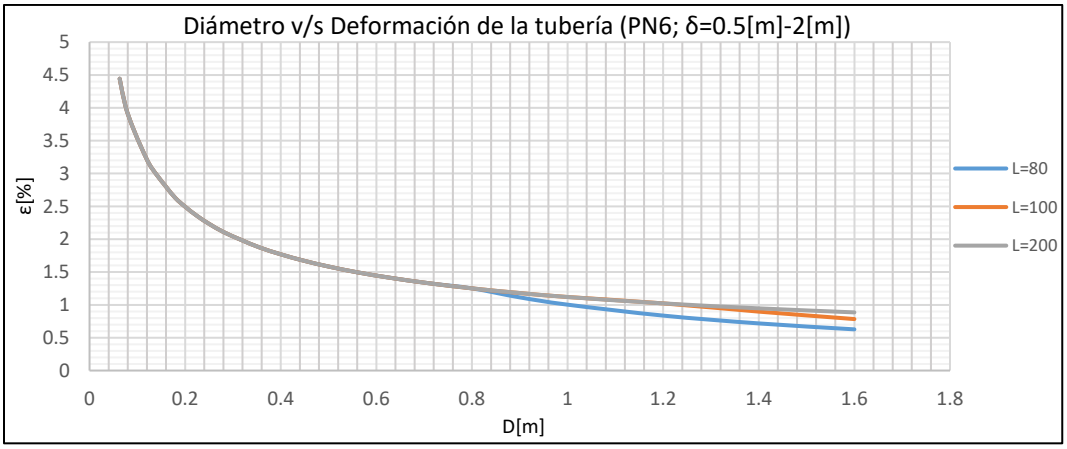


Gráfico 13-334: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Gruesa.

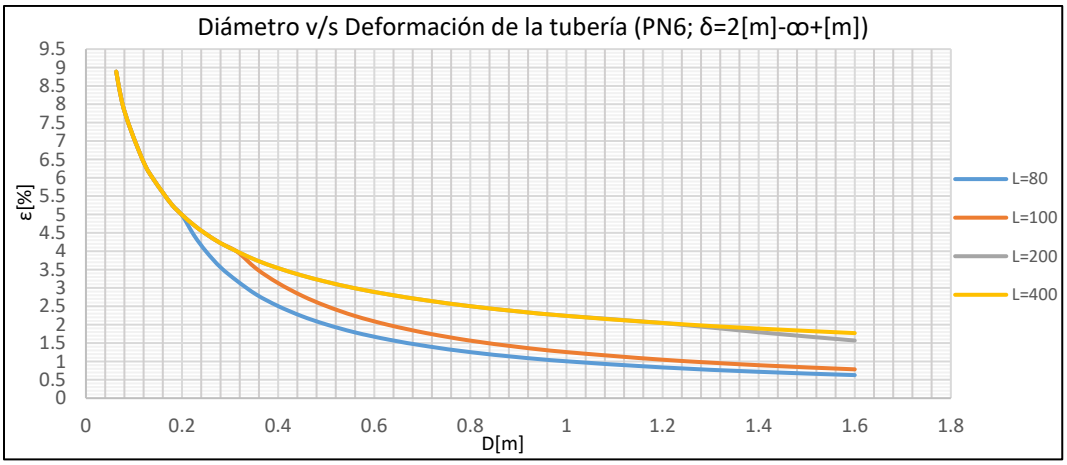


Gráfico 13-335: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Gruesa.

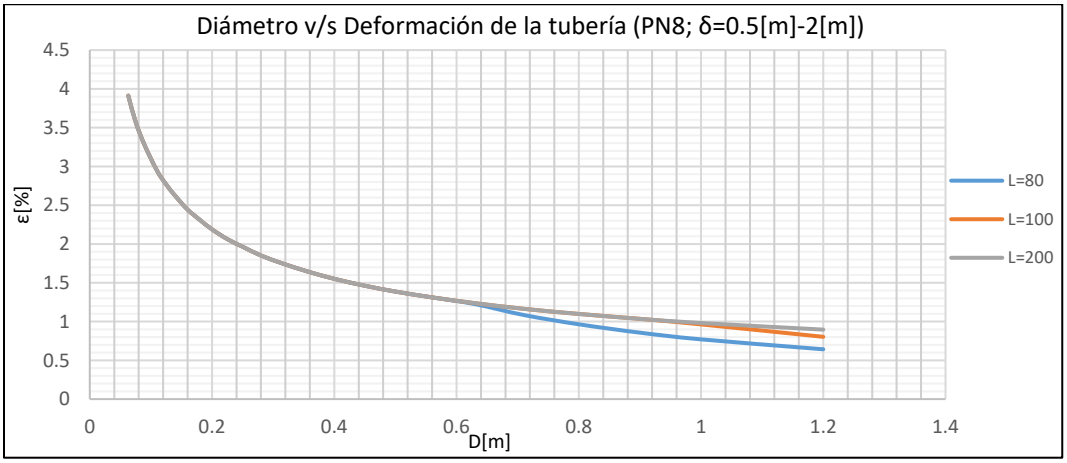


Gráfico 13-336: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Gruesa.

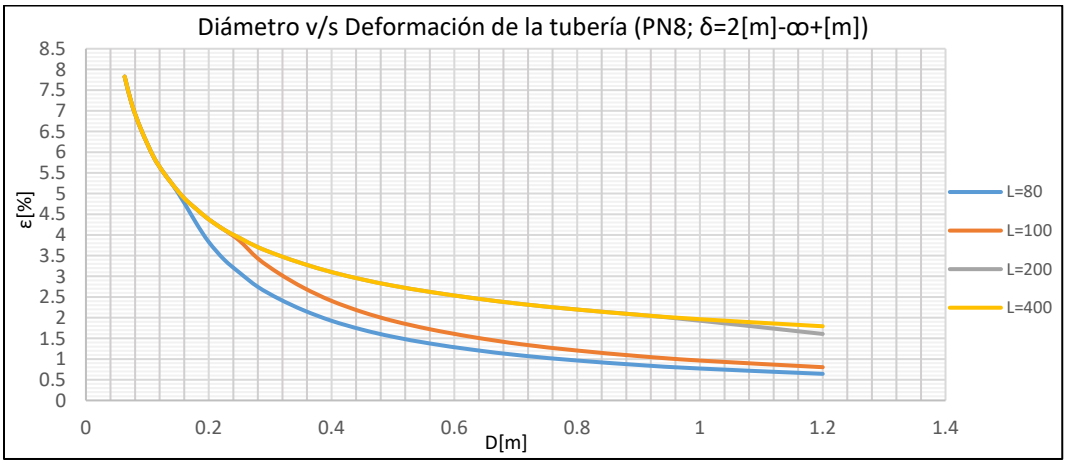


Gráfico 13-337: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Gruesa.

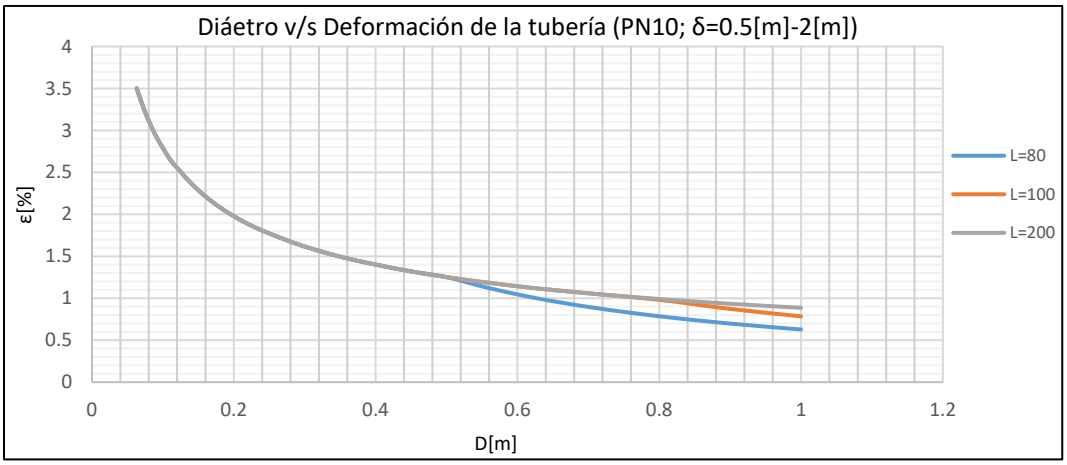


Gráfico 13-338: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Compacidad Gruesa.

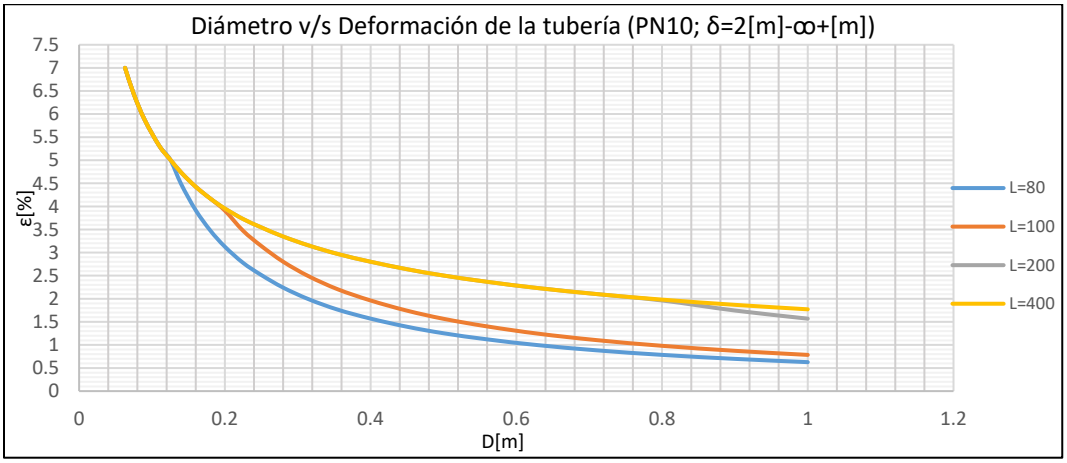


Gráfico 13-339: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Gruesa.

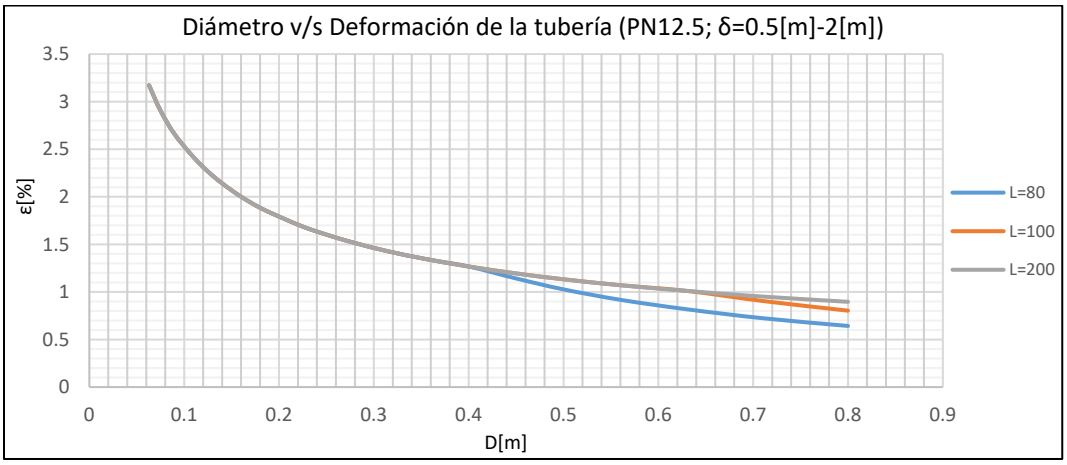


Gráfico 13-340: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Gruesa.

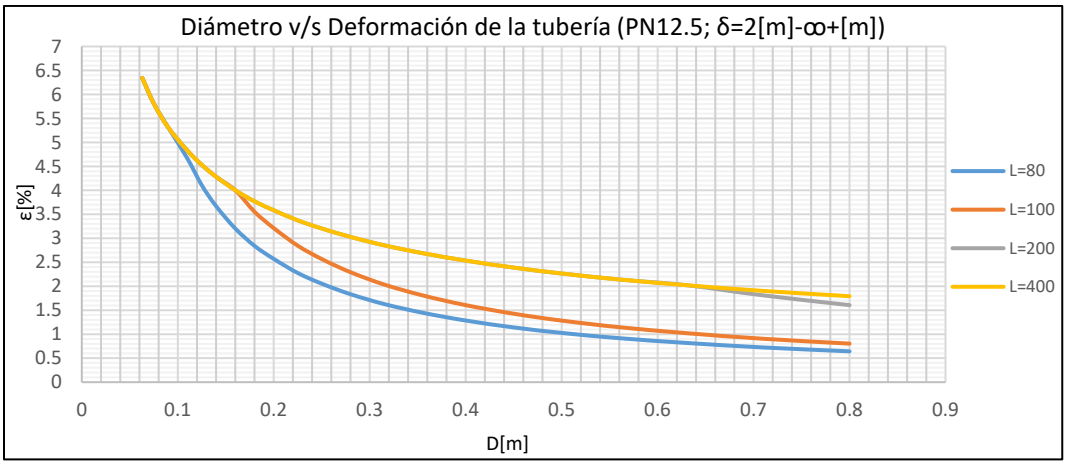


Gráfico 13-341: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Gruesa.

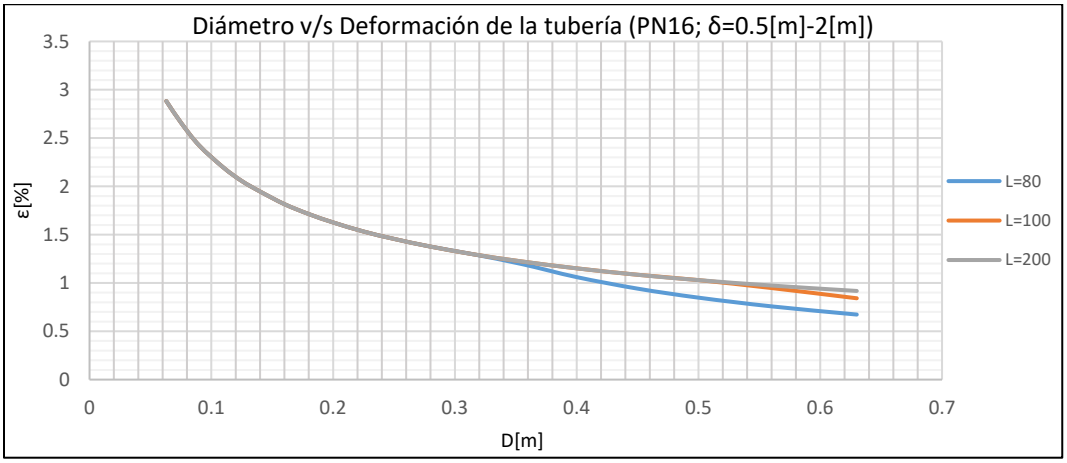


Gráfico 13-342: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Gruesa.

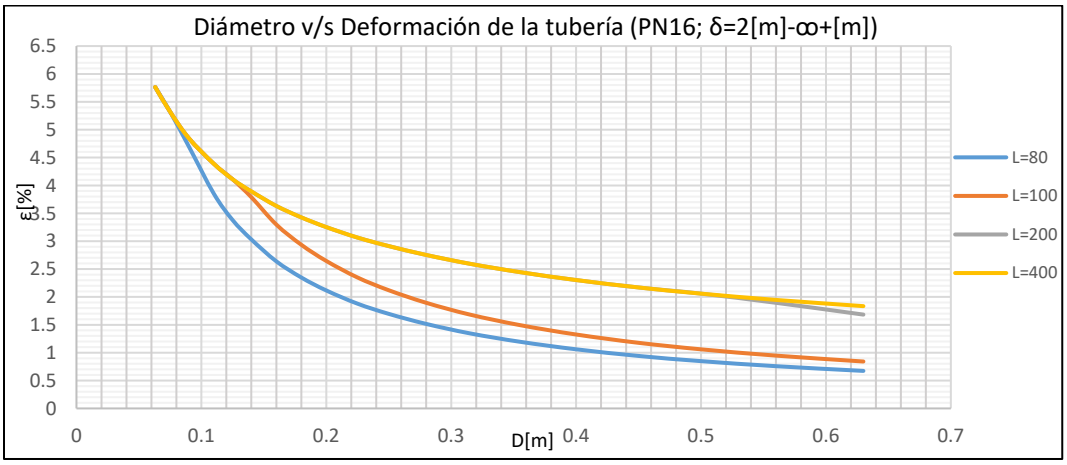


Gráfico 13-343: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Gruesa.

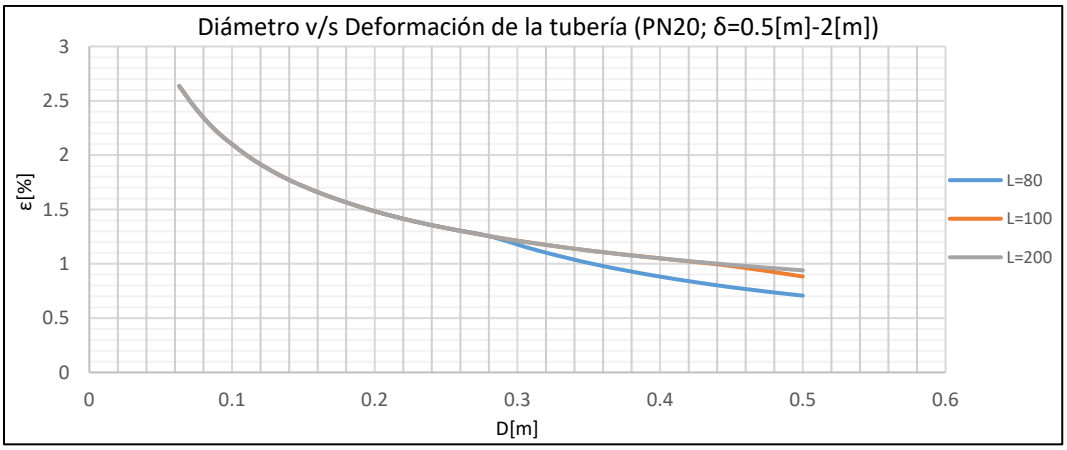


Gráfico 13-344:Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Arena Gruesa.

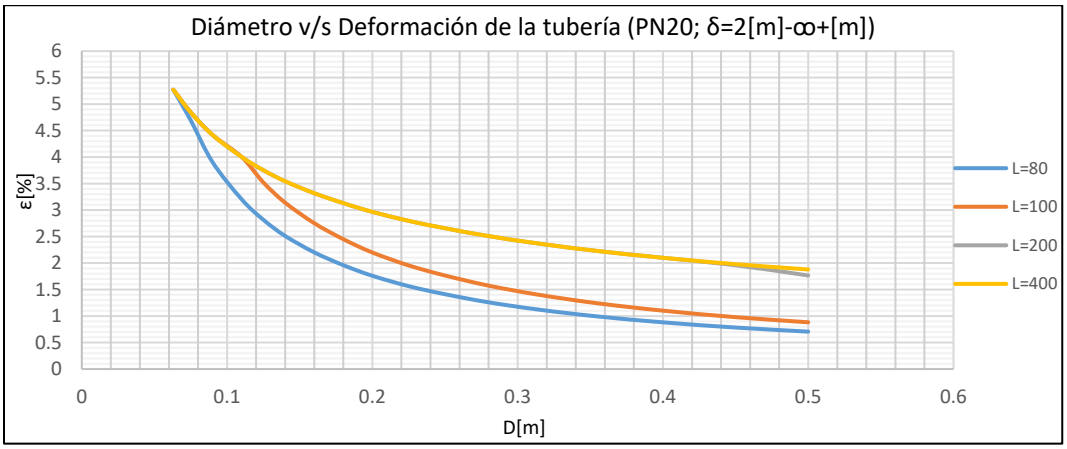


Gráfico 13-345: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal mayor que 2[m], Suelo Arena Gruesa.

- **Tipo de Suelo 3: Limo de Baja Plasticidad**

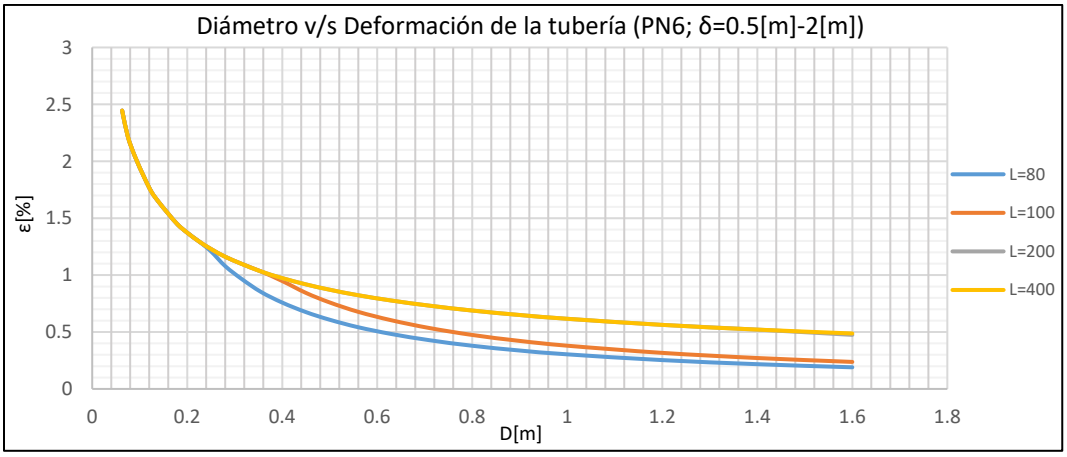


Gráfico 13-346: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

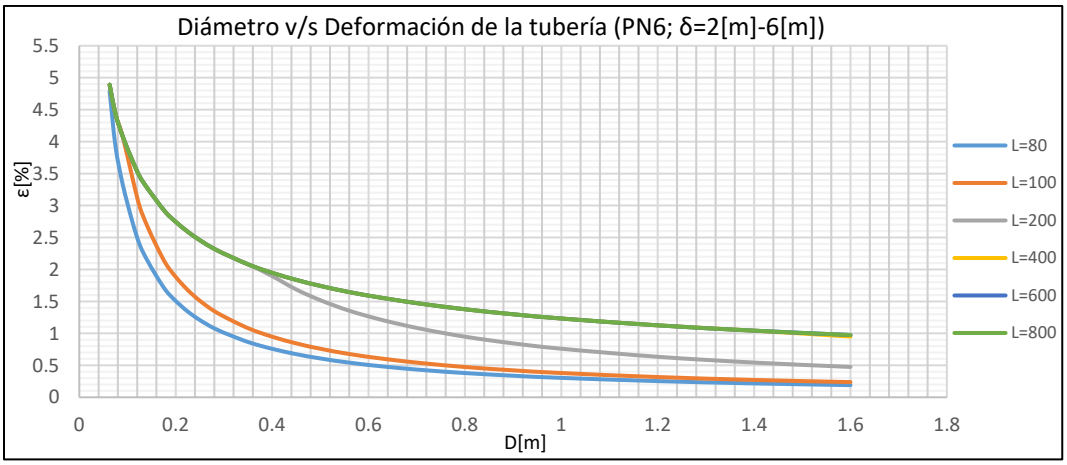


Gráfico 13-347: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

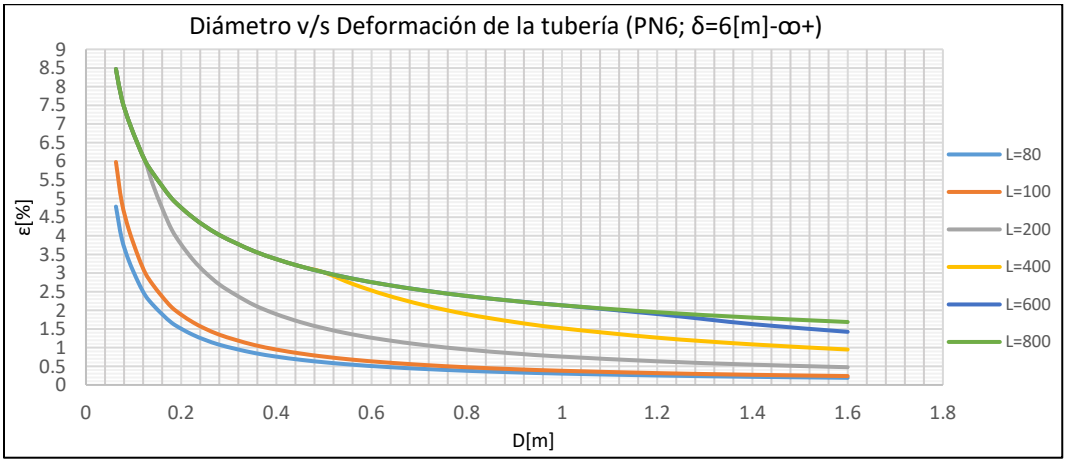


Gráfico 13-348: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

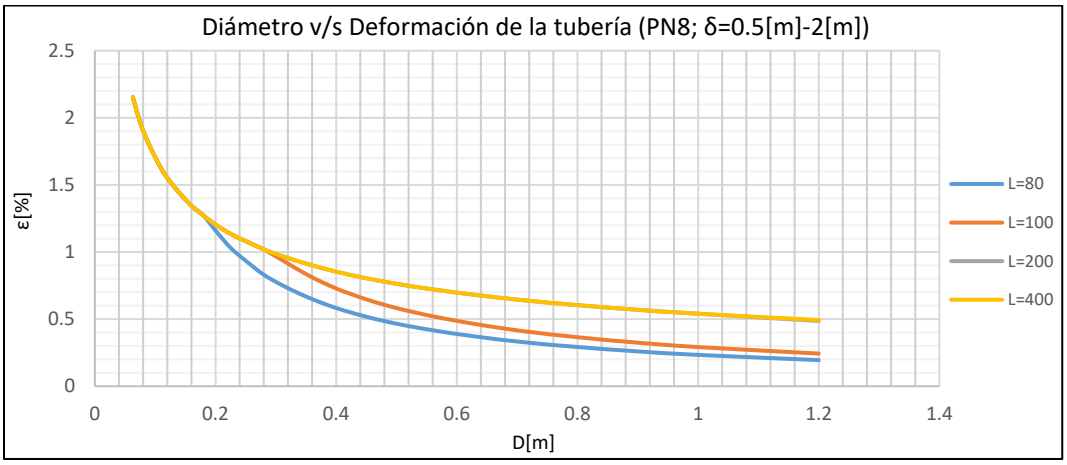


Gráfico 13-349: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

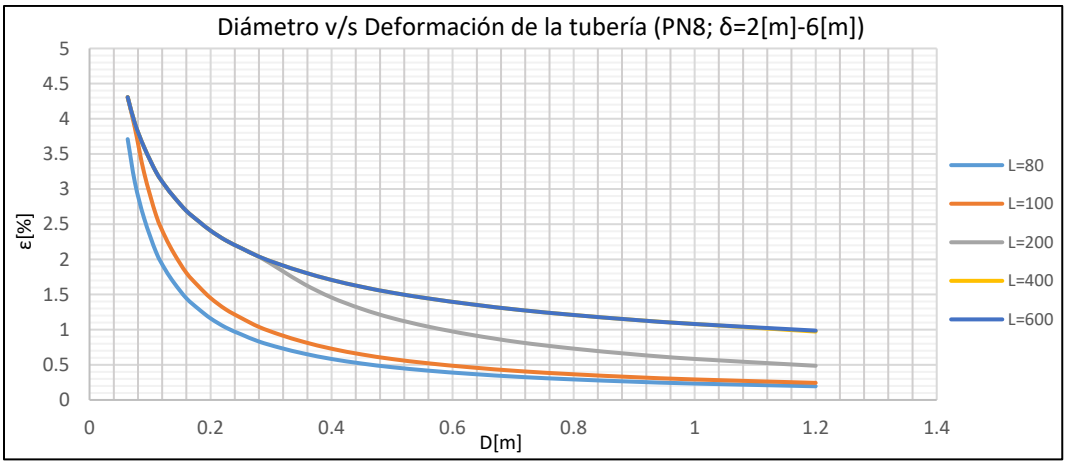


Gráfico 13-350: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

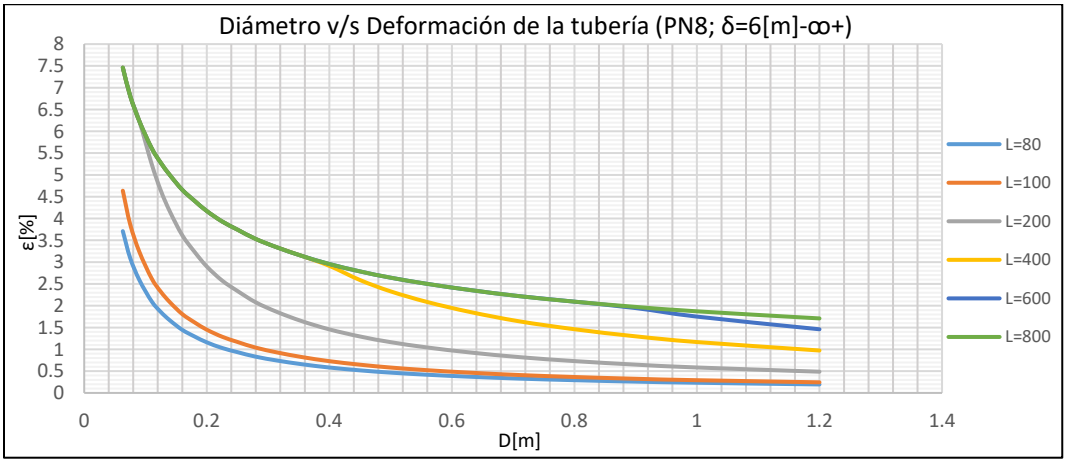


Gráfico 13-351: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN8, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

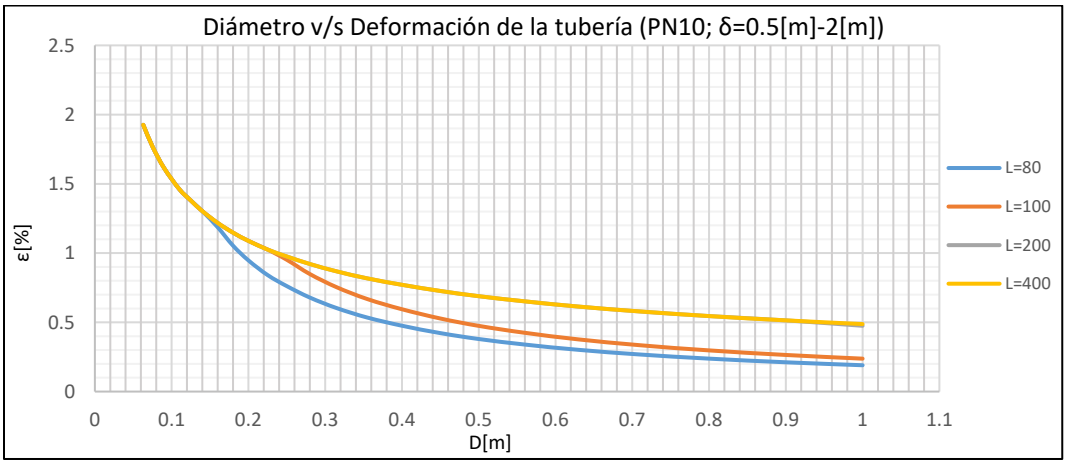


Gráfico 13-352: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

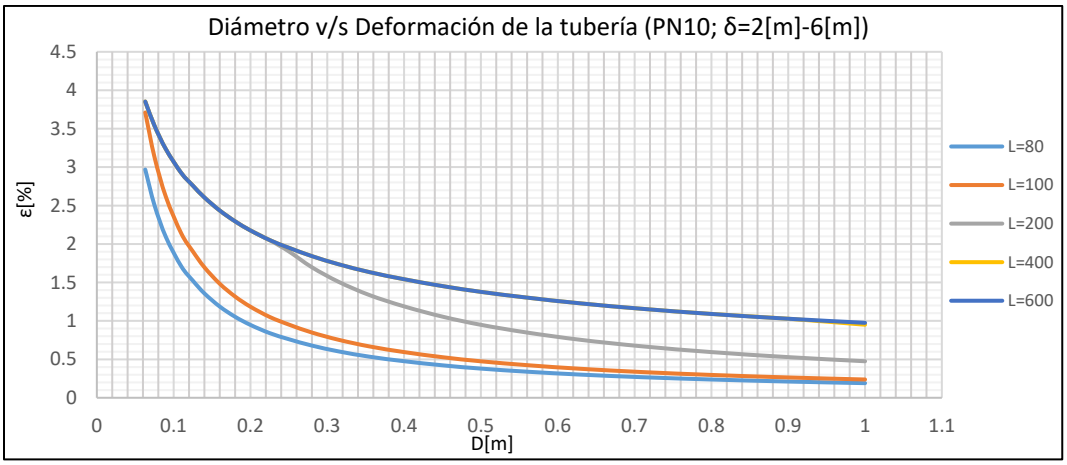


Gráfico 13-353: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

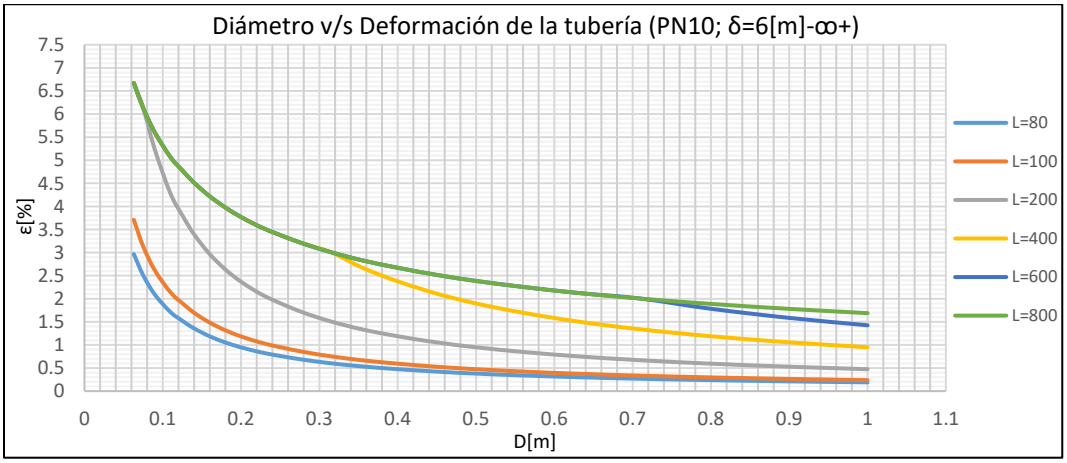


Gráfico 13-354: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

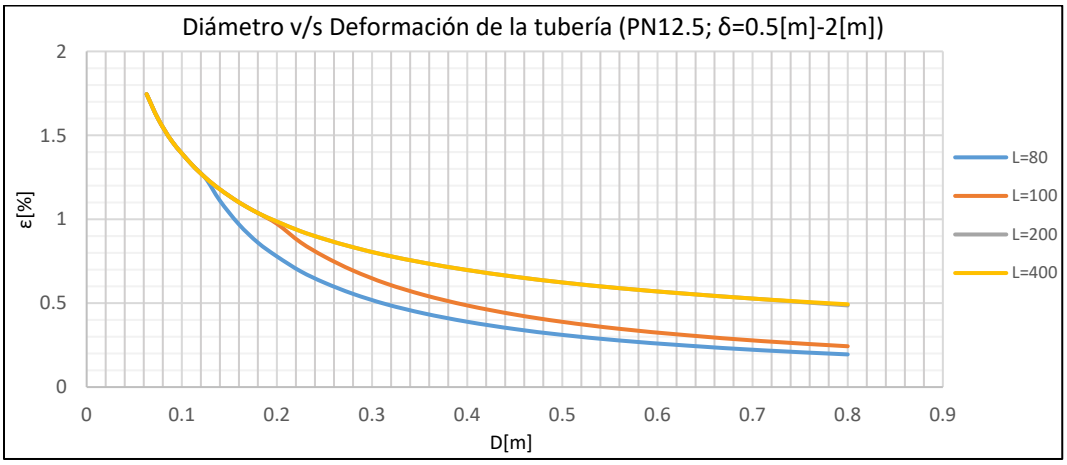


Gráfico 13-355: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5 desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

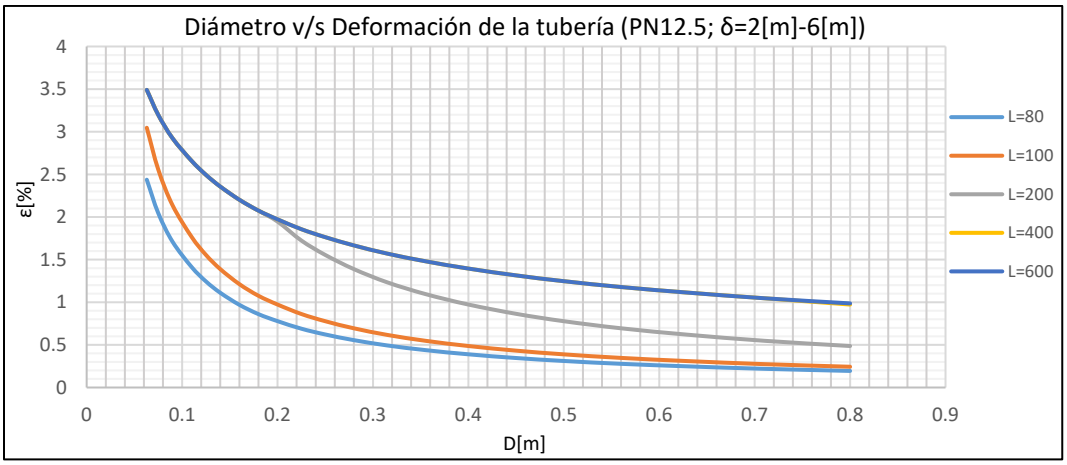


Gráfico 13-356: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

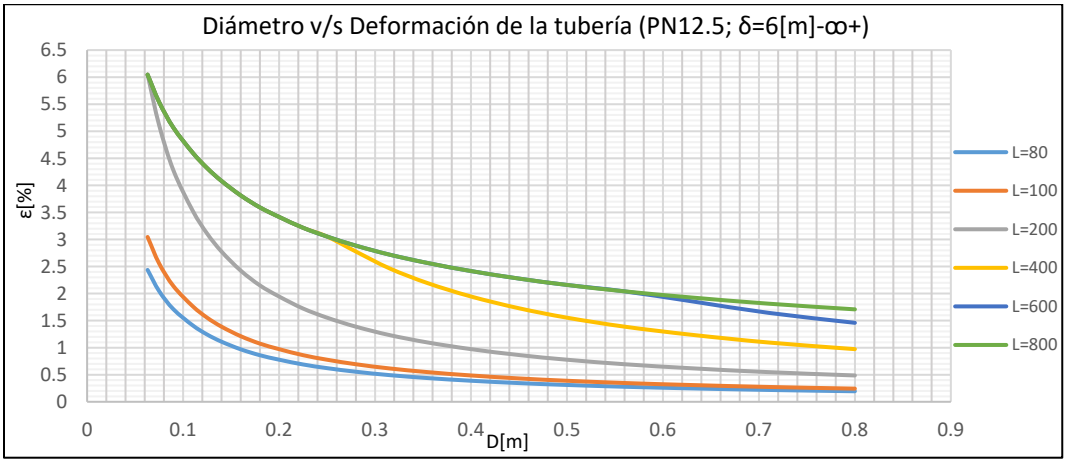


Gráfico 13-357: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN12.5, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

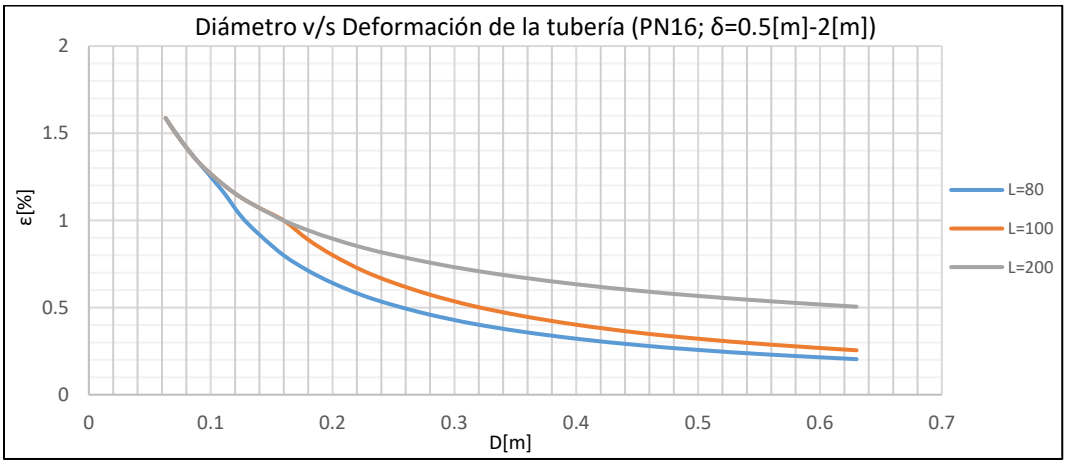


Gráfico 13-358: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

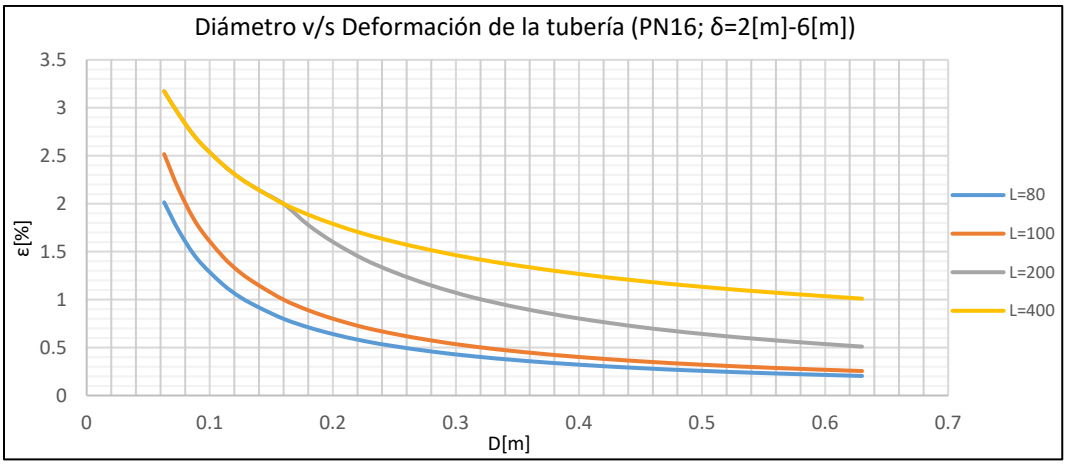


Gráfico 13-359: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad

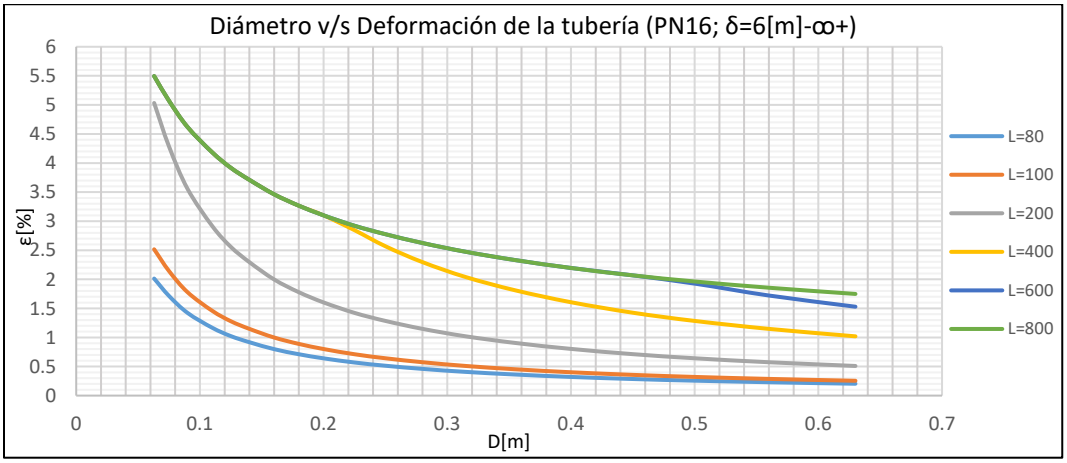


Gráfico 13-360: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

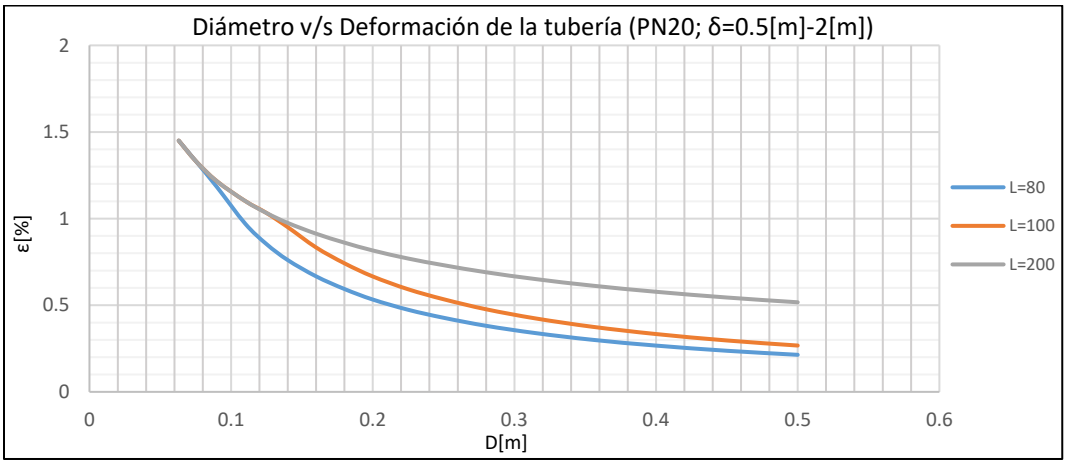


Gráfico 13-361: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

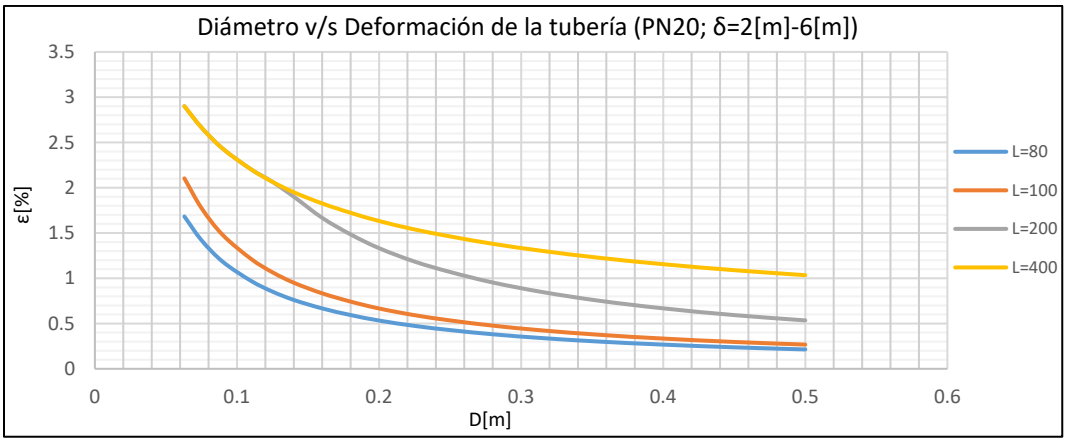


Gráfico 13-362: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

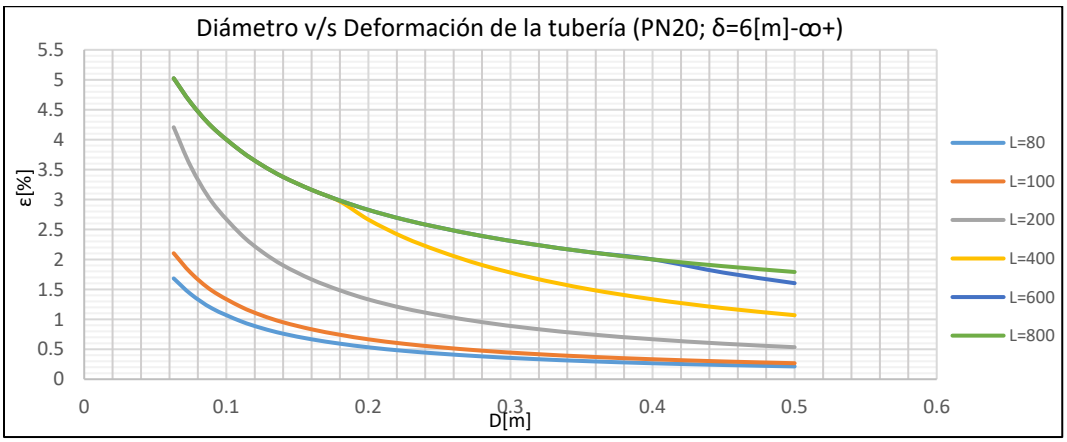


Gráfico 13-363: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE100 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

L.2.2. Tuberías de densidad PE200

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

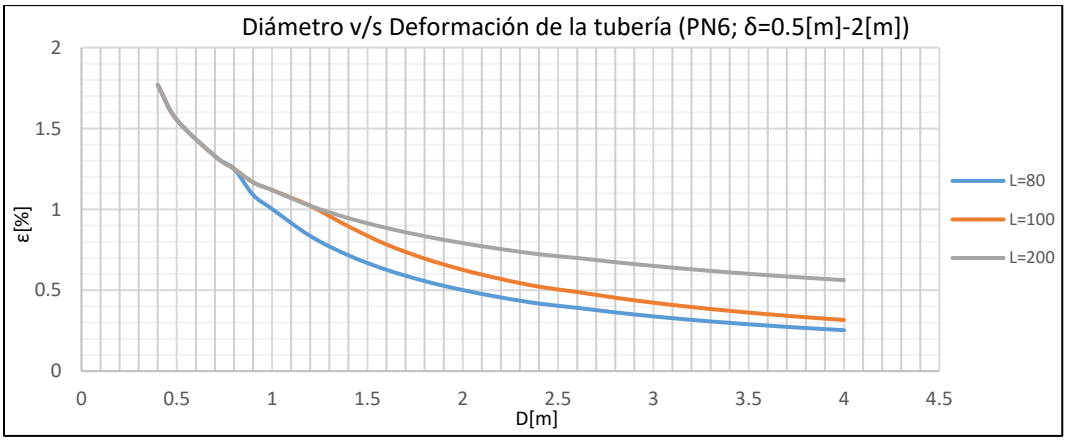


Gráfico 13-364: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

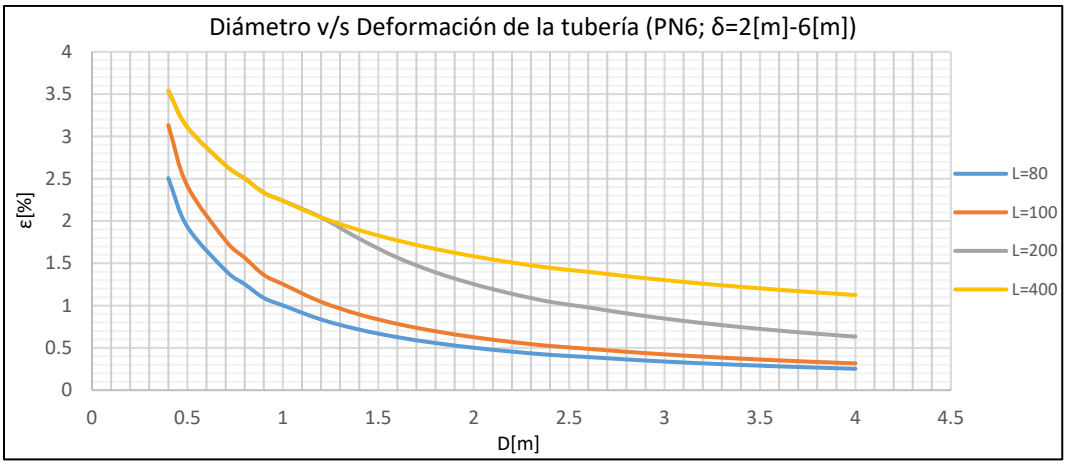


Gráfico 13-365: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena Fina.

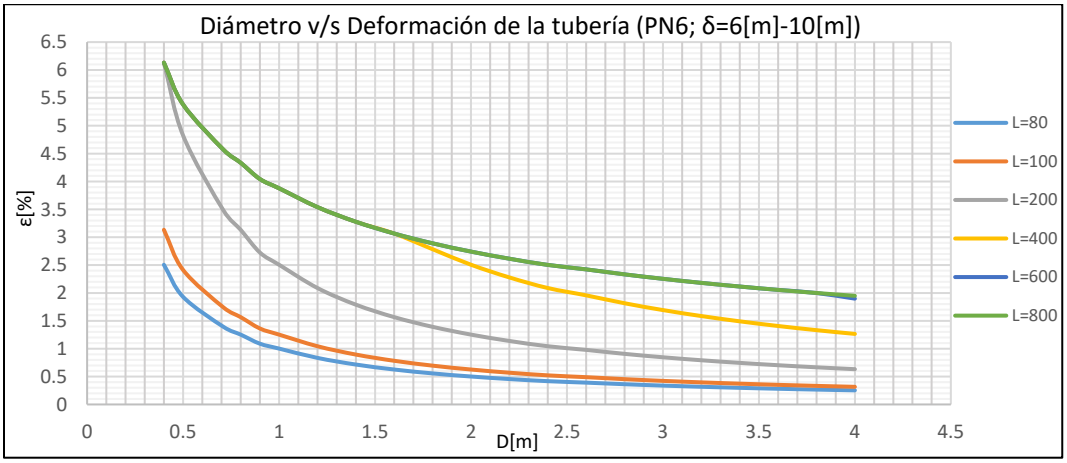


Gráfico 13-366: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena Fina.

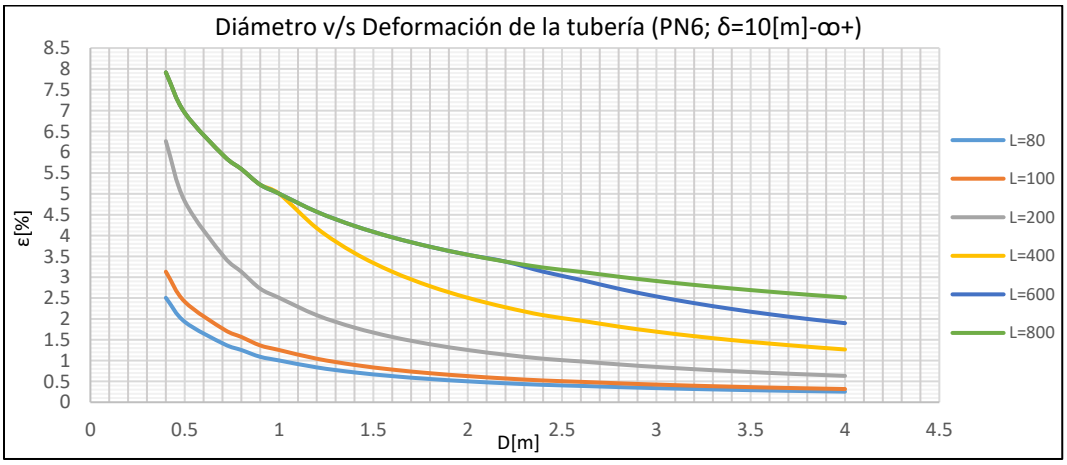


Gráfico 13-367: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena Fina.

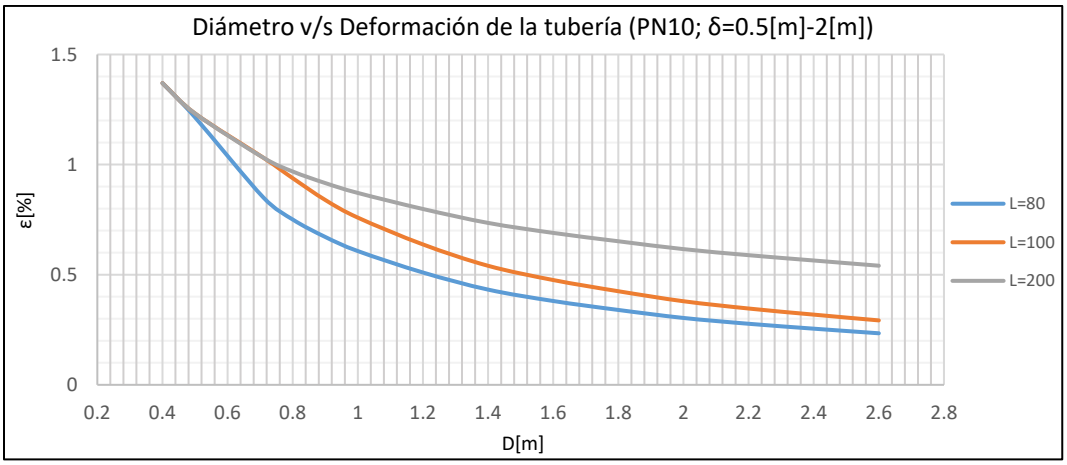


Gráfico 13-368: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

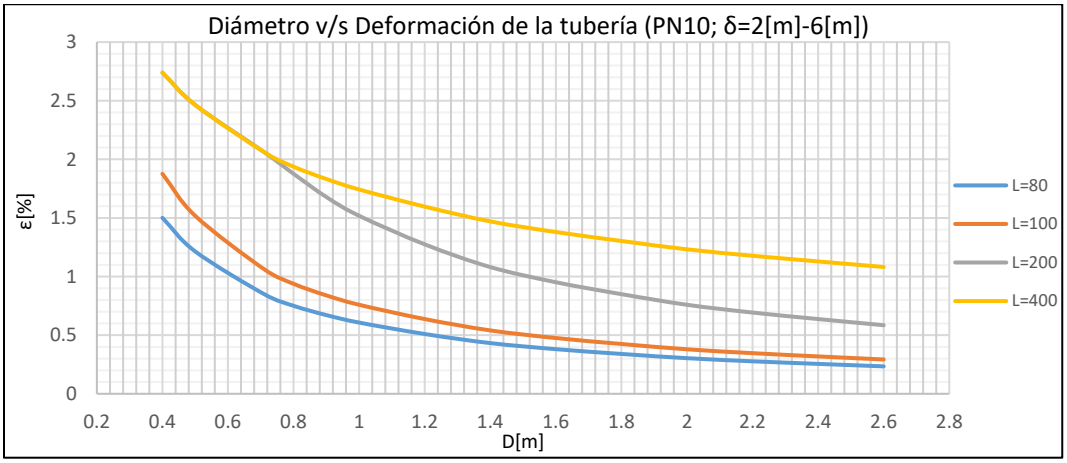


Gráfico 13-369: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena Fina.

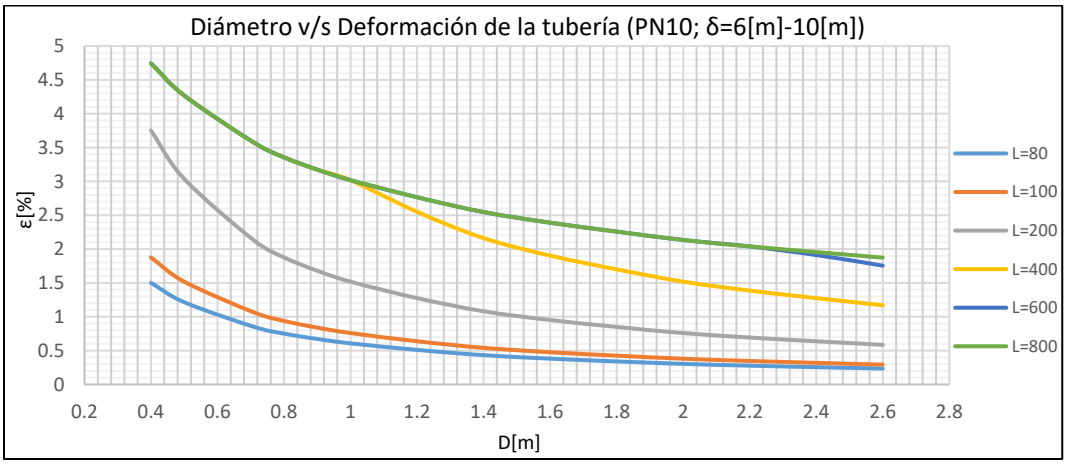


Gráfico 13-370: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena Fina.

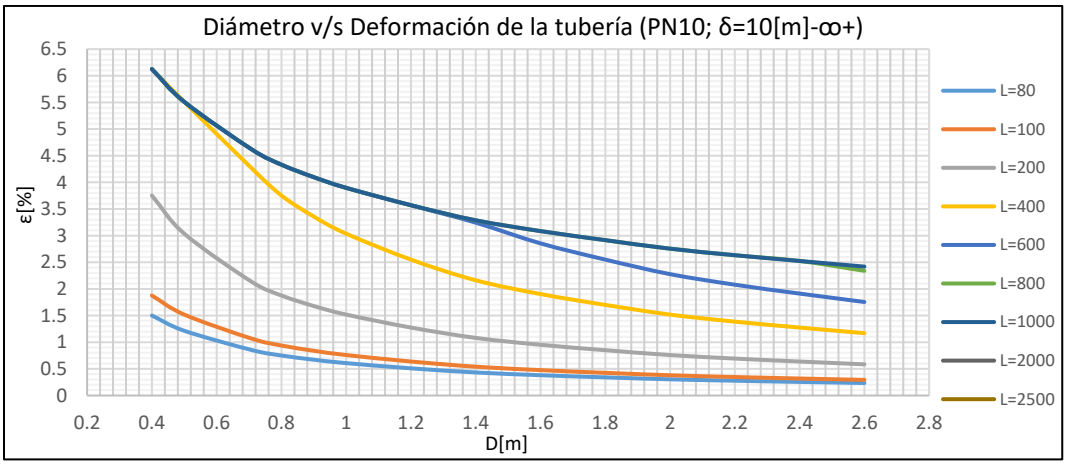


Gráfico 13-371: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena Fina.

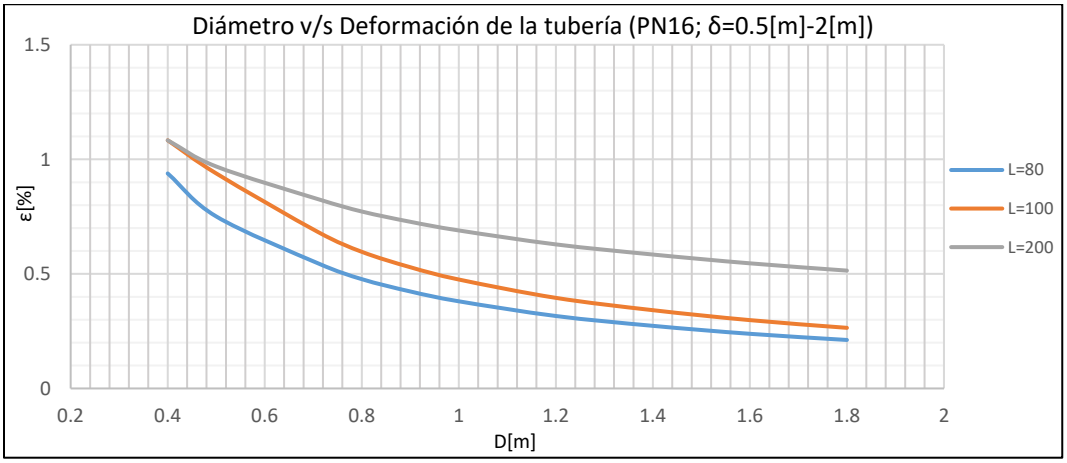


Gráfico 13-372: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

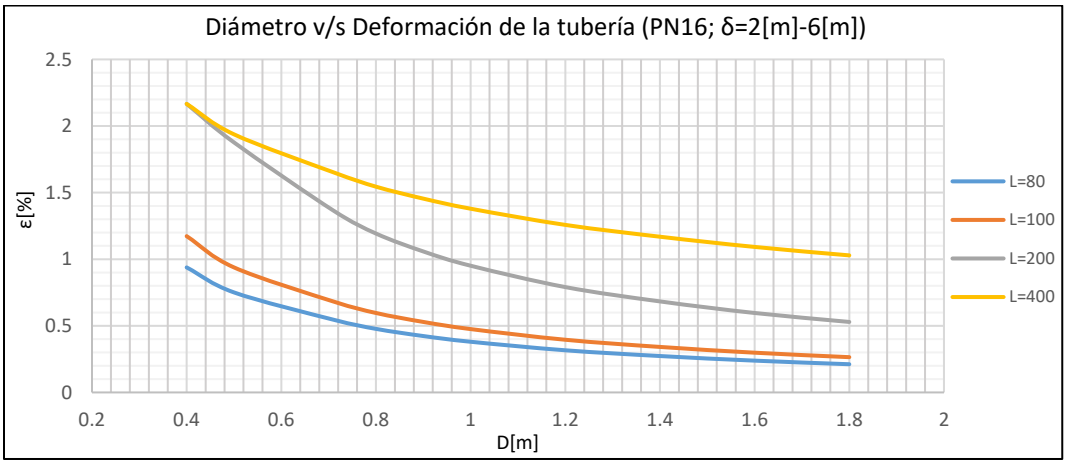


Gráfico 13-373: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena Fina.

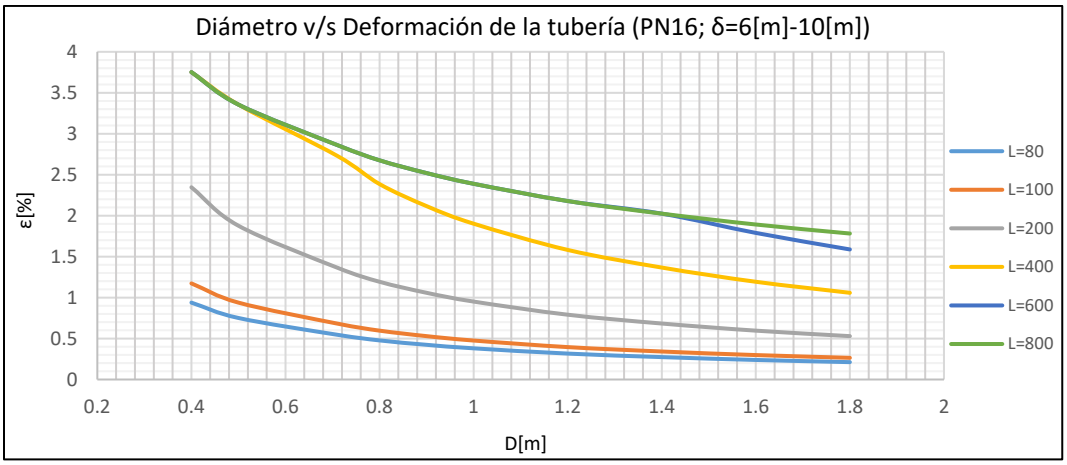


Gráfico 13-374: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena Fina.

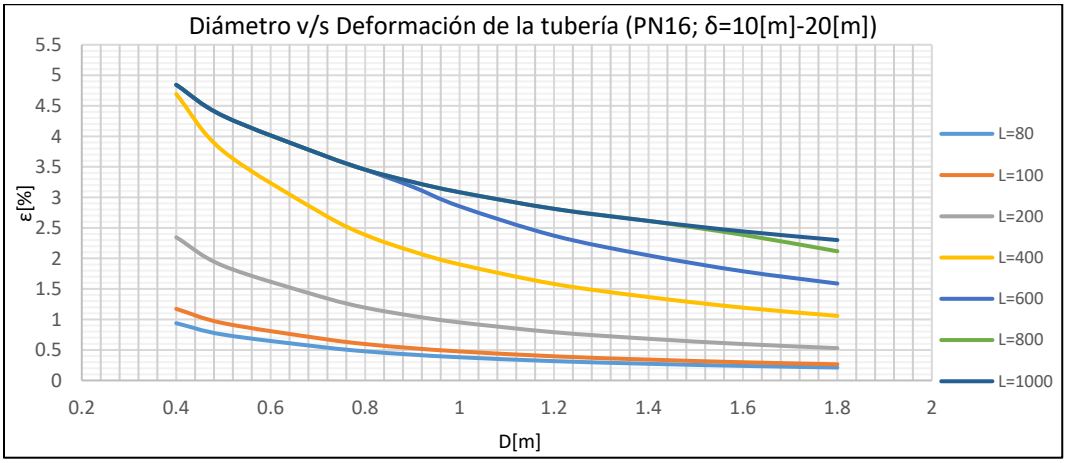


Gráfico 13-375: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo de Arena Fina.

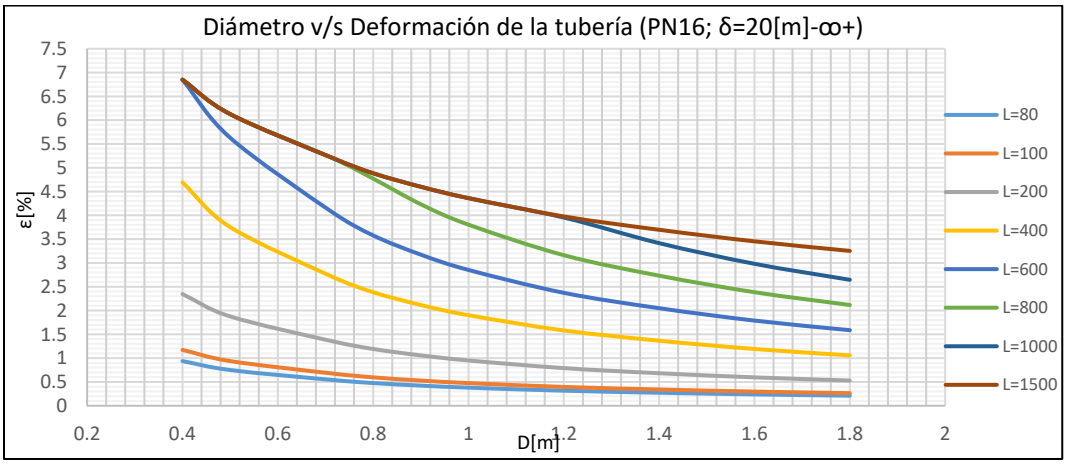


Gráfico 13-376: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 20[m], Suelo de Arena Fina.

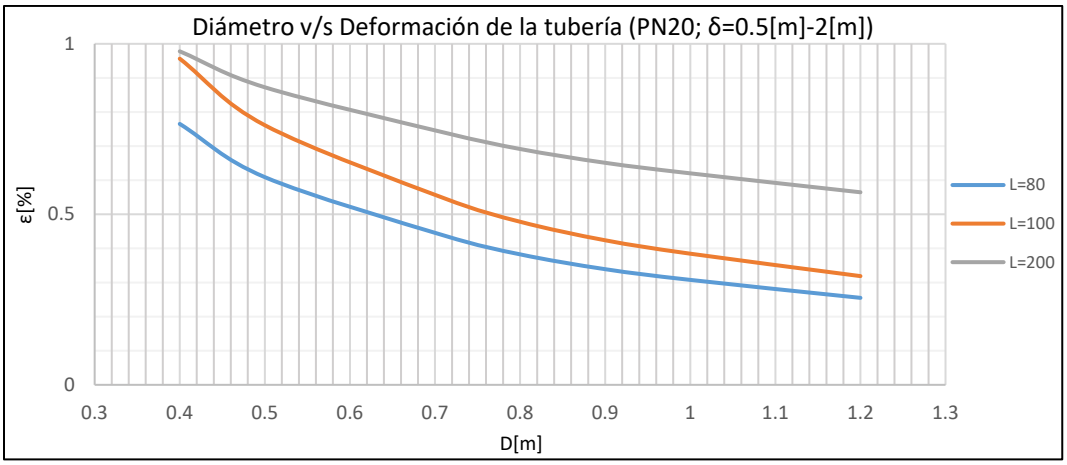


Gráfico 13-377: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

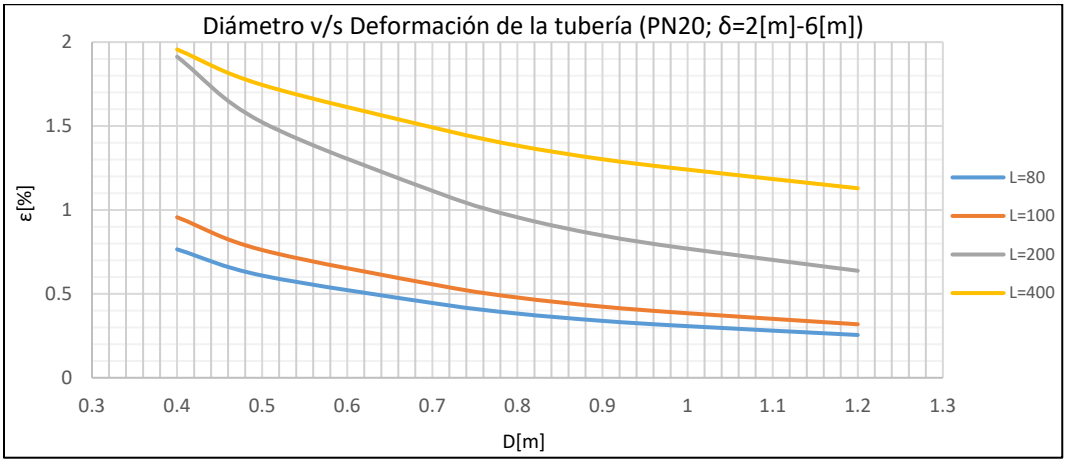


Gráfico 13-378: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena Fina.

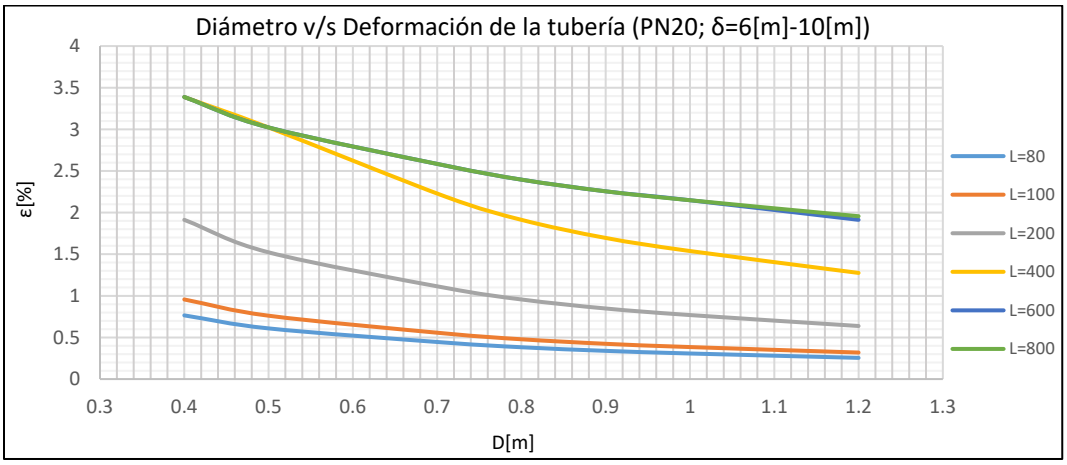


Gráfico 13-379: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena Fina.

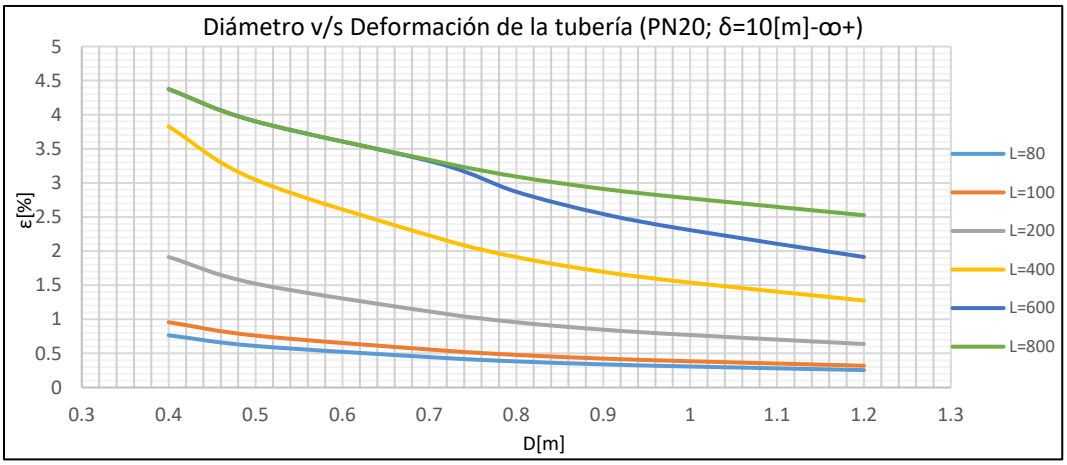


Gráfico 13-380: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena Fina.

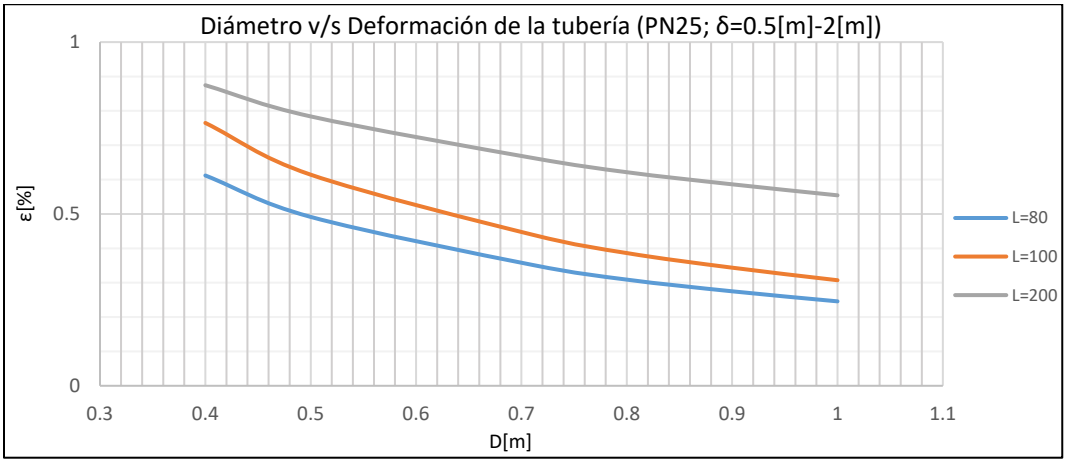


Gráfico 13-381: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

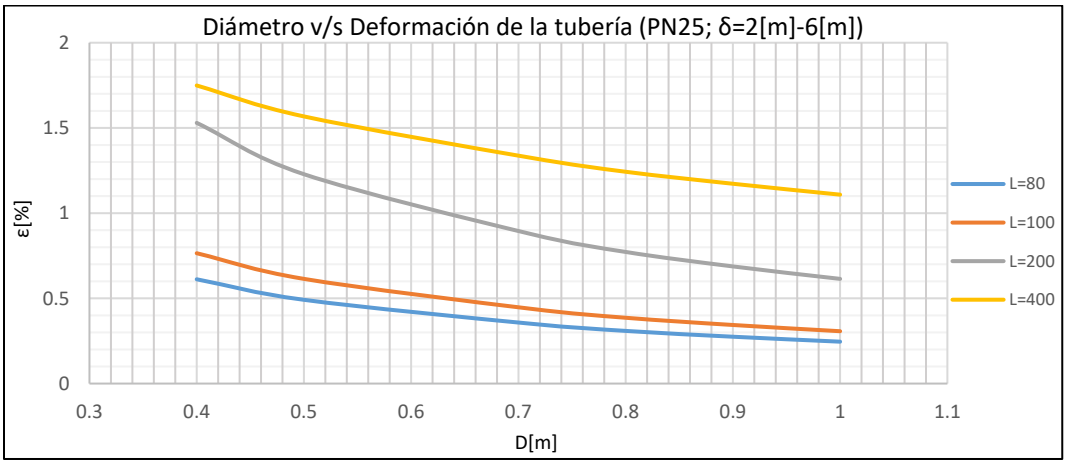


Gráfico 13-382: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena Fina.

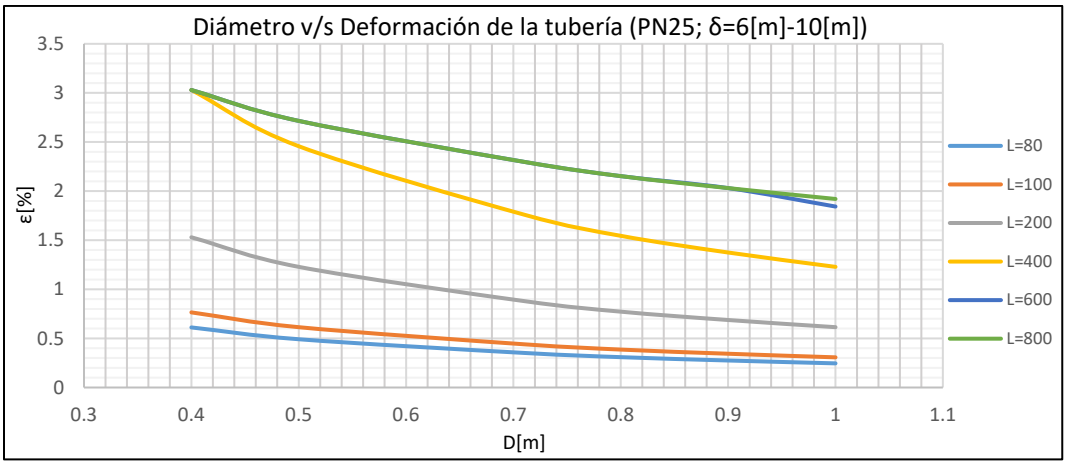


Gráfico 13-383: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena Fina.

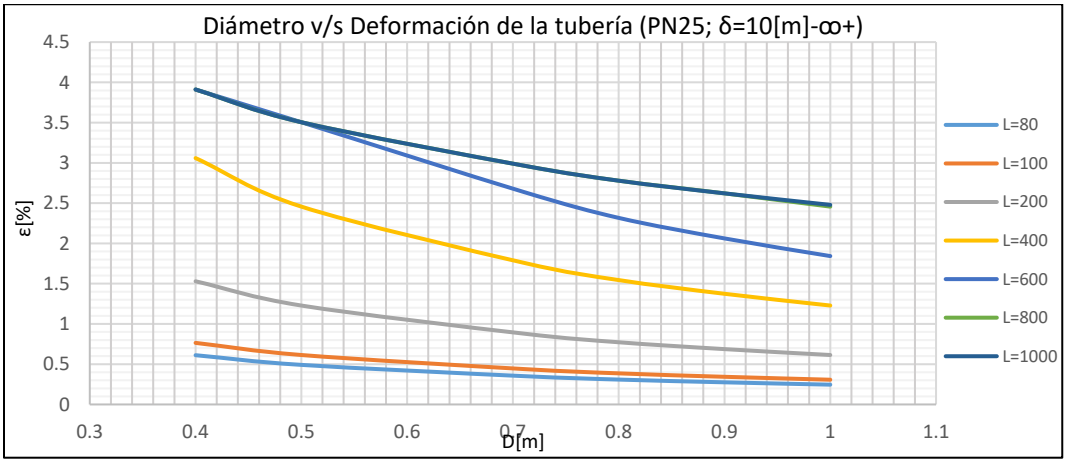


Gráfico 13-384: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena Fina.

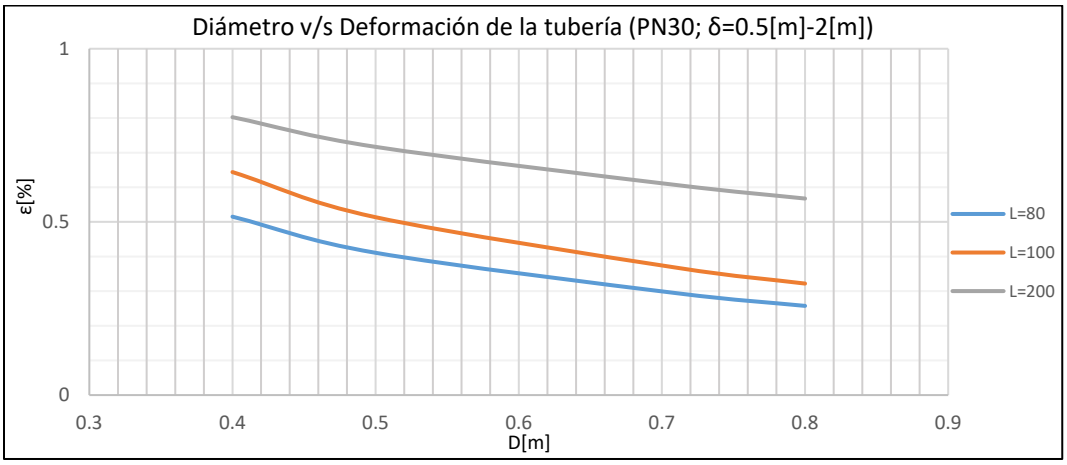


Gráfico 13-385: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

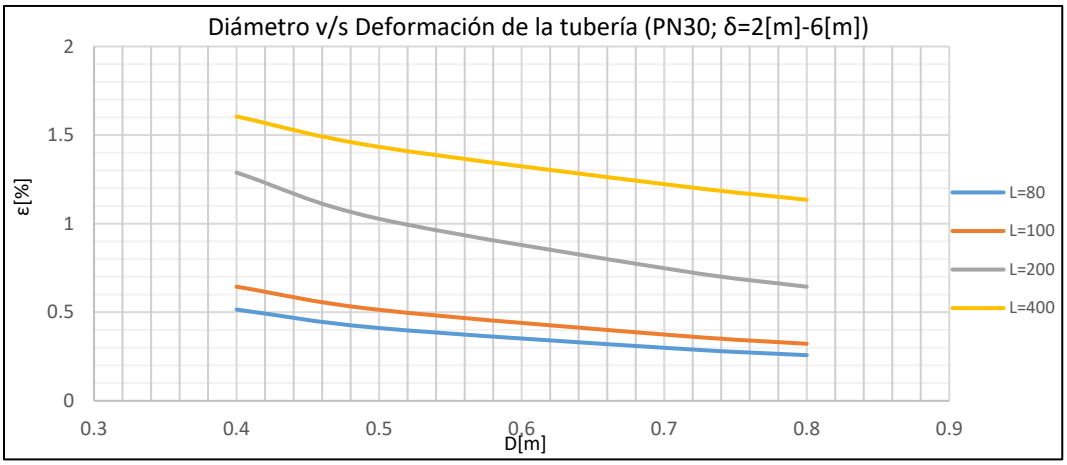


Gráfico 13-386: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

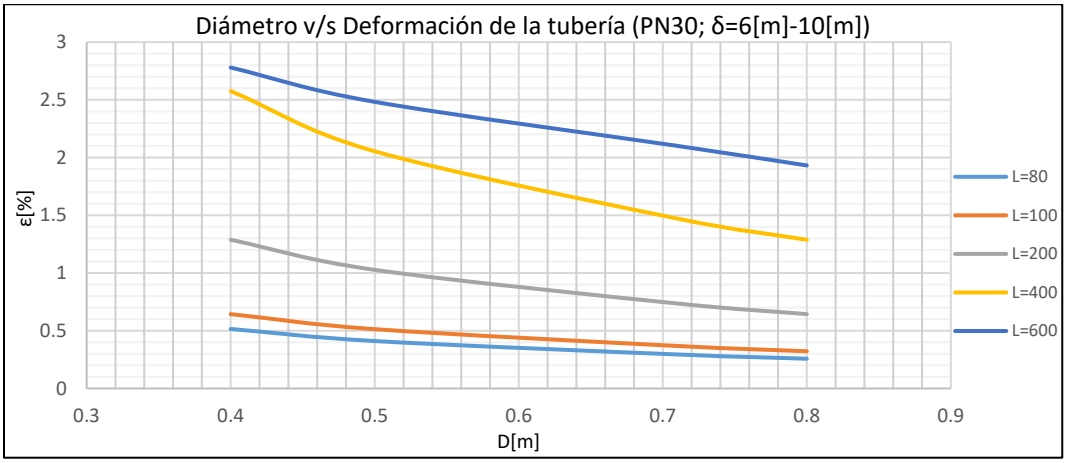


Gráfico 13-387: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena Fina.

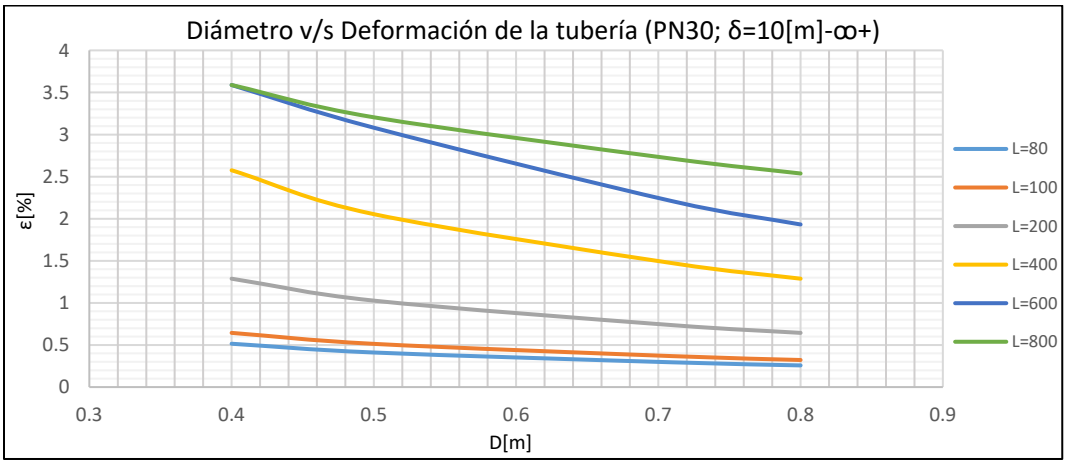


Gráfico 13-388: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

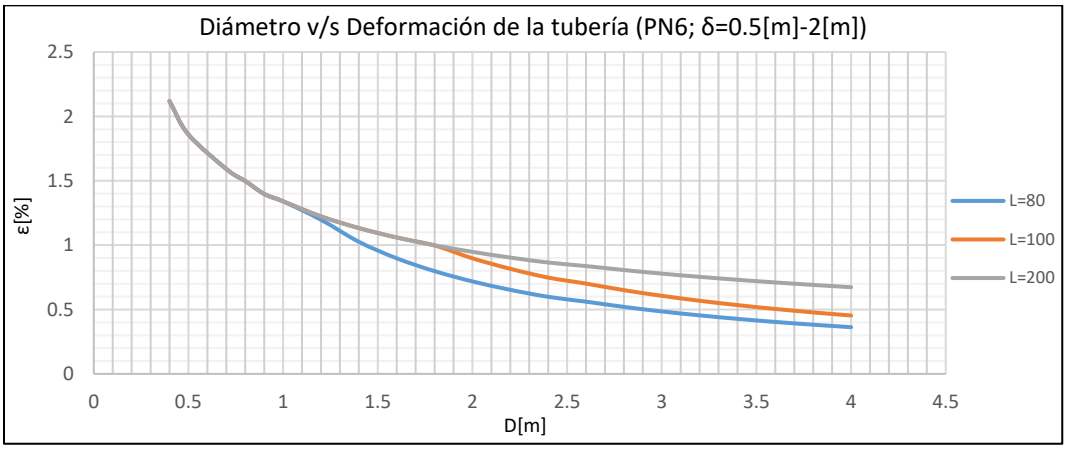


Gráfico 13-389: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

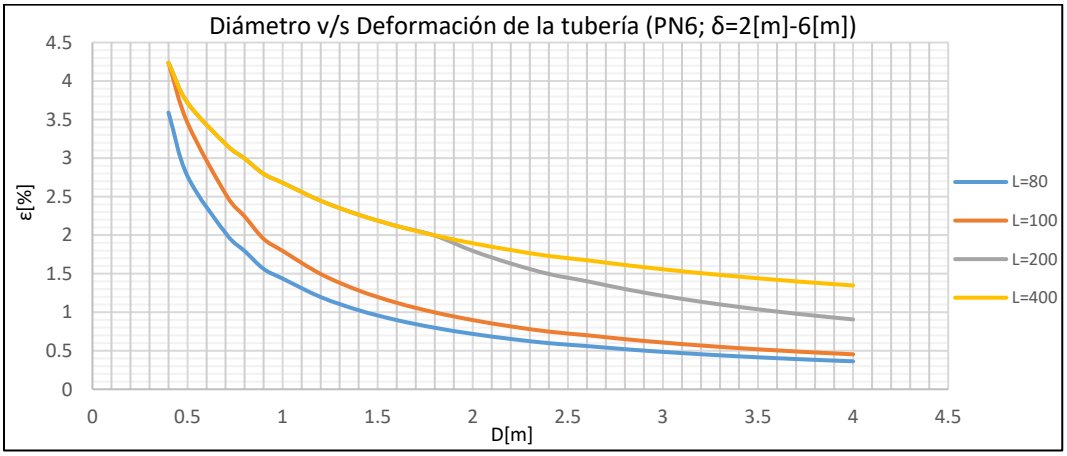


Gráfico 13-390: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena gruesa.

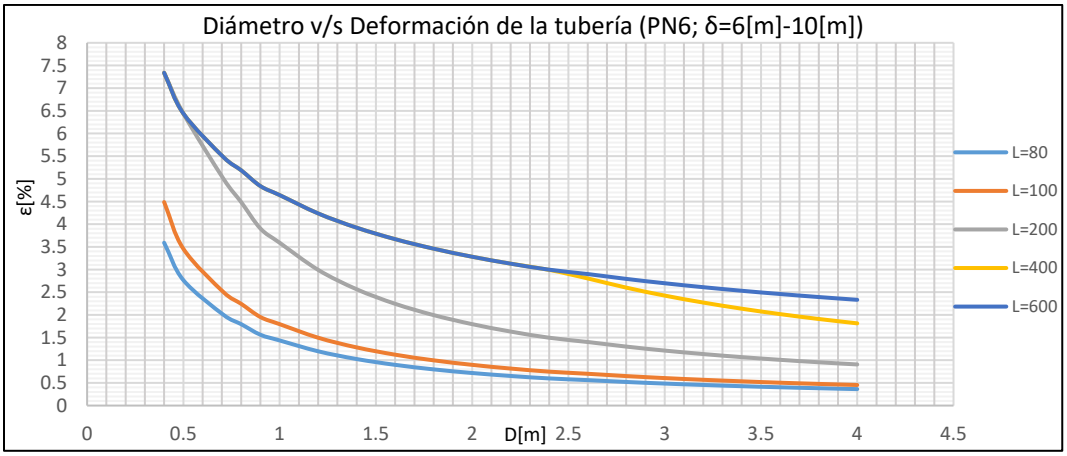


Gráfico 13-391: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

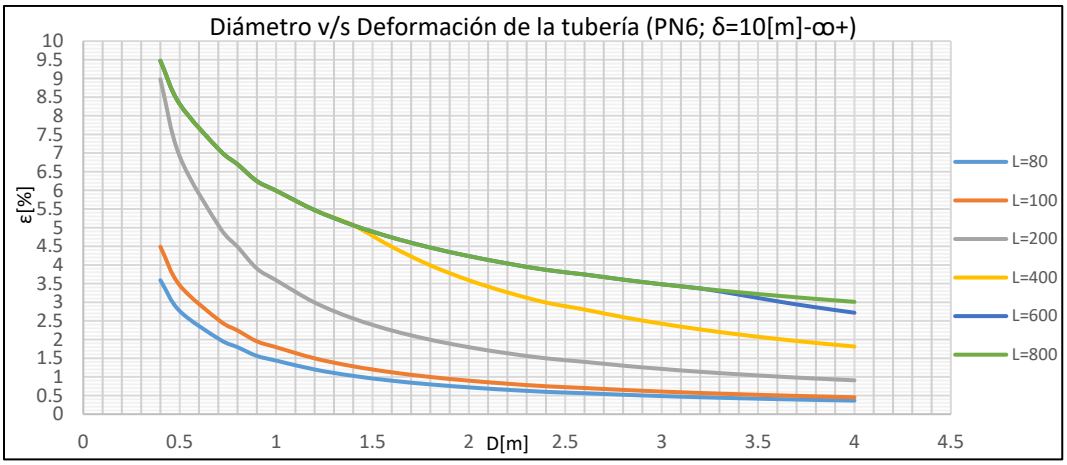


Gráfico 13-392: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena gruesa.

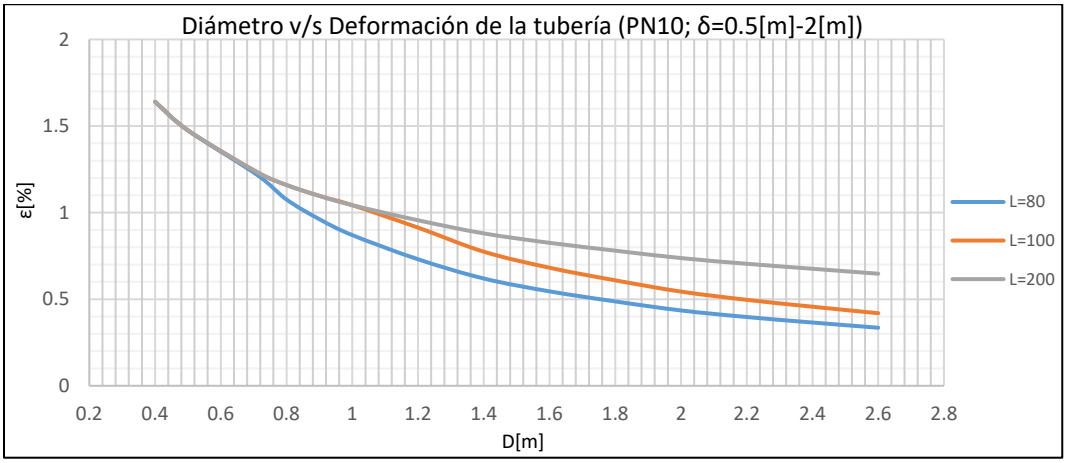


Gráfico 13-393: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

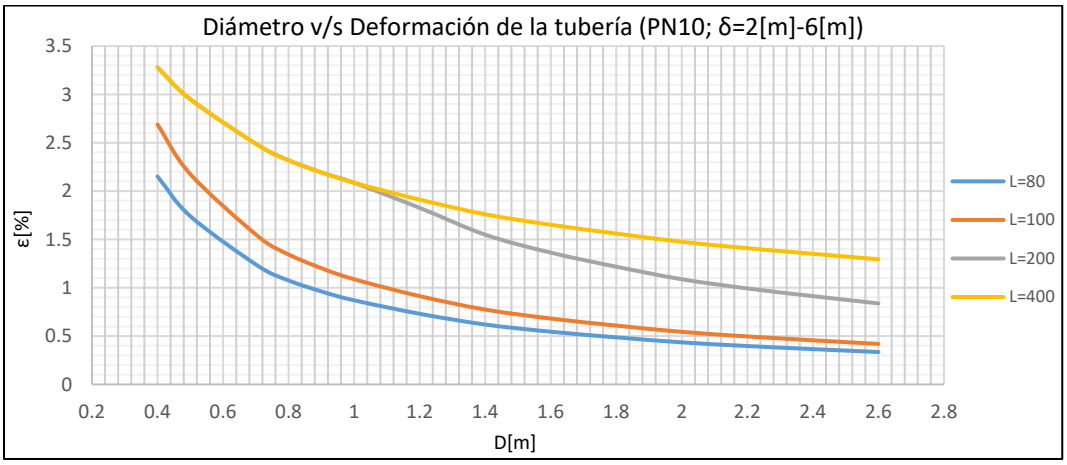


Gráfico 13-394: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena gruesa.

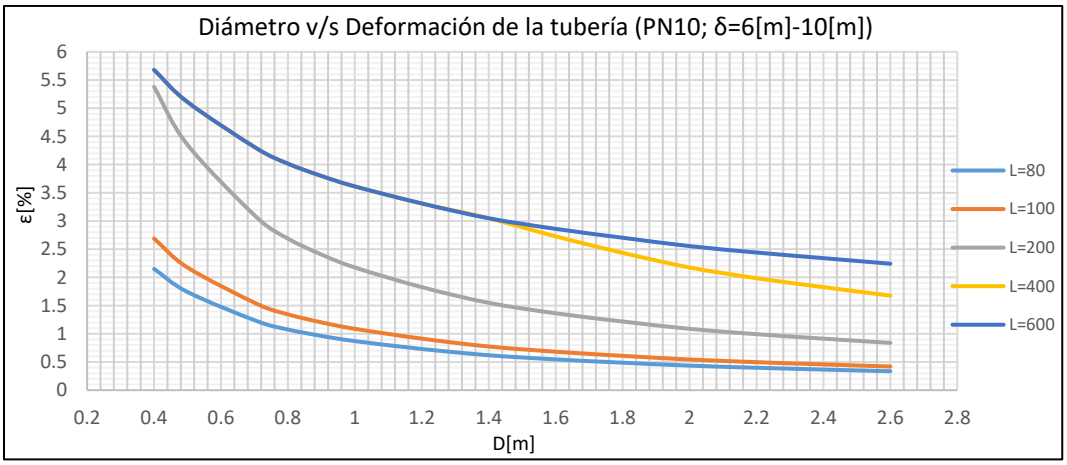


Gráfico 13-395: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena gruesa.

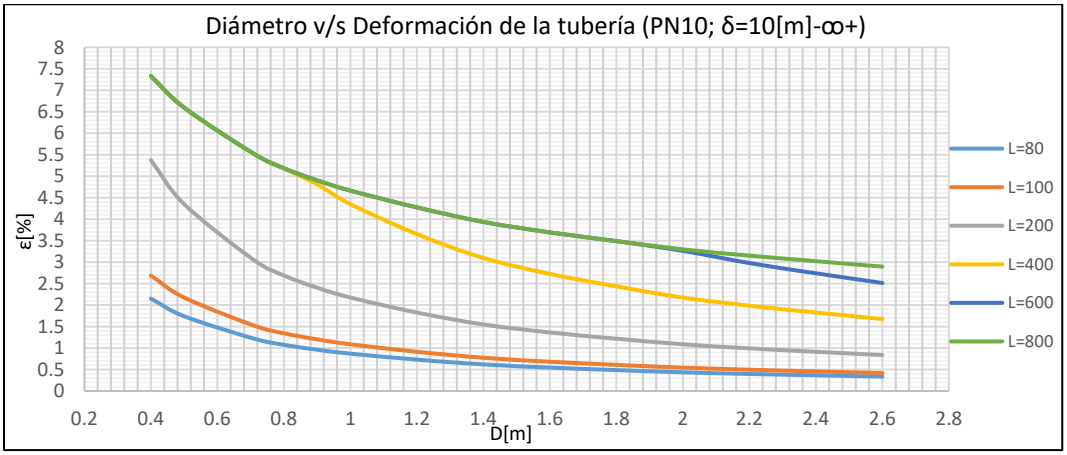


Gráfico 13-396: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena gruesa.

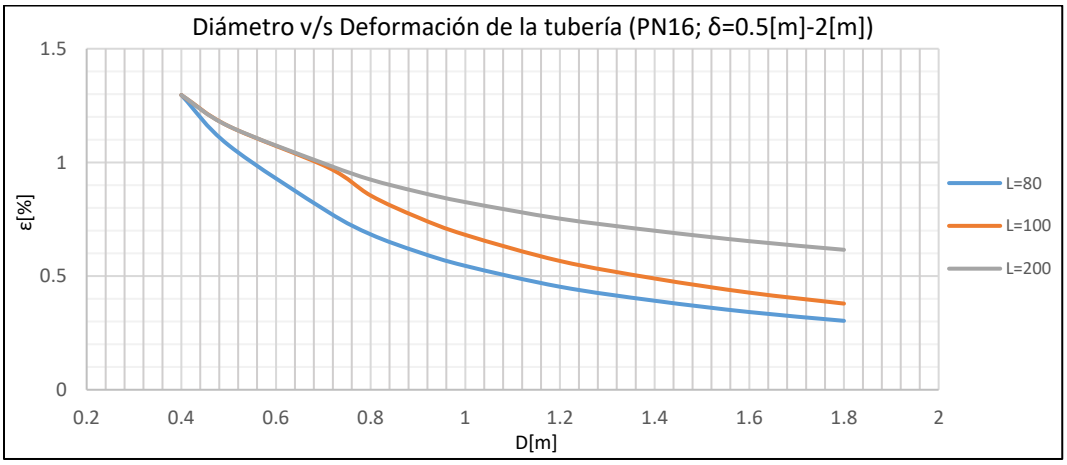


Gráfico 13-397: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

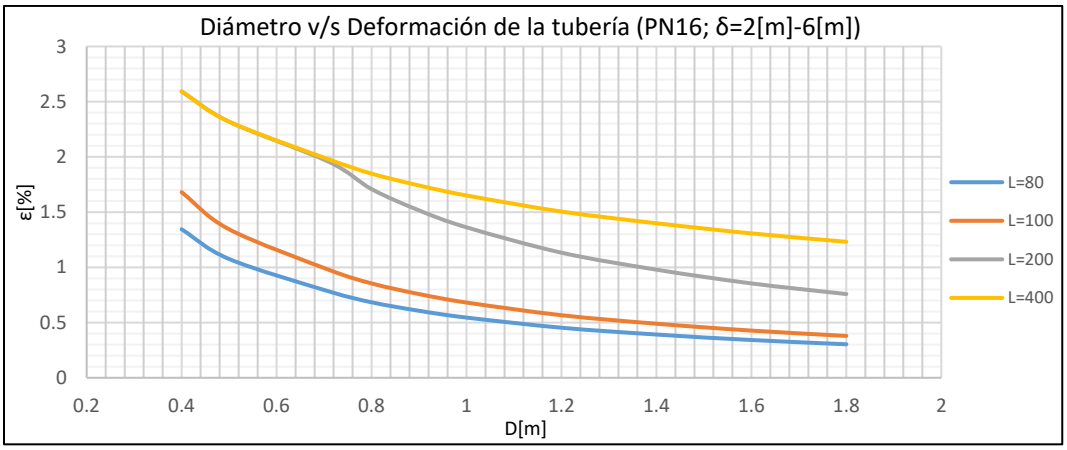


Gráfico 13-398: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena gruesa.

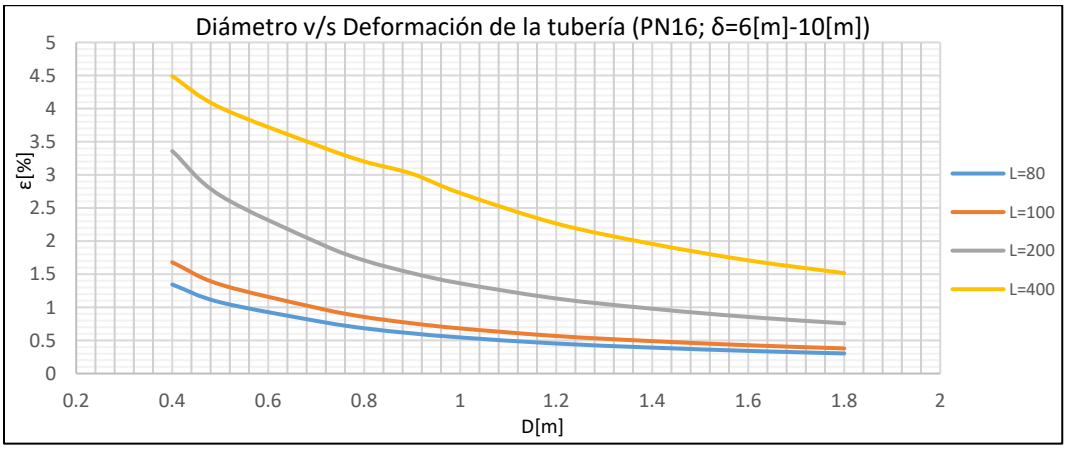


Gráfico 13-399: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena gruesa.

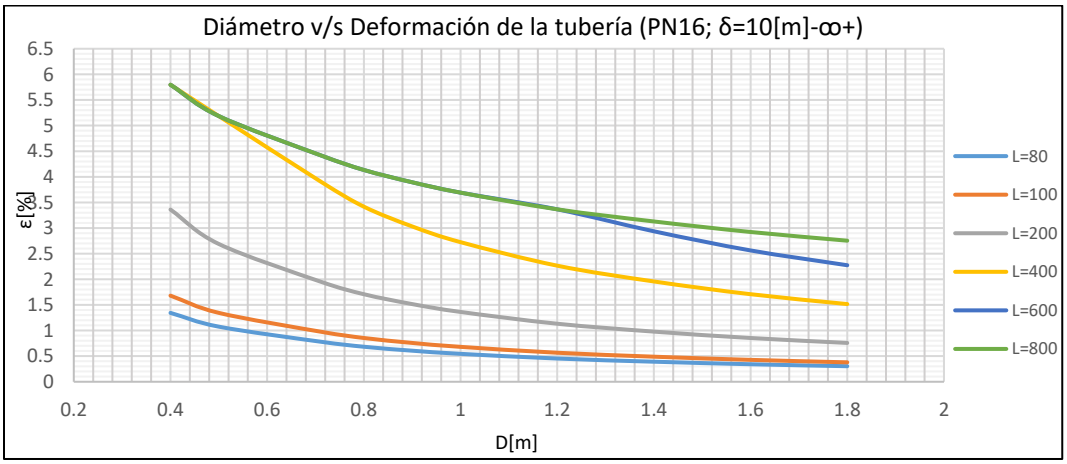


Gráfico 13-400: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena gruesa.

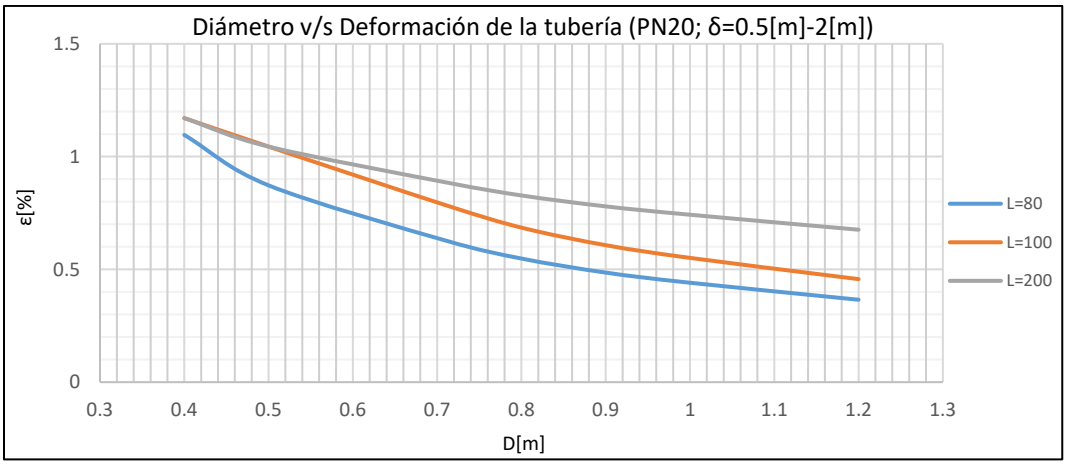


Gráfico 13-401: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

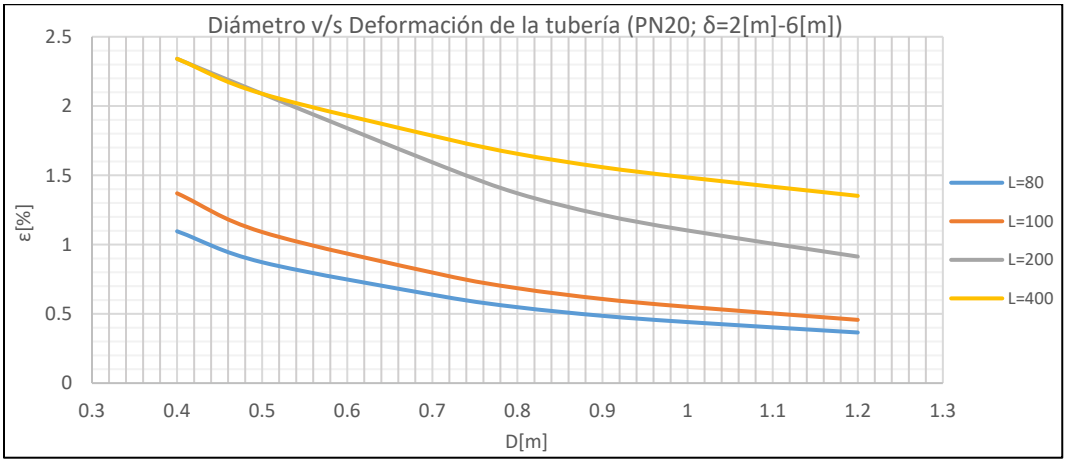


Gráfico 13-402: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena gruesa.

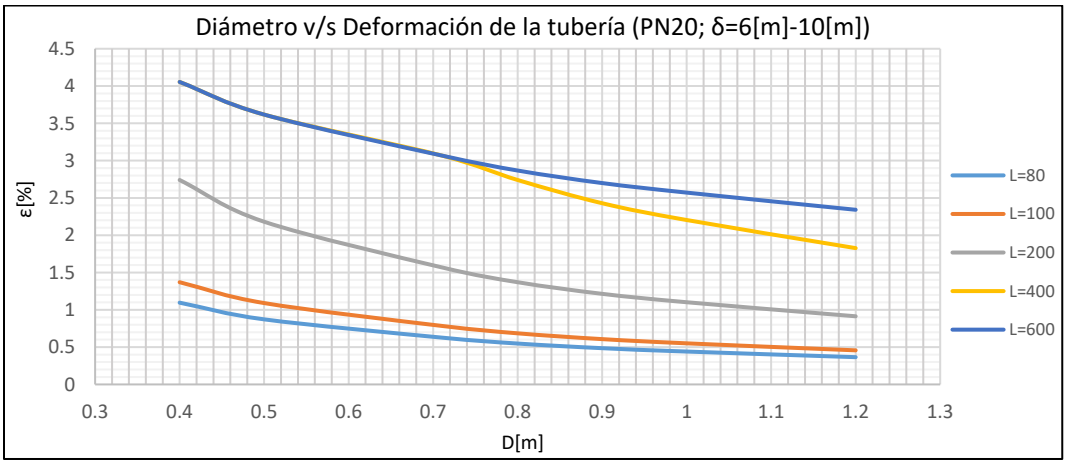


Gráfico 13-403: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena gruesa.

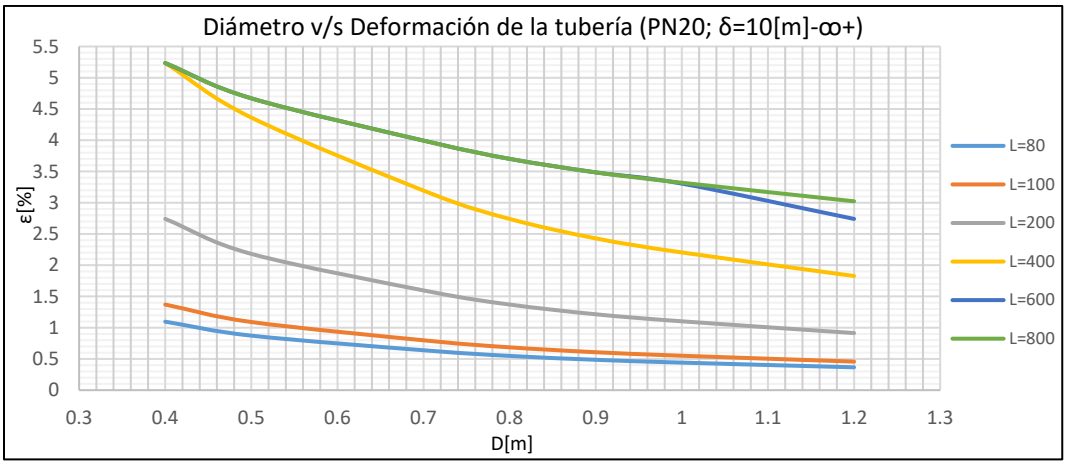


Gráfico 13-404: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena gruesa.

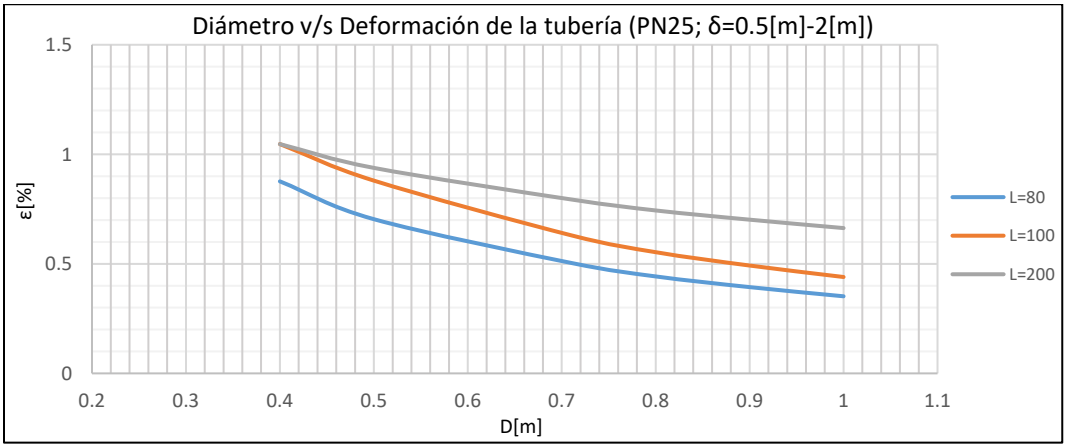


Gráfico 13-405: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

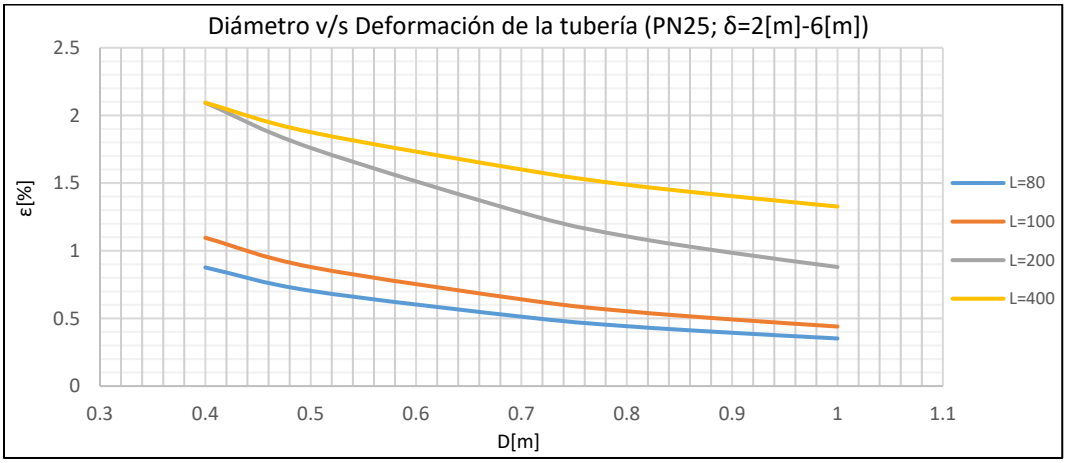


Gráfico 13-406: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo de Arena gruesa.

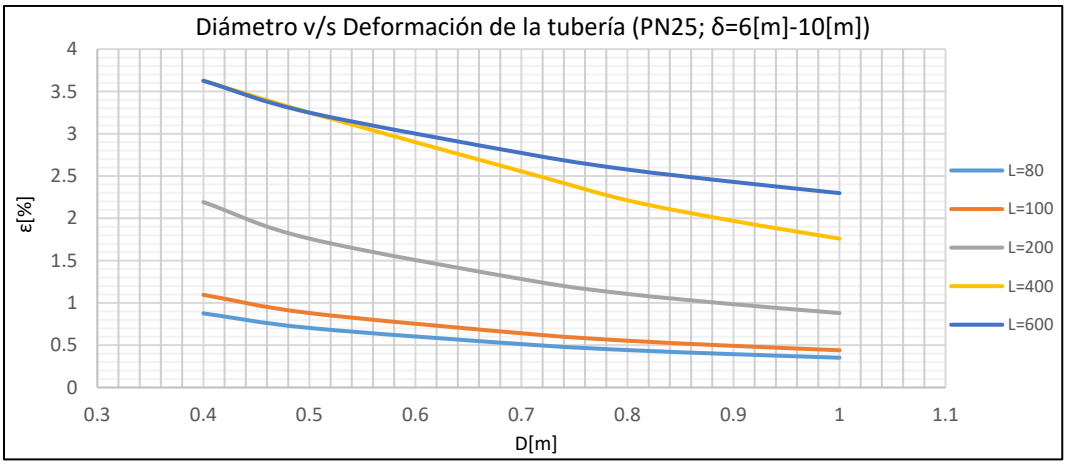


Gráfico 13-407: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena gruesa.

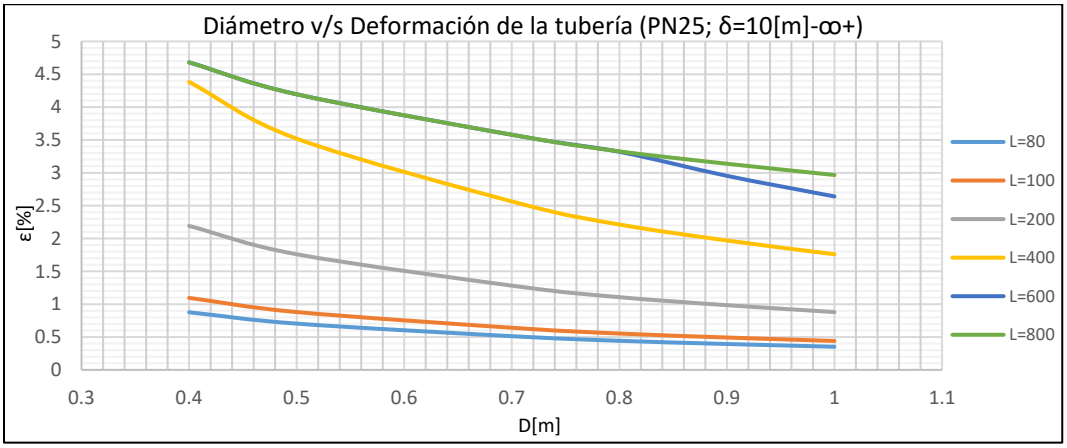


Gráfico 13-408: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena gruesa.

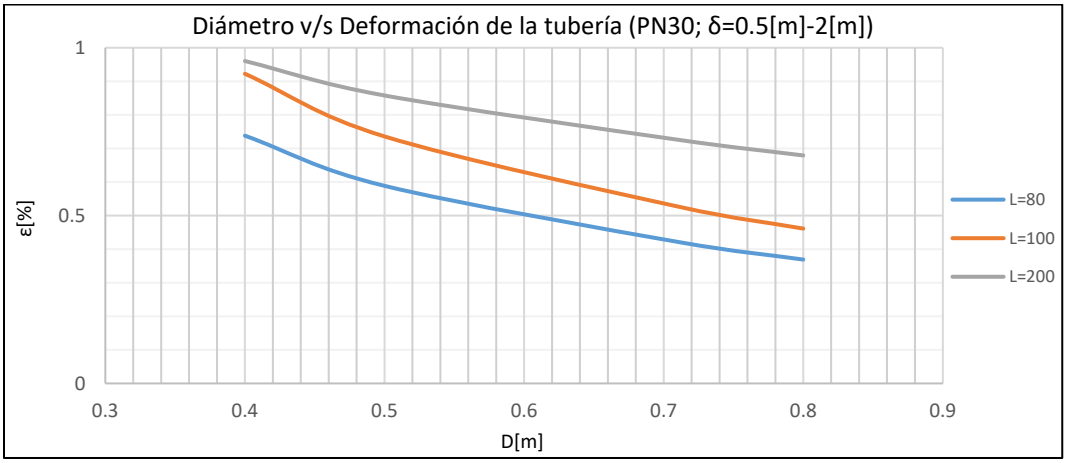


Gráfico 13-409: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

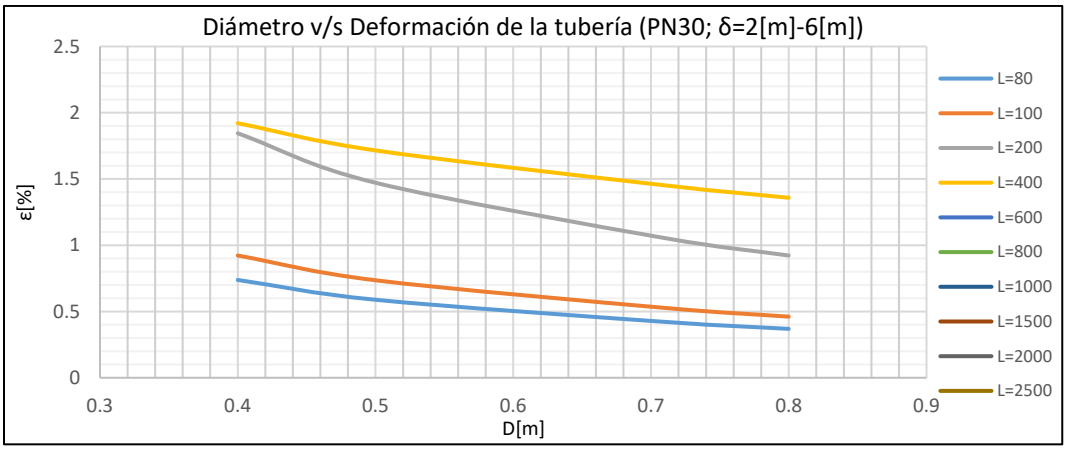


Gráfico 13-410: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

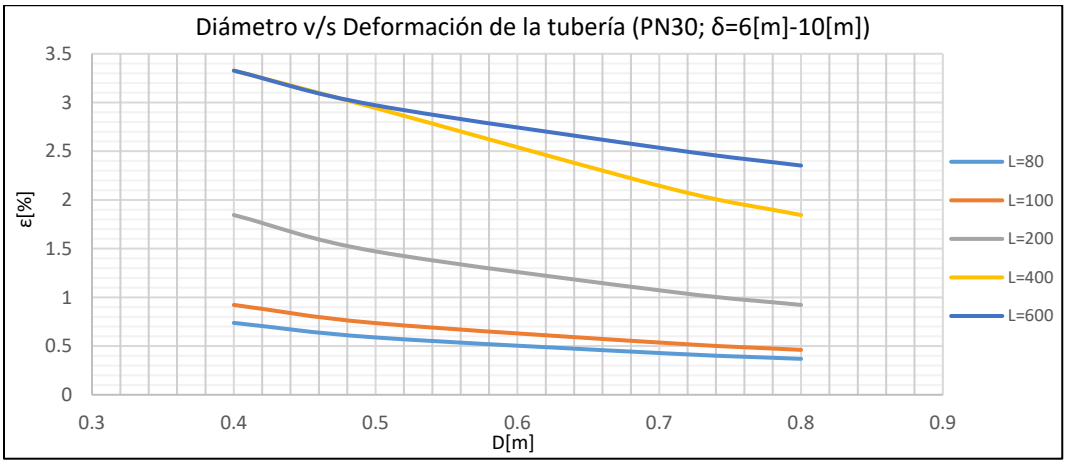


Gráfico 13-411: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo de Arena gruesa.

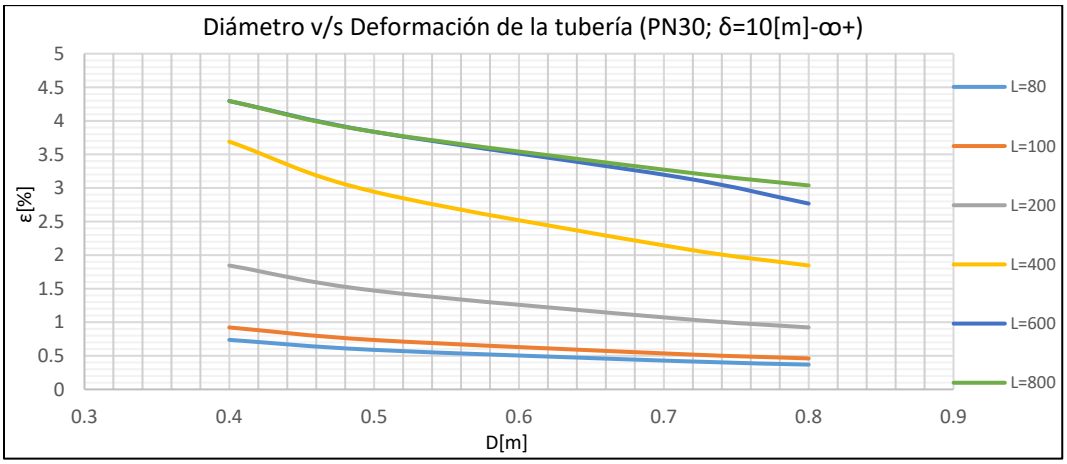


Gráfico 13-412: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal mayor a 10[m], Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

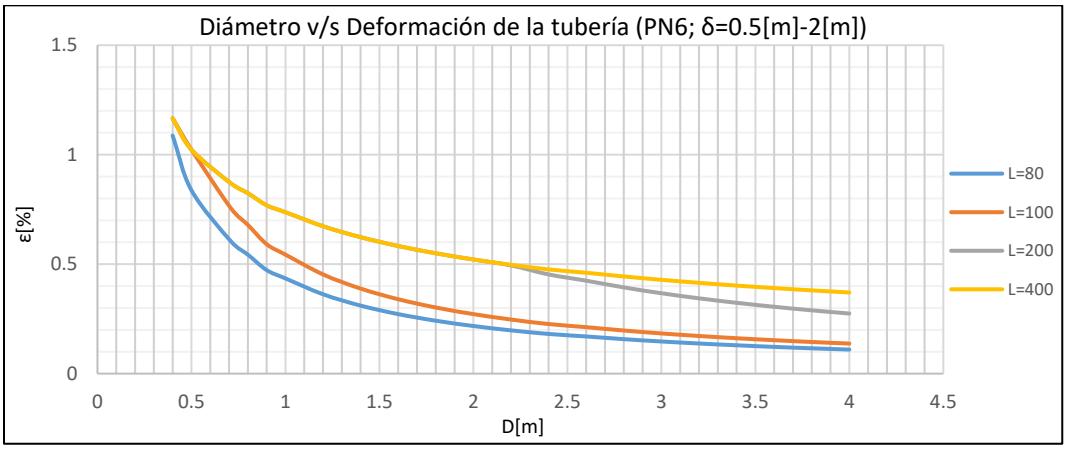


Gráfico 13-413: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

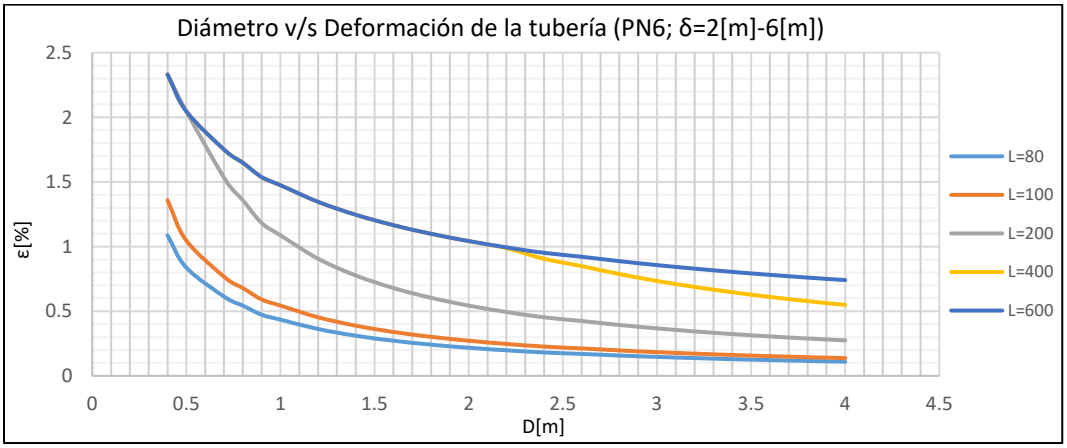


Gráfico 13-414: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

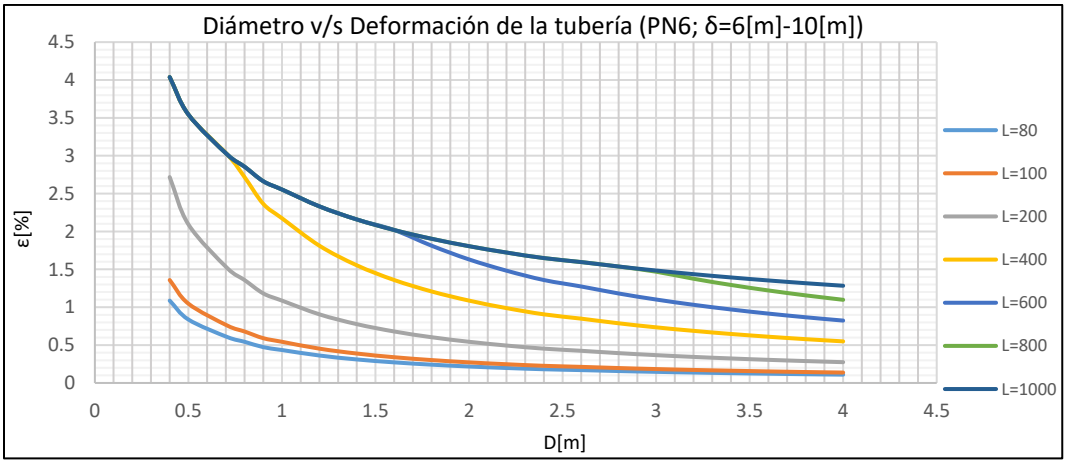


Gráfico 13-415: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

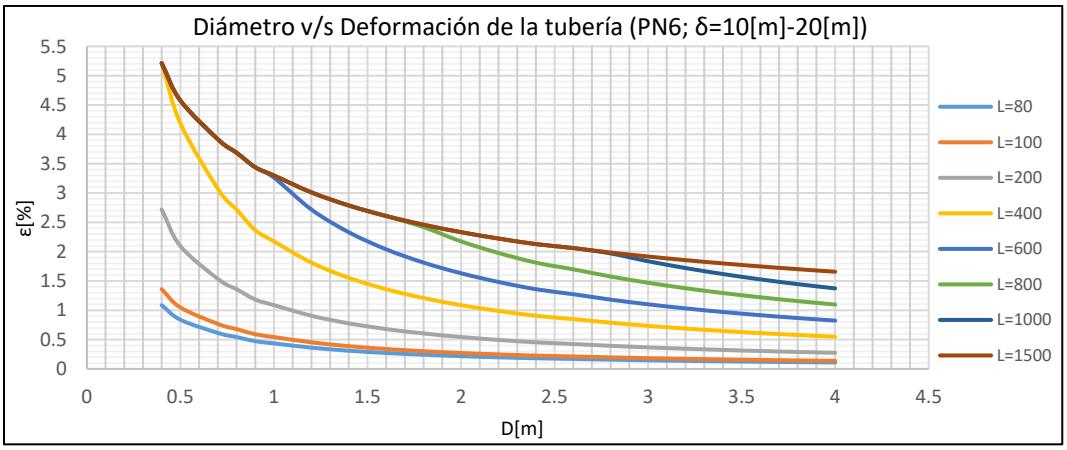


Gráfico 13-416: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

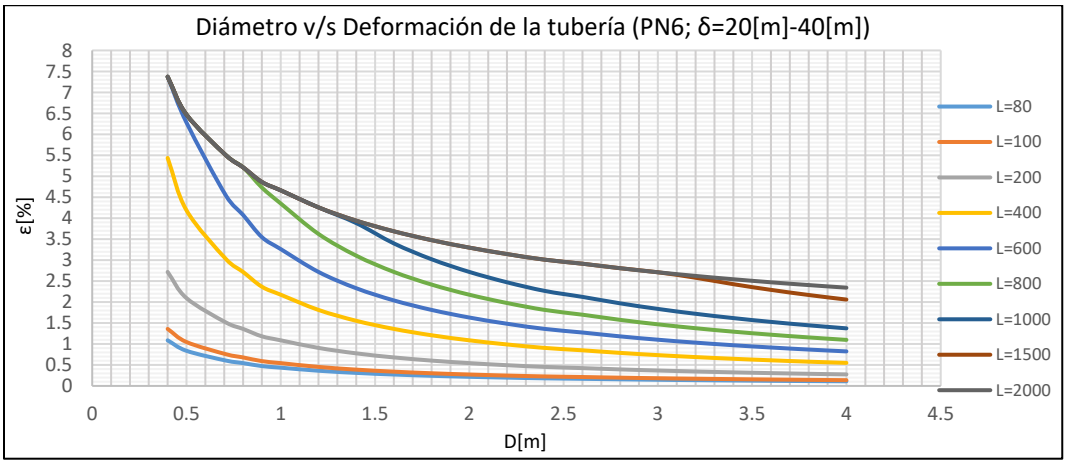


Gráfico 13-417: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal entre 20[m] y 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

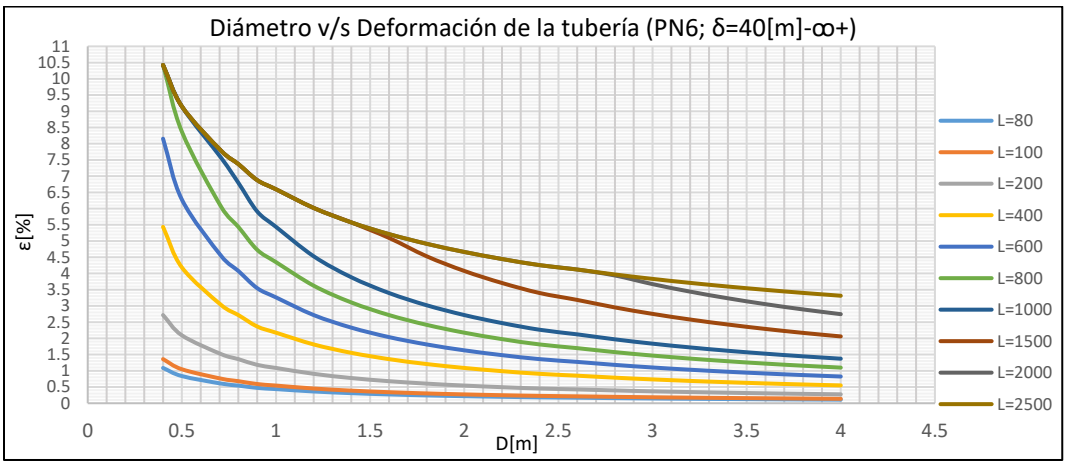


Gráfico 13-418: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN6, desplazamiento longitudinal mayor a 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

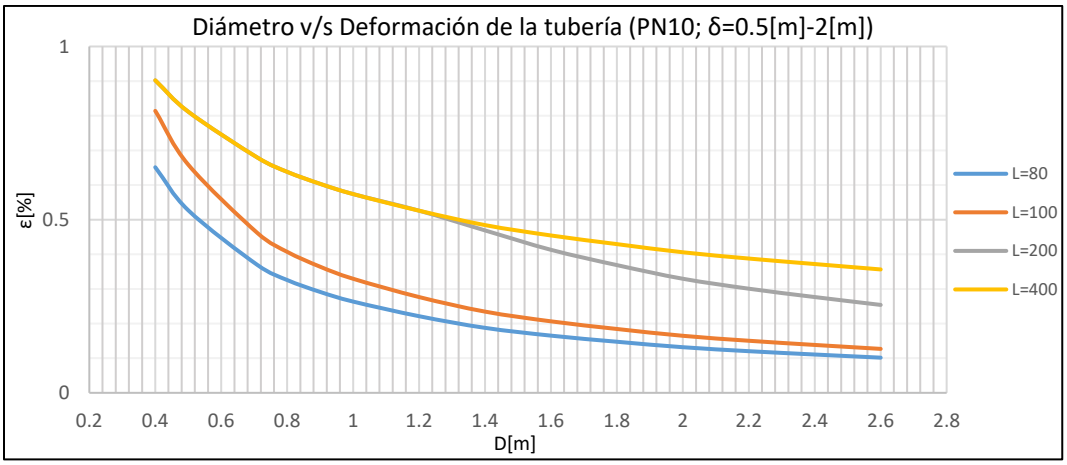


Gráfico 13-419: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

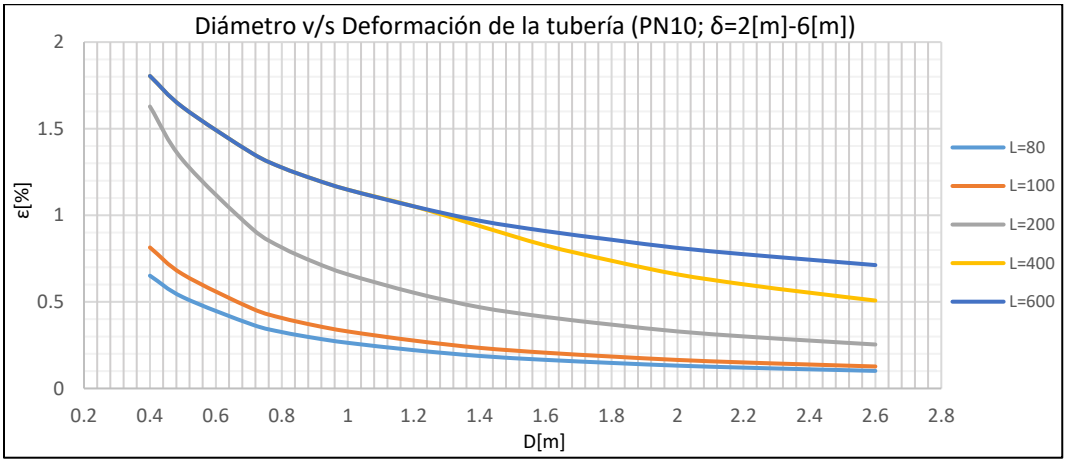


Gráfico 13-420: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

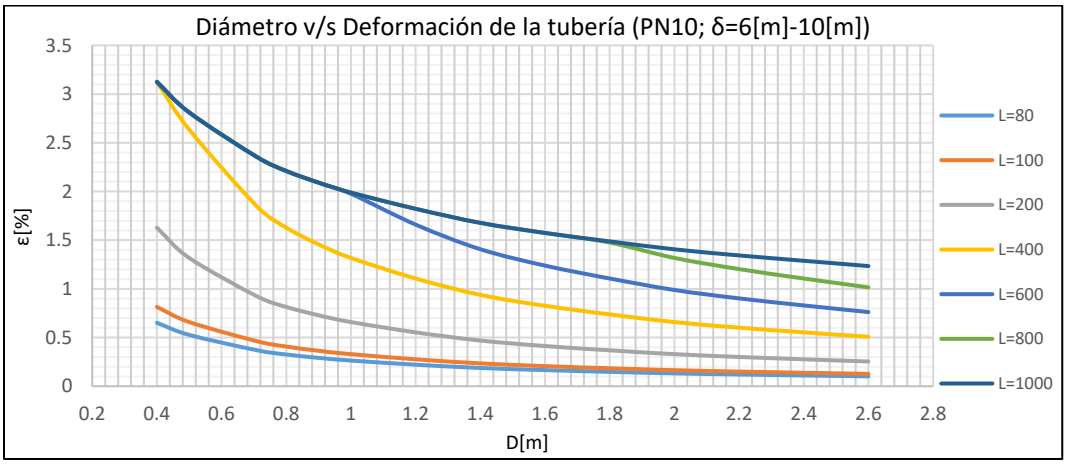


Gráfico 13-421: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

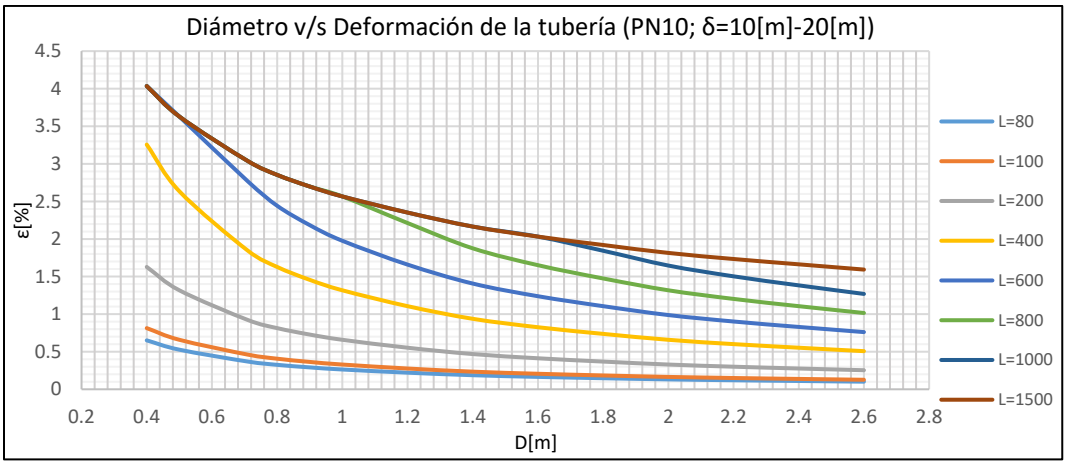


Gráfico 13-422: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

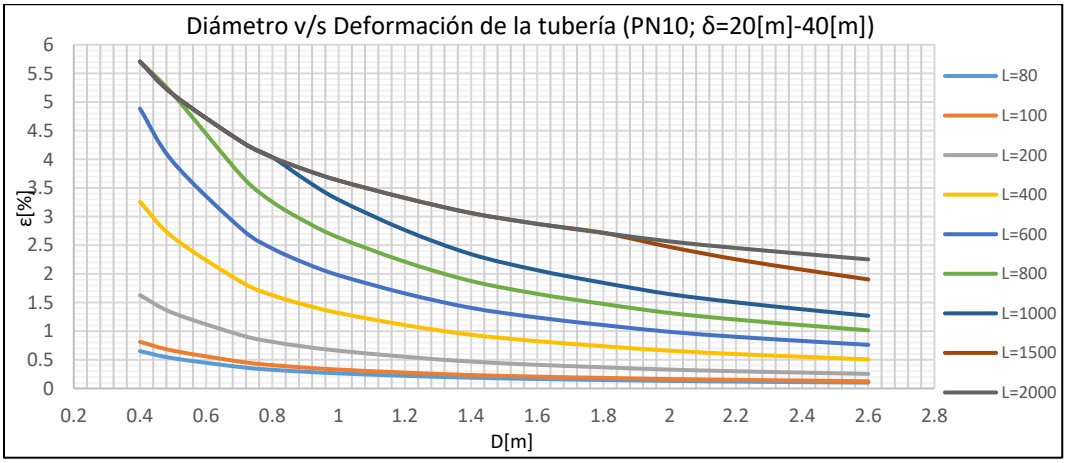


Gráfico 13-423: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal entre 20[m] y 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

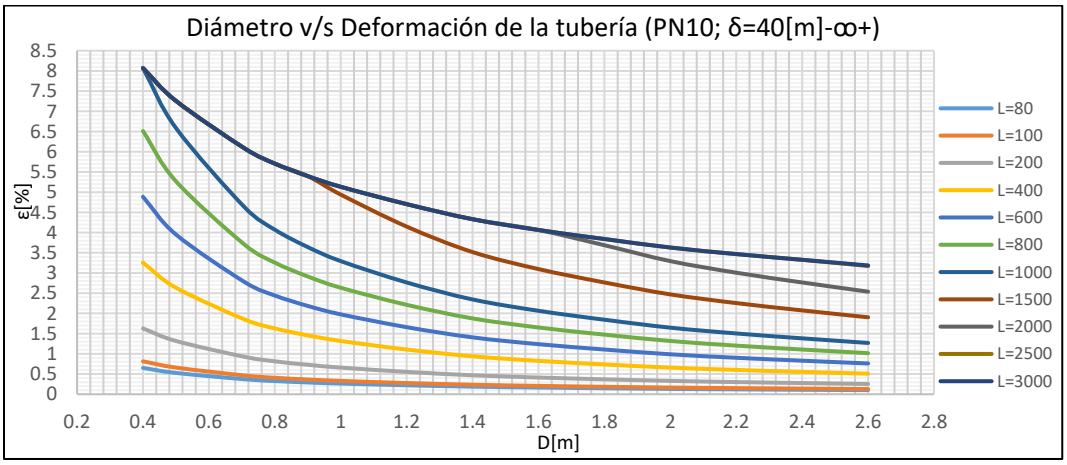


Gráfico 13-424: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN10, desplazamiento longitudinal mayor a 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

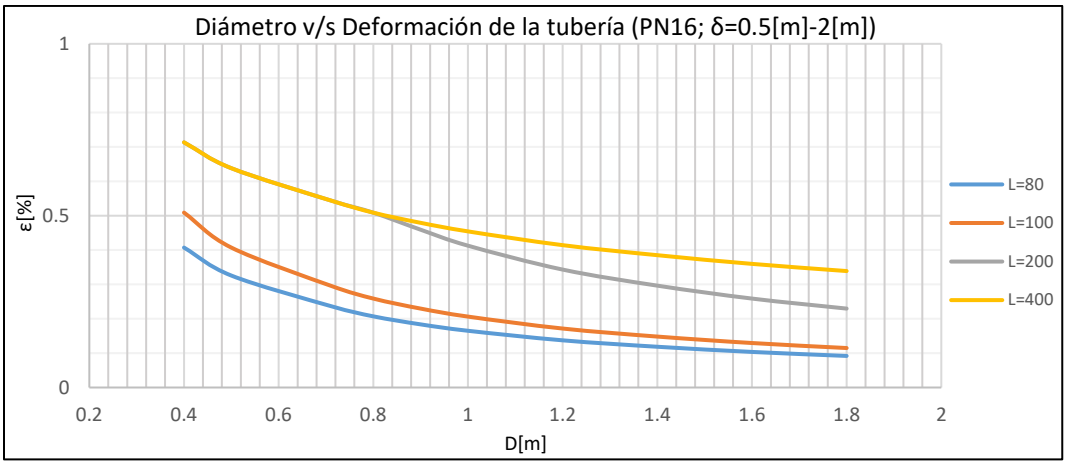


Gráfico 13-425: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

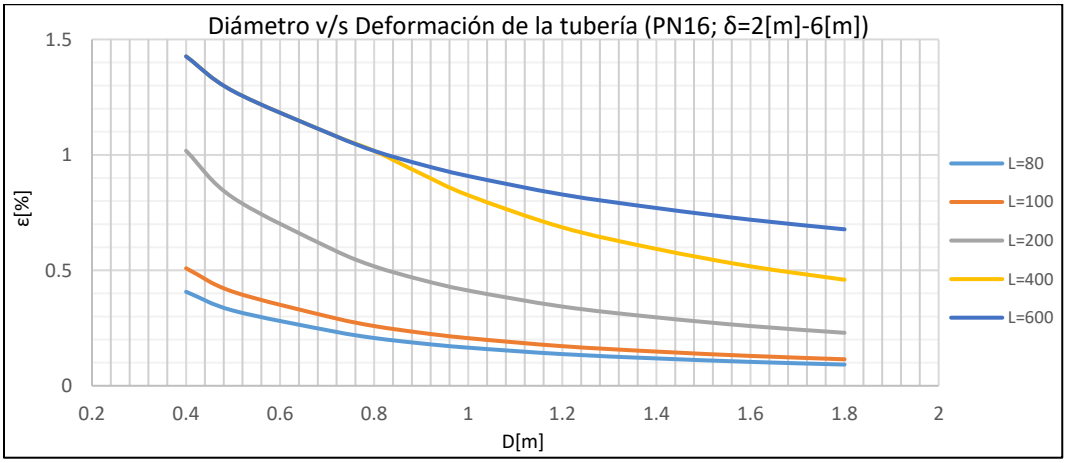


Gráfico 13-426: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

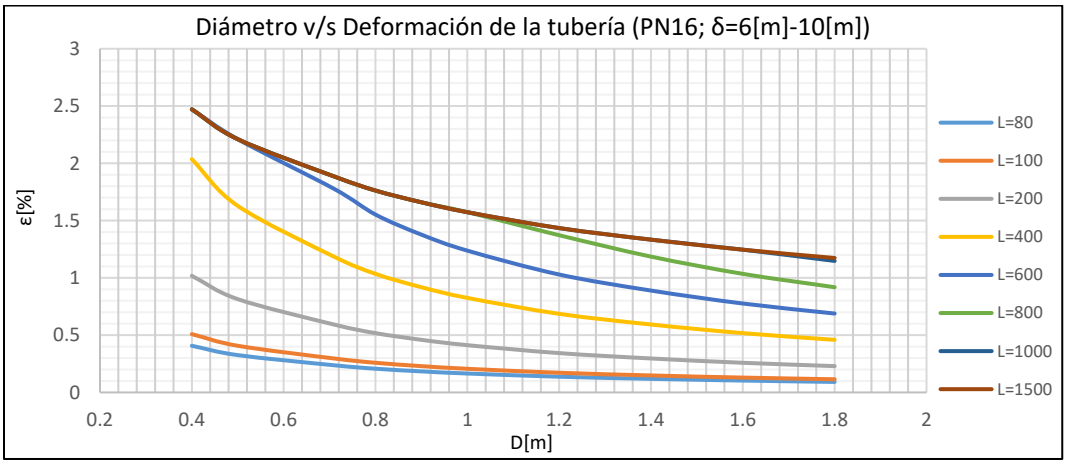


Gráfico 13-427: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

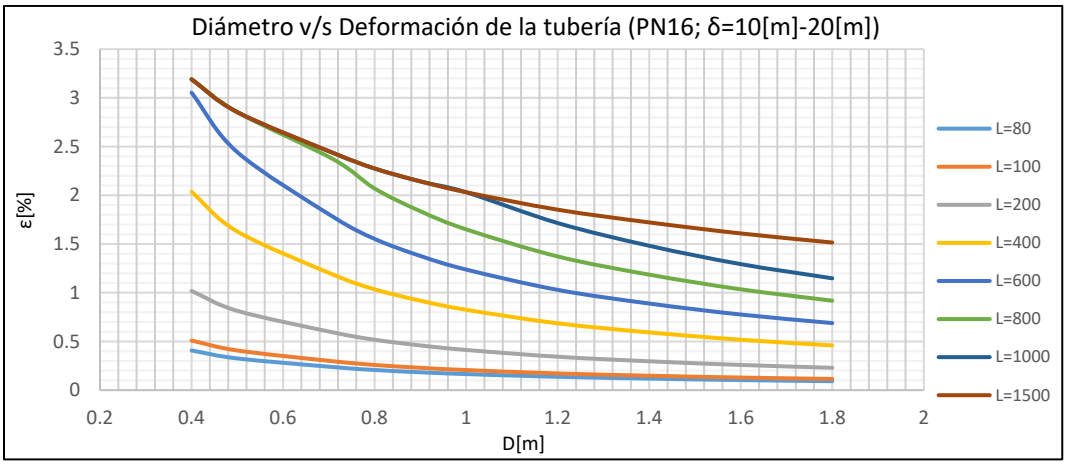


Gráfico 13-428: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

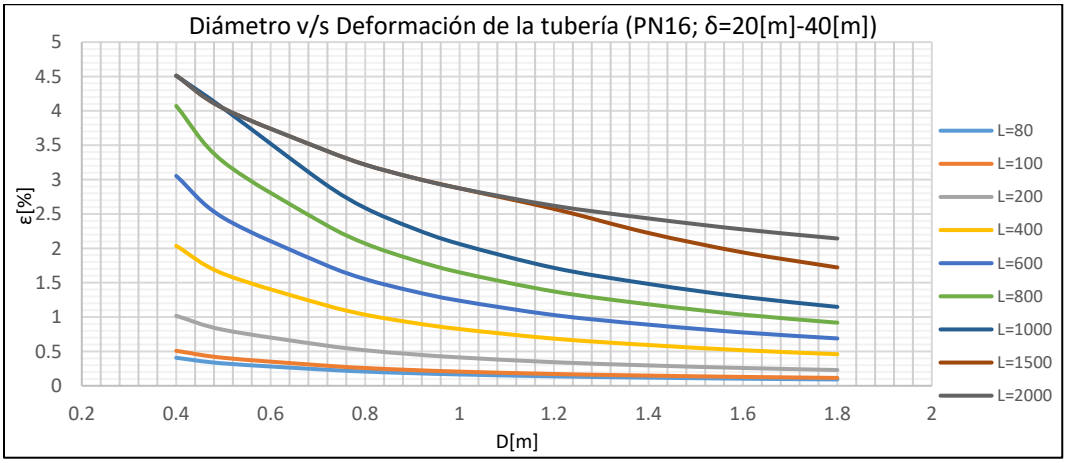


Gráfico 13-429: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal entre 20[m] y 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

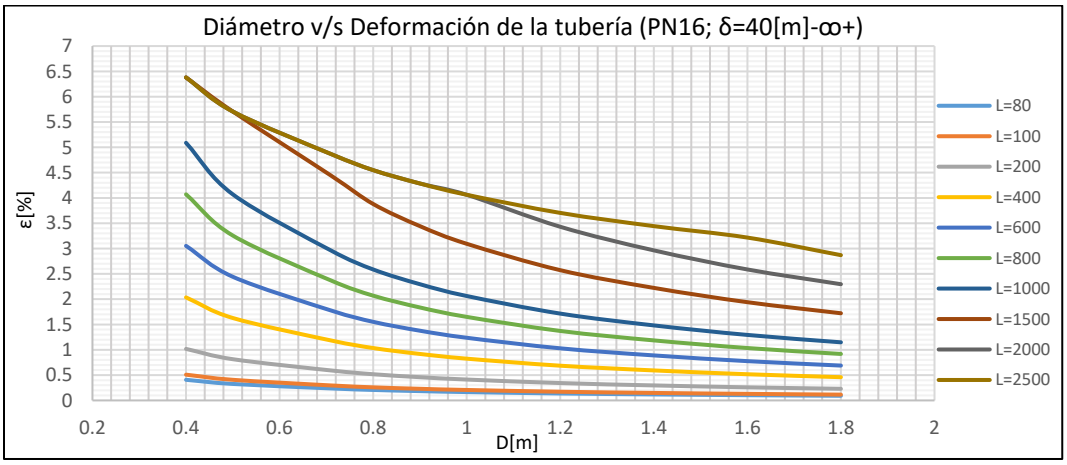


Gráfico 13-430: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN16, desplazamiento longitudinal mayor a 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

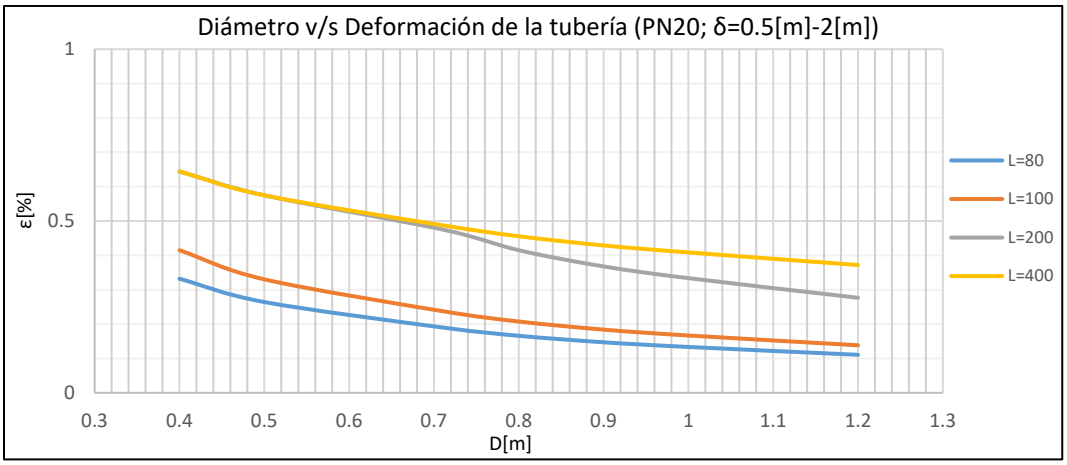


Gráfico 13-431: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

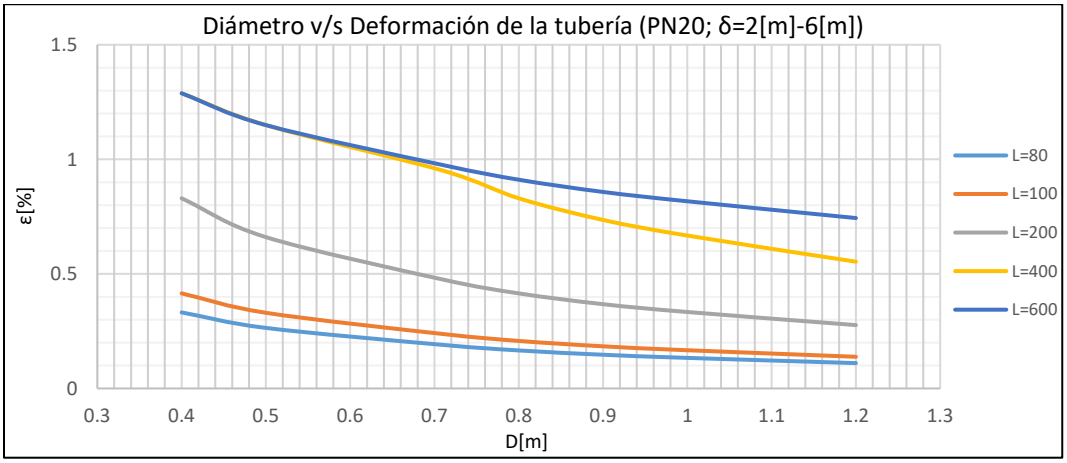


Gráfico 13-432: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

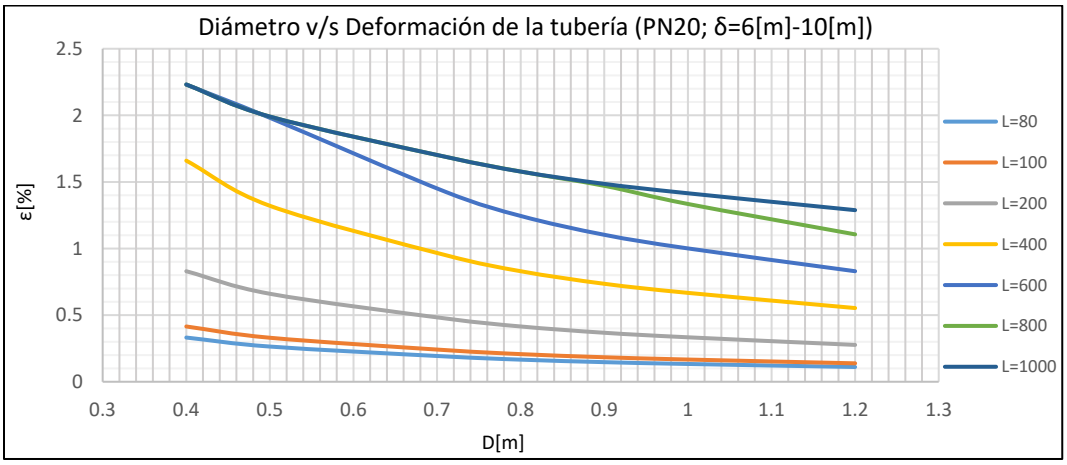


Gráfico 13-433: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

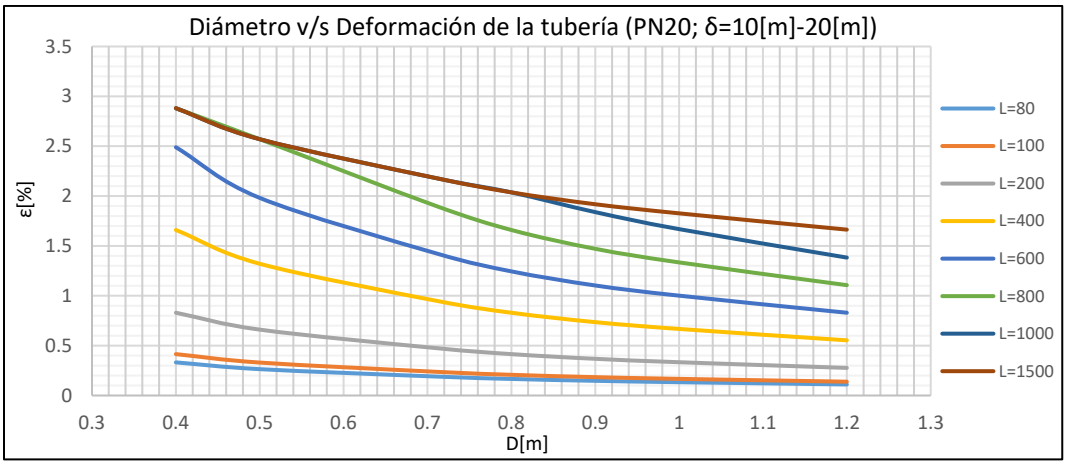


Gráfico 13-434: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

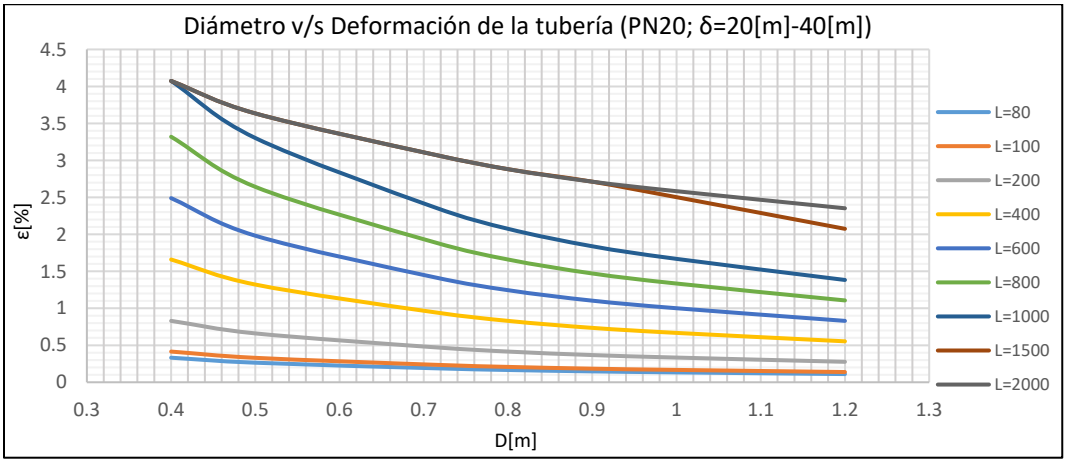


Gráfico 13-435: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal entre 20[m] y 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

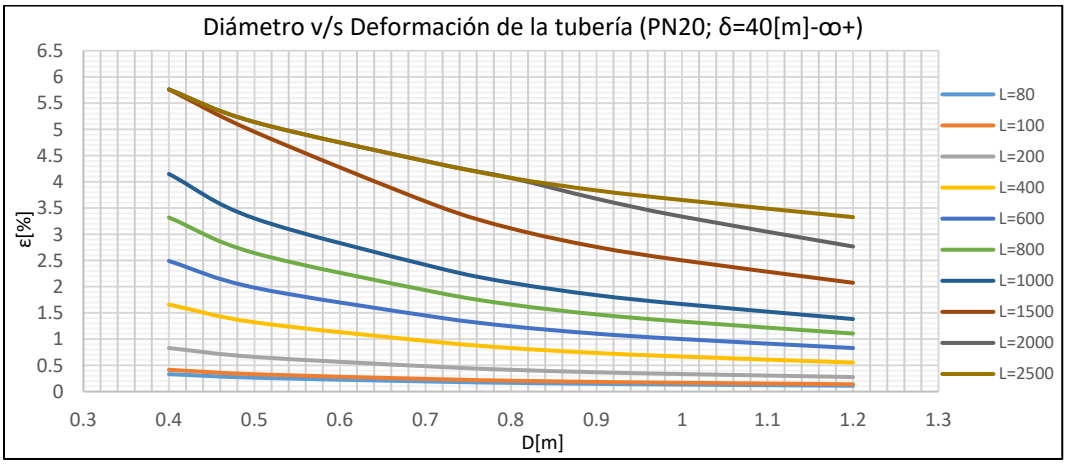


Gráfico 13-436: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN20, desplazamiento longitudinal mayor a 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

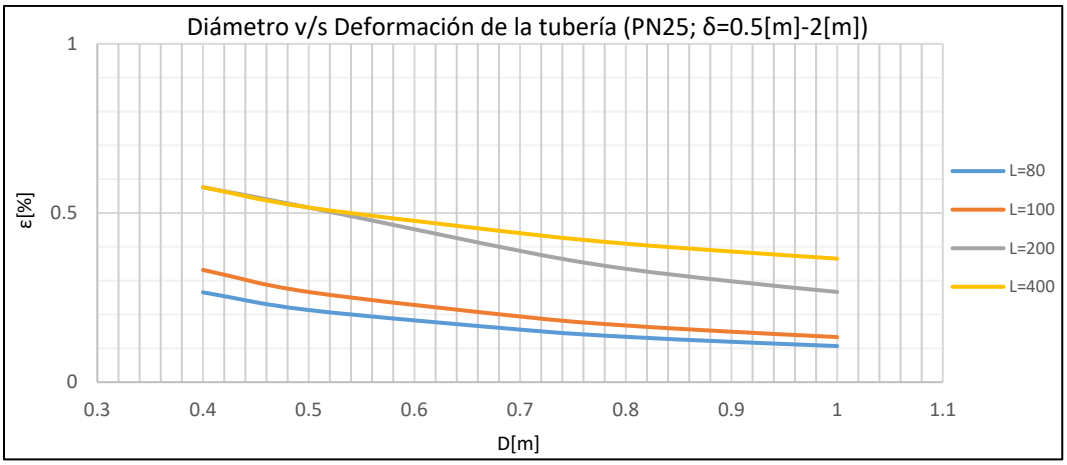


Gráfico 13-437: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

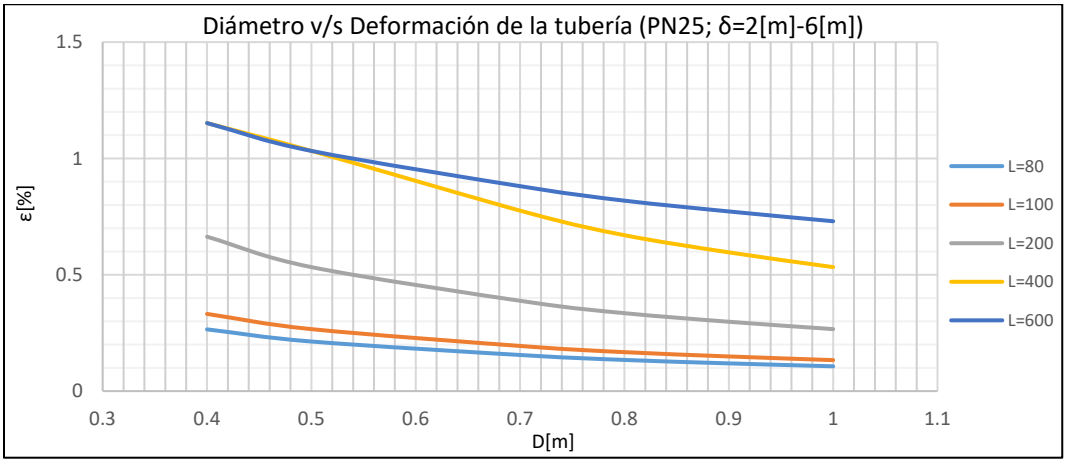


Gráfico 13-438: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

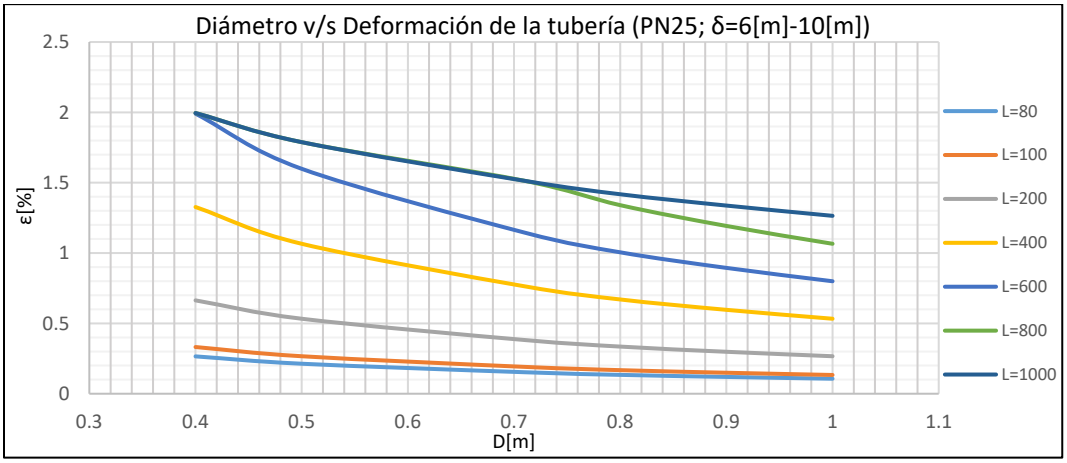


Gráfico 13-439: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

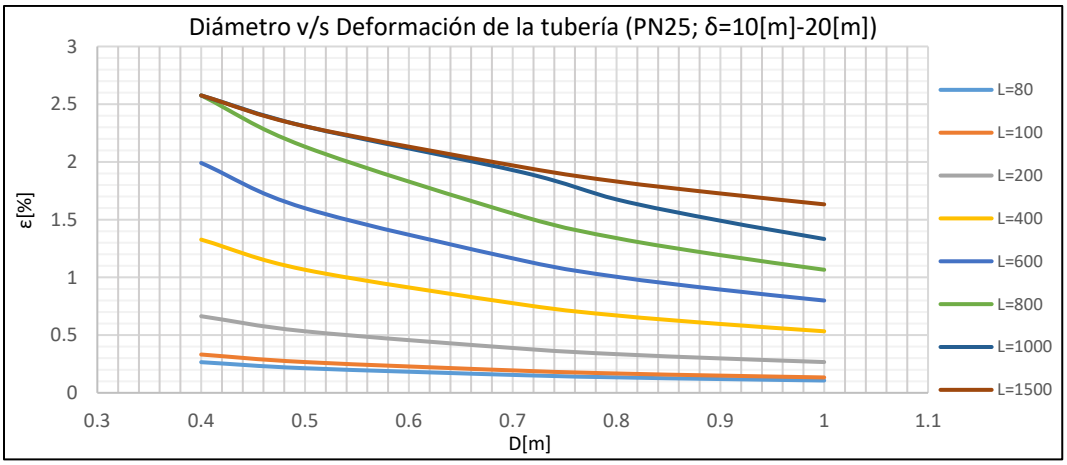


Gráfico 13-440: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

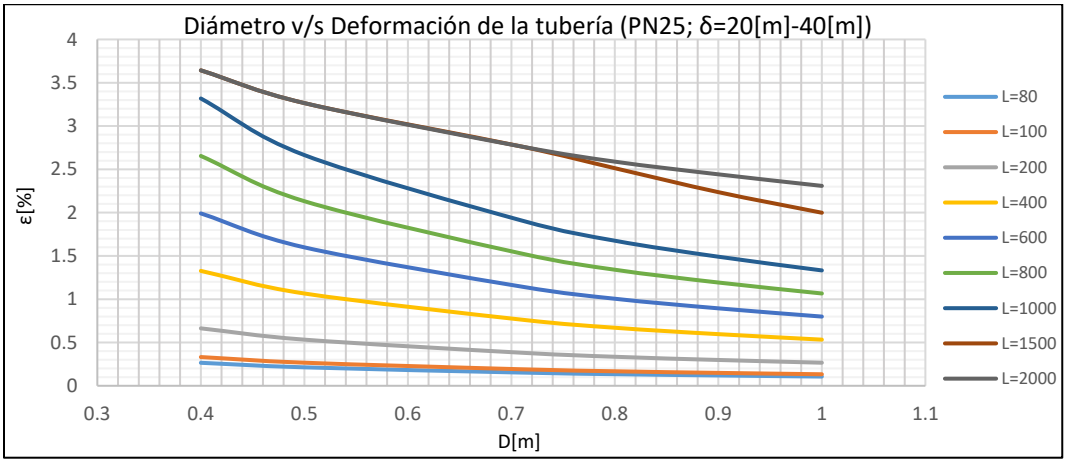


Gráfico 13-441: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal entre 20[m] y 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

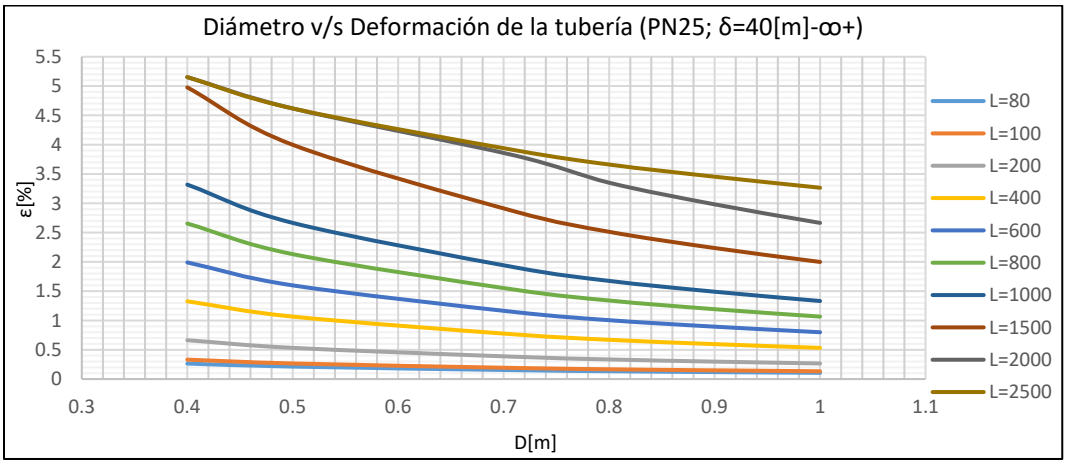


Gráfico 13-442: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN25, desplazamiento longitudinal mayor a 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

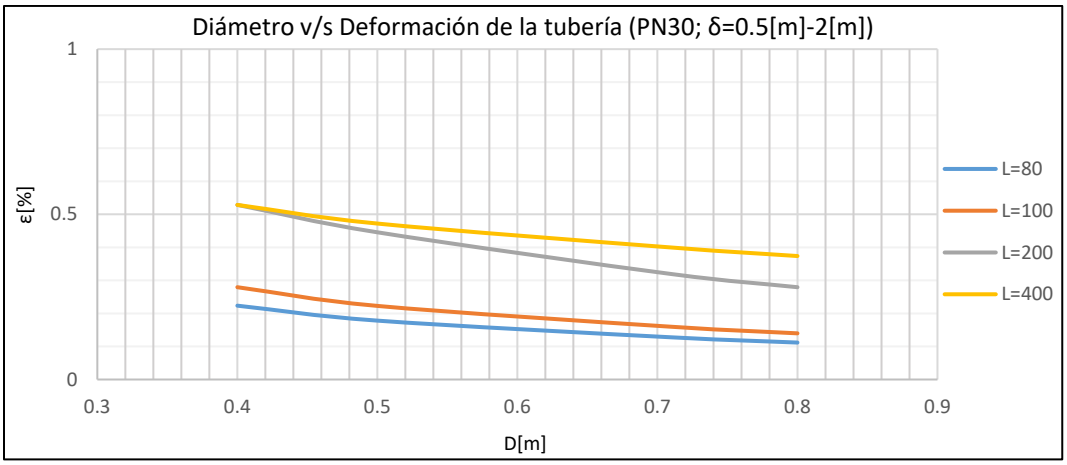


Gráfico 13-443: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

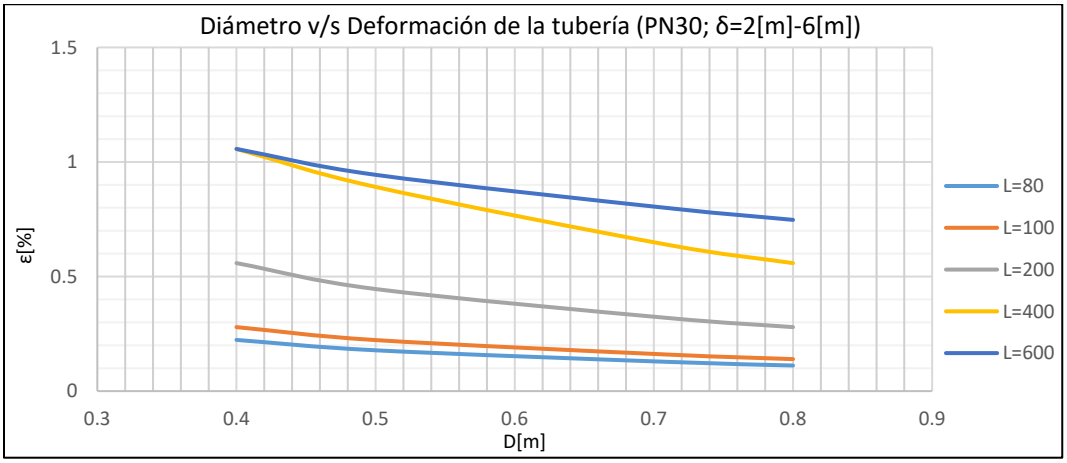


Gráfico 13-444: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

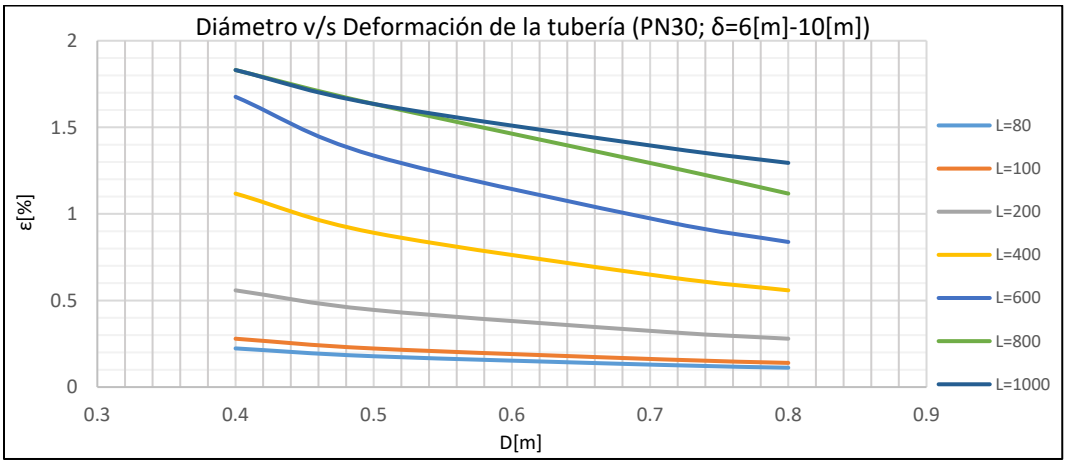


Gráfico 13-445: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 6[m] y 10[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

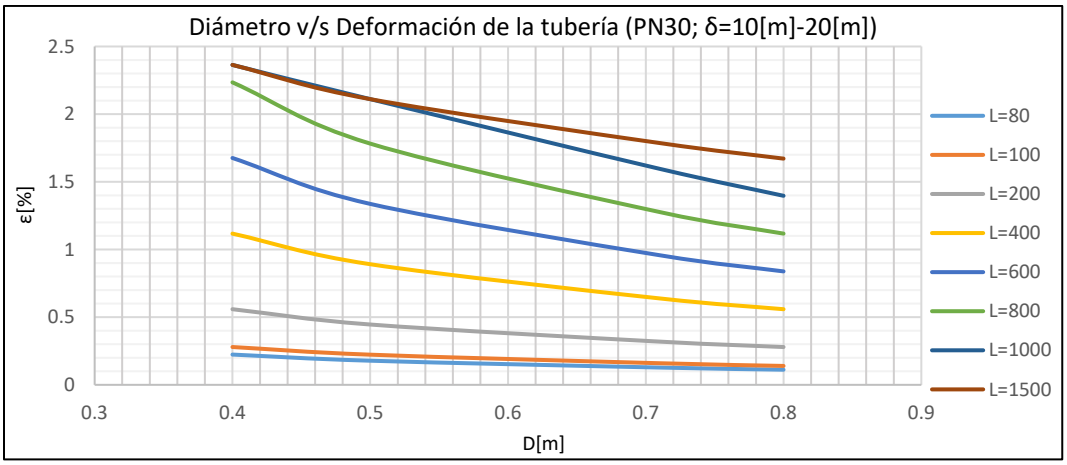


Gráfico 13-446: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 10[m] y 20[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

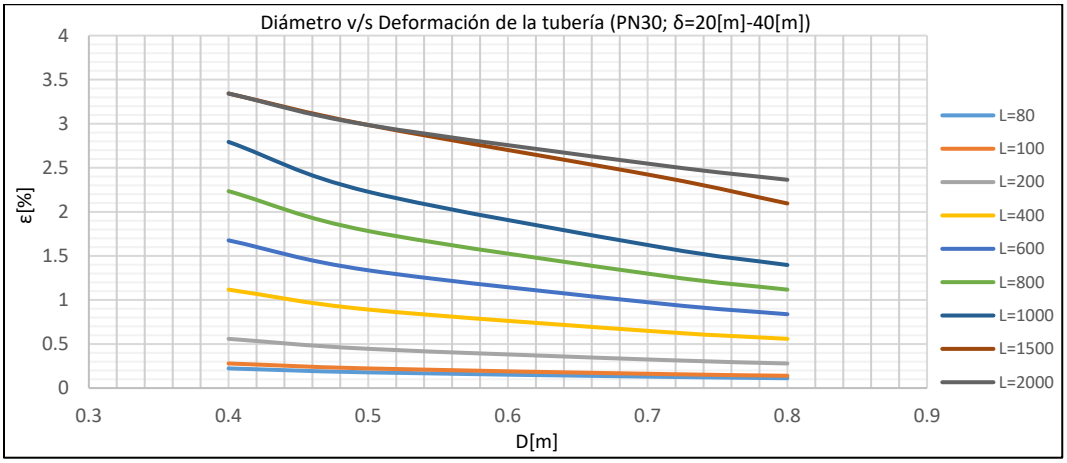


Gráfico 13-447: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal entre 20[m] y 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

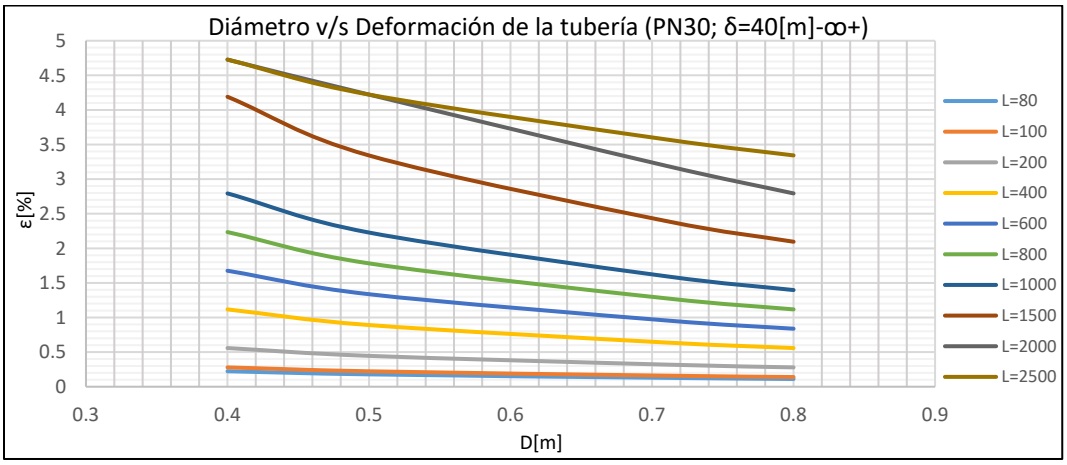


Gráfico 13-448: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de HDPE de tensión mínima PE200 Presión máxima nominal PN30, desplazamiento longitudinal mayor a 40[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

L.3. Tuberías de Hierro Dúctil

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

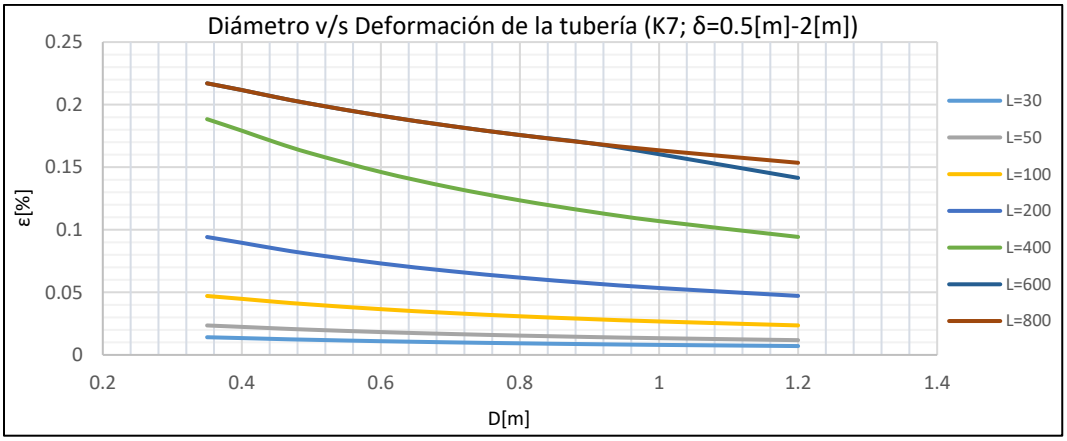


Gráfico 13-449: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

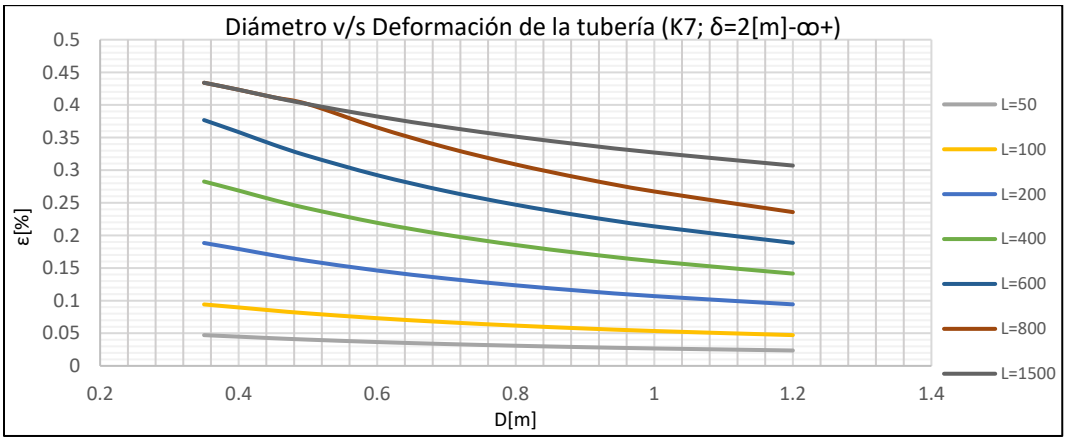


Gráfico 13-450: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo de Arena Fina.

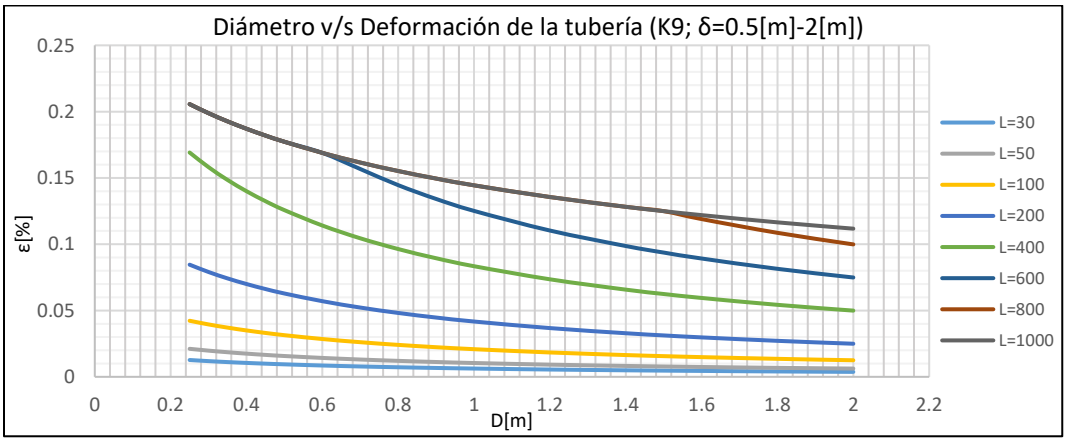


Gráfico 13-451: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena Fina.

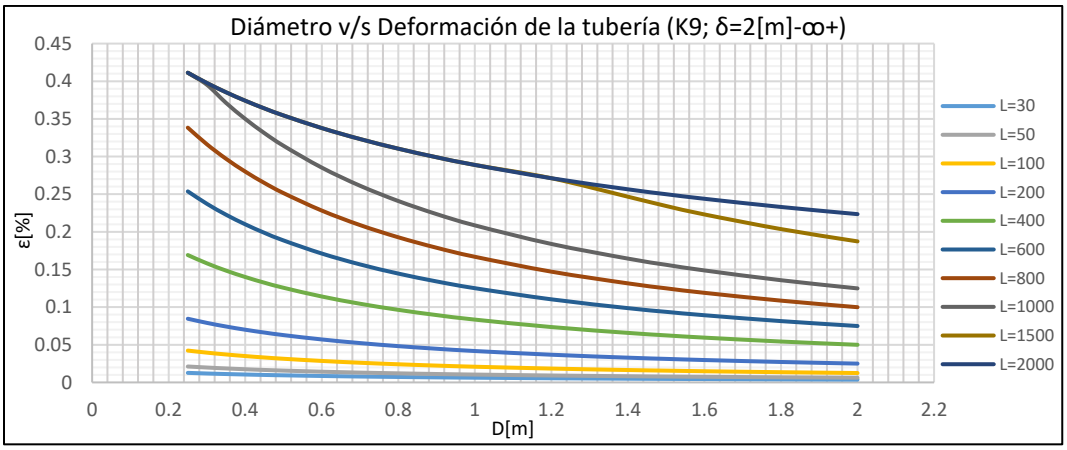


Gráfico 13-452: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

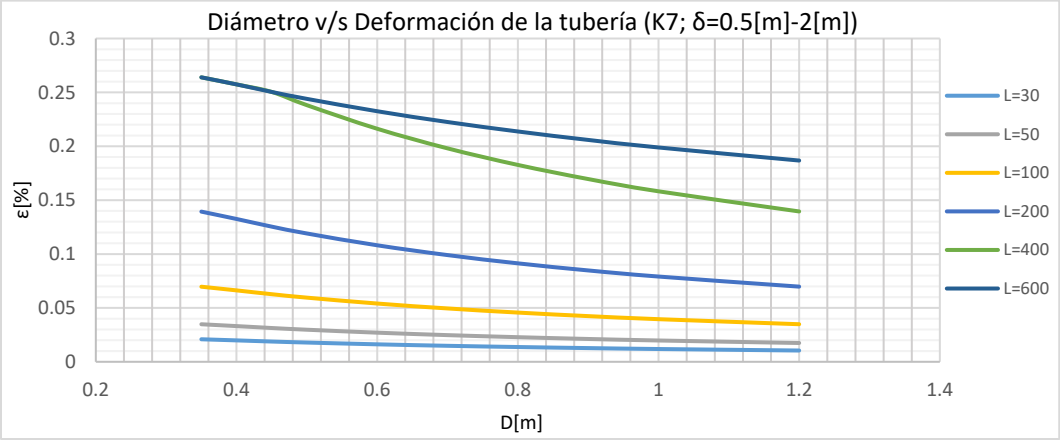


Gráfico 13-453: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

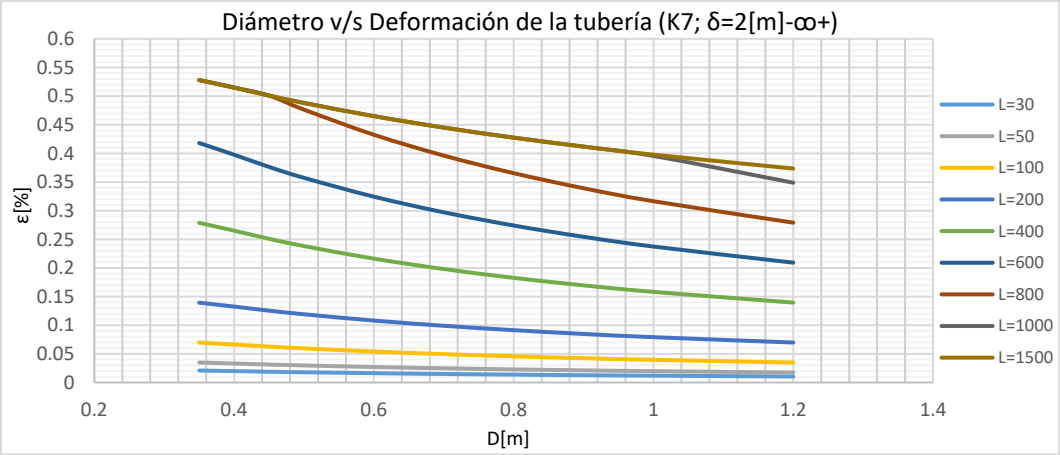


Gráfico 13-454: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo de Arena gruesa.

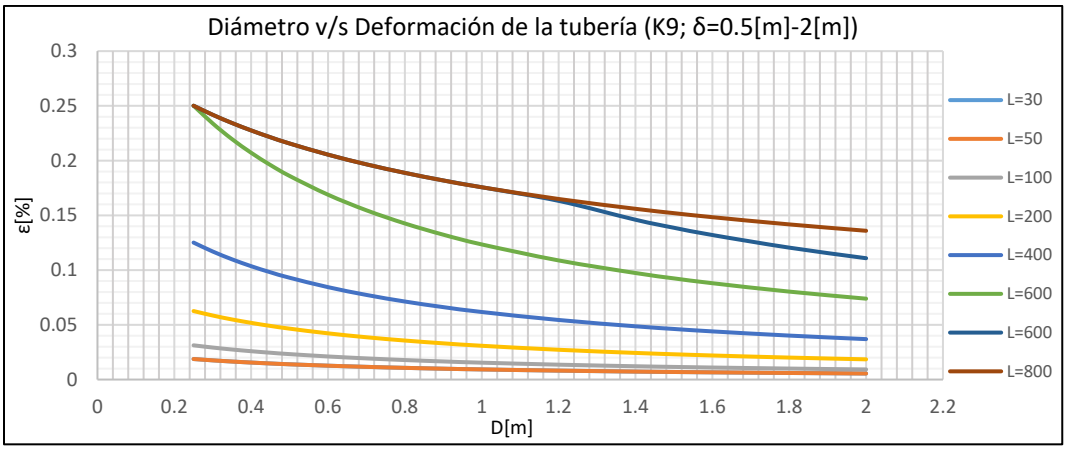


Gráfico 13-455: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo de Arena gruesa.

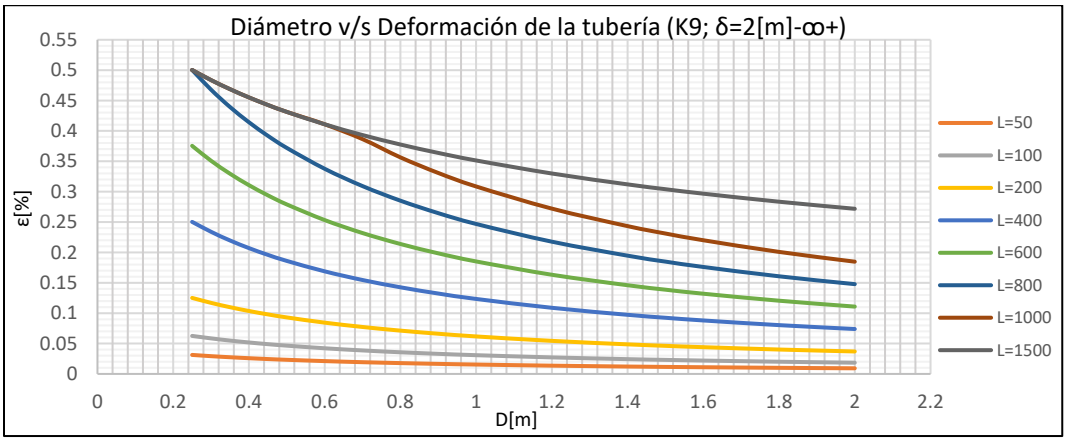


Gráfico 13-456: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

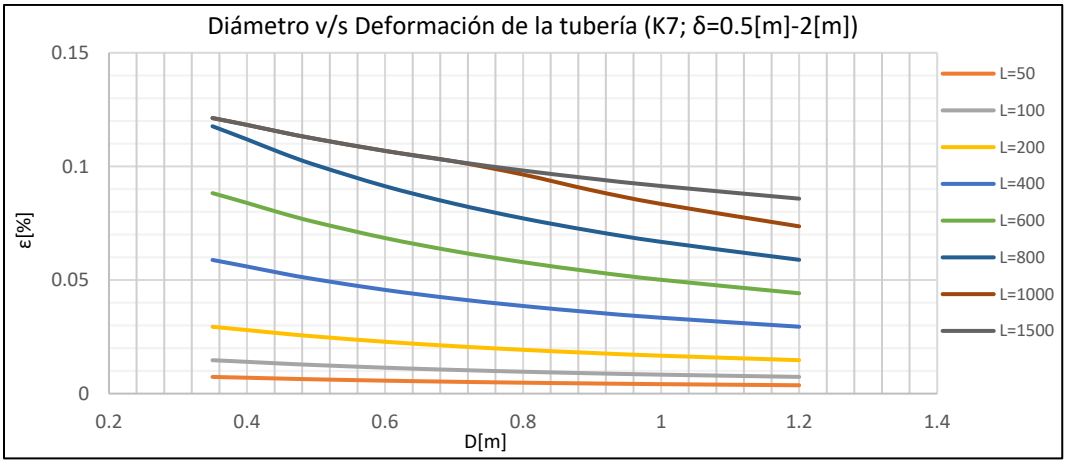


Gráfico 13-457: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

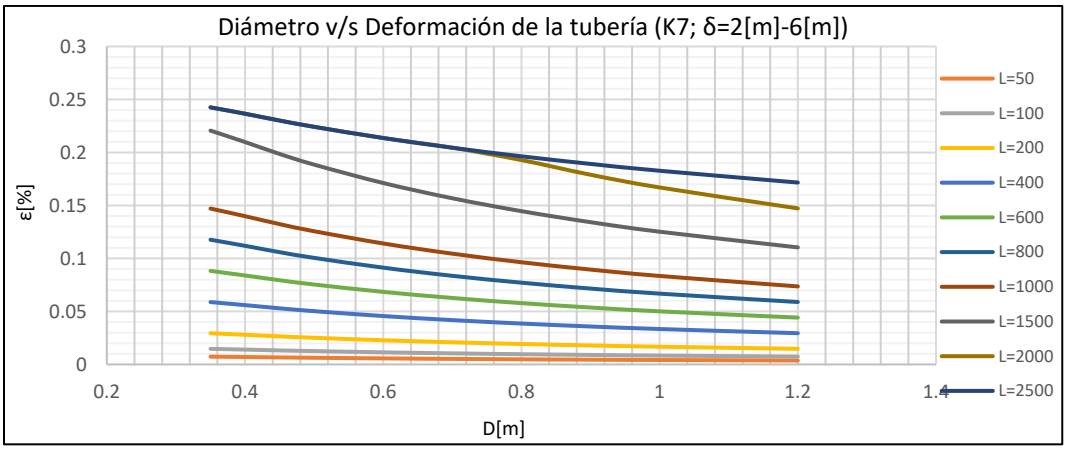


Gráfico 13-458: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

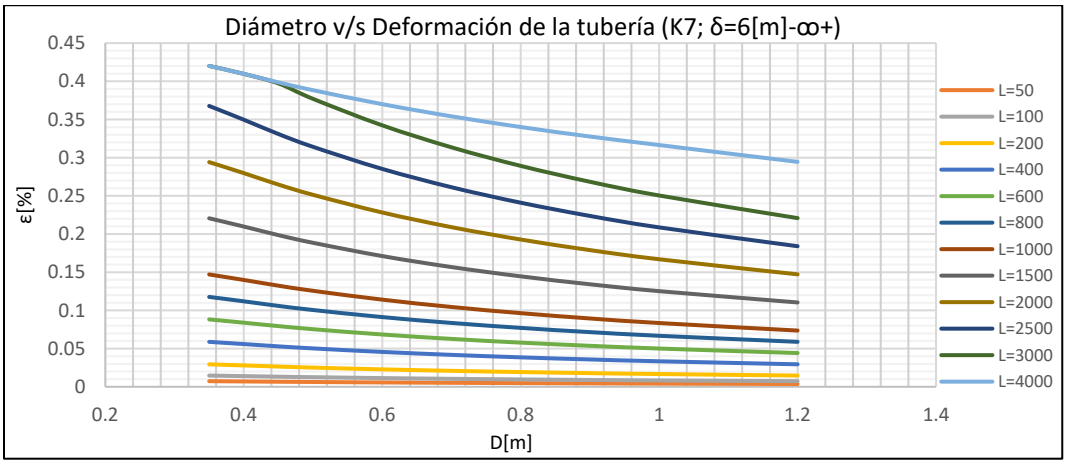


Gráfico 13-459: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

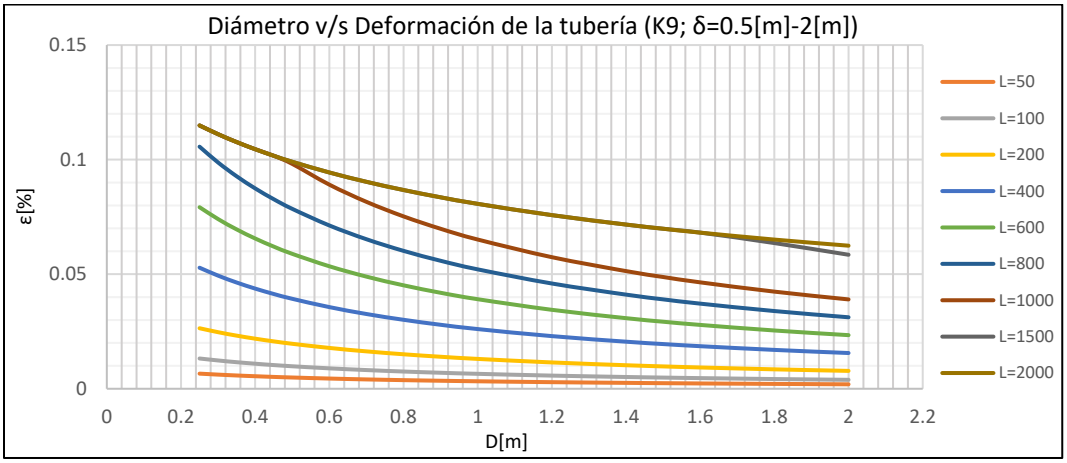


Gráfico 13-460: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

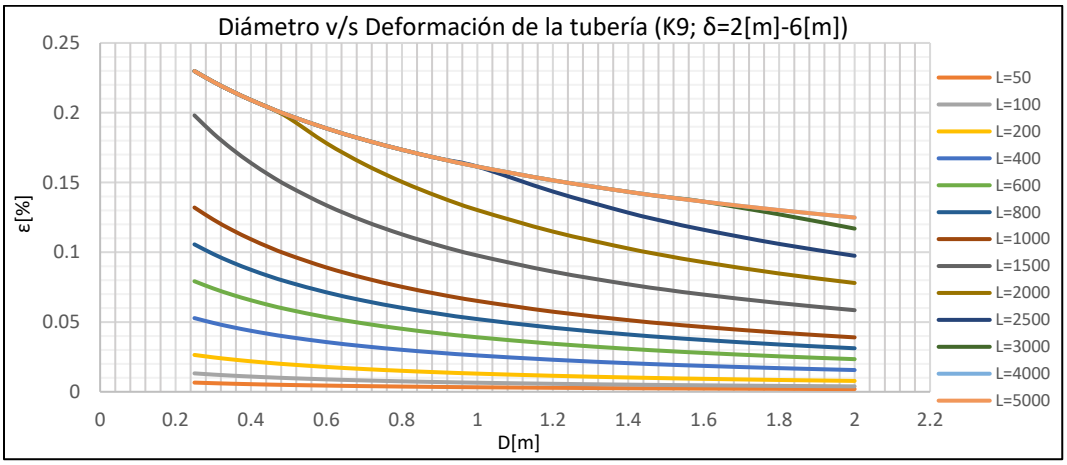


Gráfico 13-461: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal entre 2[m] y 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

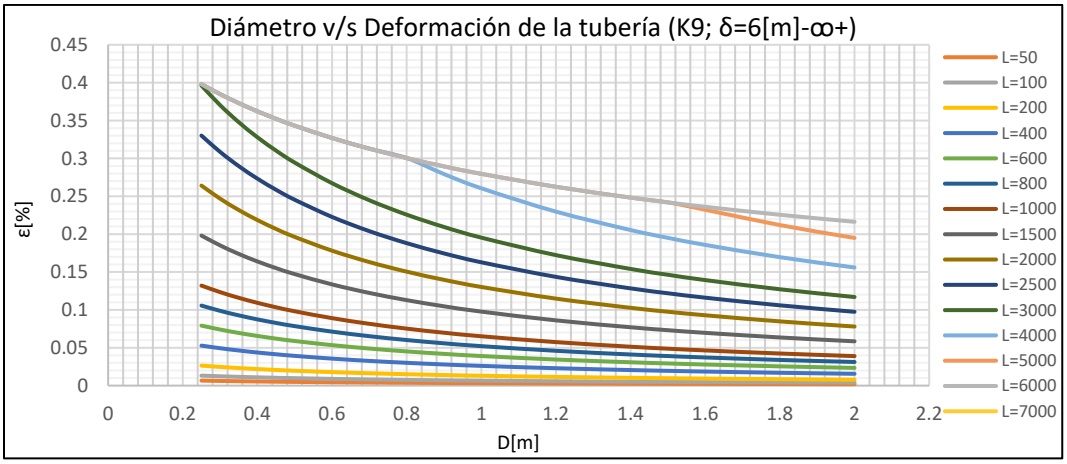


Gráfico 13-462: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, desplazamiento longitudinal mayor a 6[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

L.4. Tuberías de PVC

- **Suelo Tipo 1: Arena Fina**

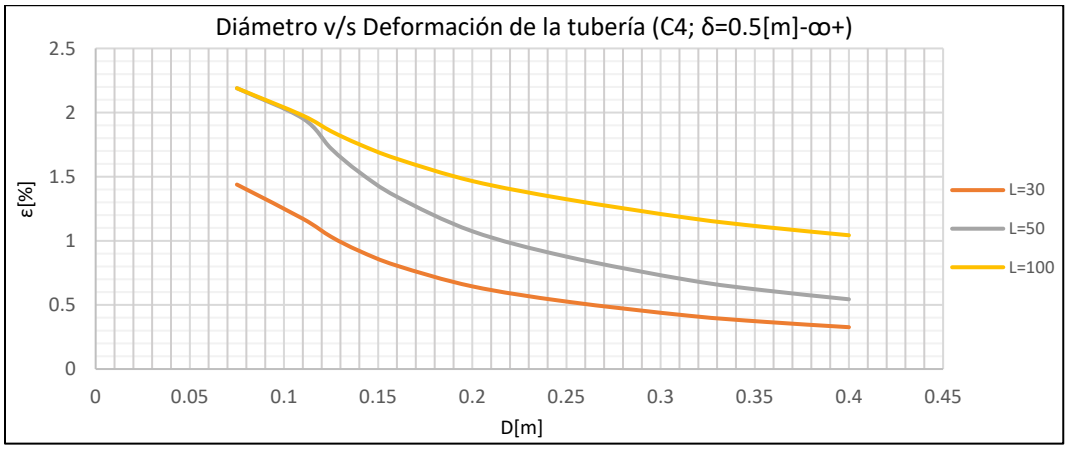


Gráfico 13-463: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C4, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena Fina.

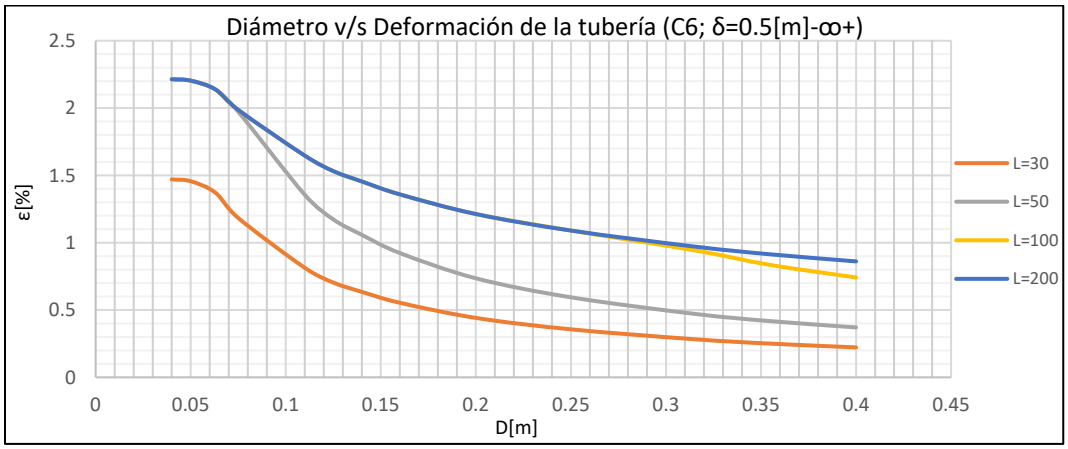


Gráfico 13-464: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C6, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena Fina.

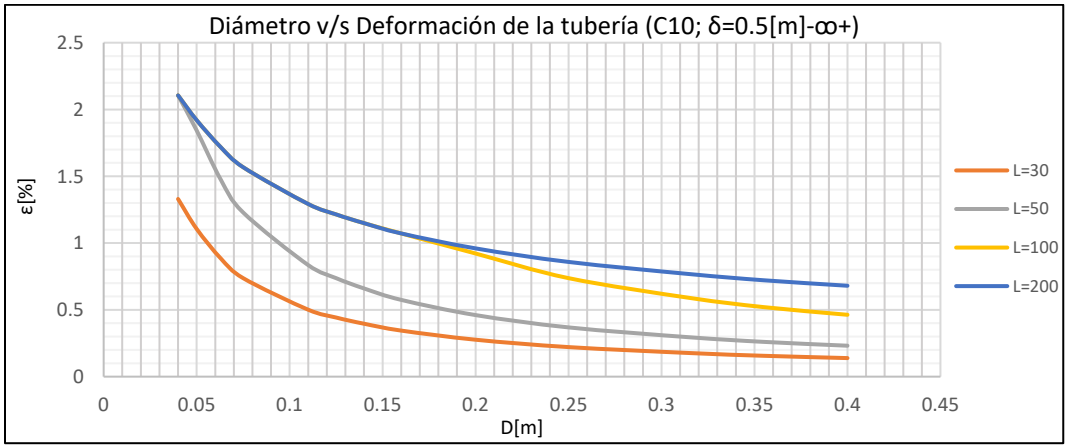


Gráfico 13-465: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C10, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena Fina.

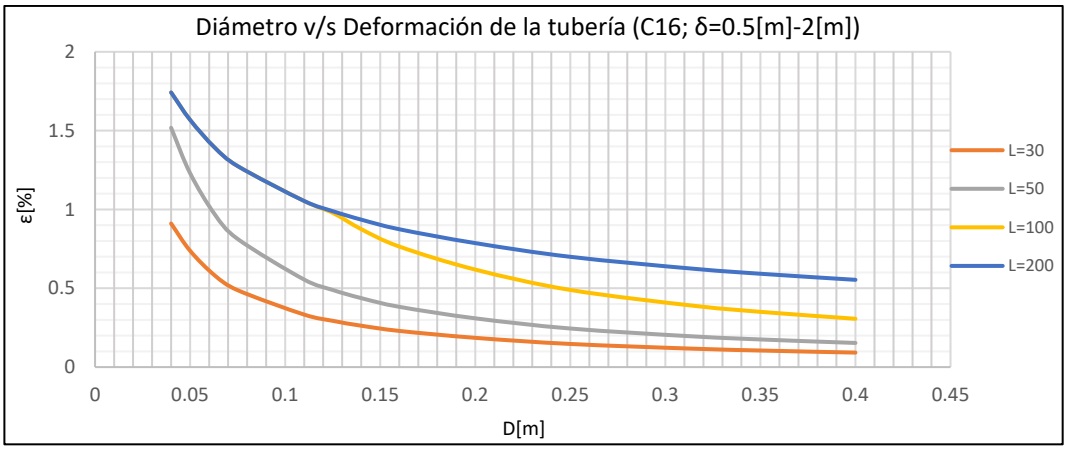


Gráfico 13-466: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C16, desplazamiento longitudinal entre 0.5 y 2[m], Suelo de Arena Fina.

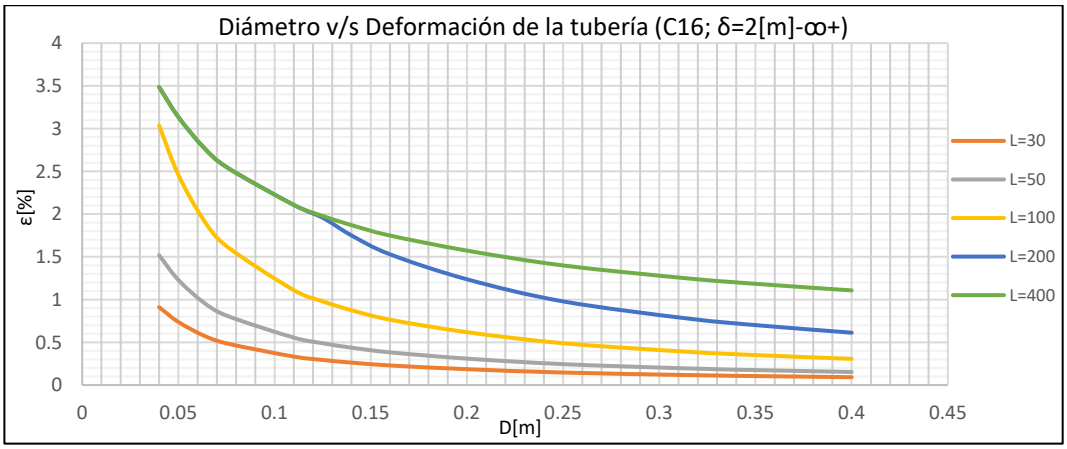


Gráfico 13-467: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C16, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo de Arena Fina.

- **Suelo Tipo 2: Arena Gruesa**

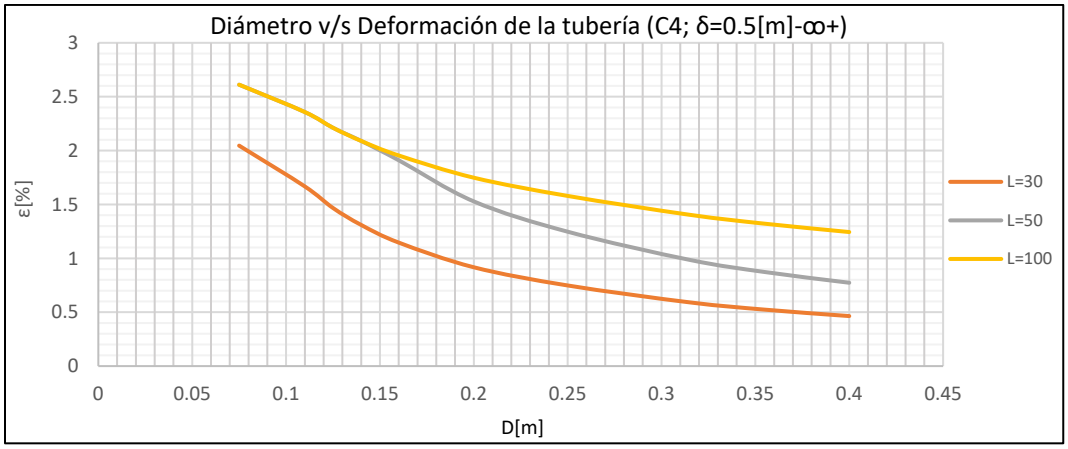


Gráfico 13-468: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C4, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena gruesa.

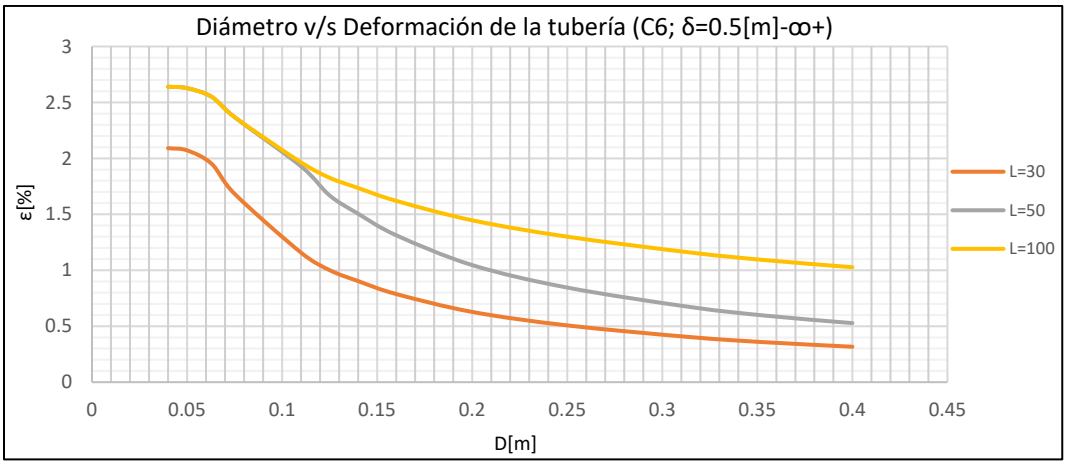


Gráfico 13-469: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C6, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena gruesa.

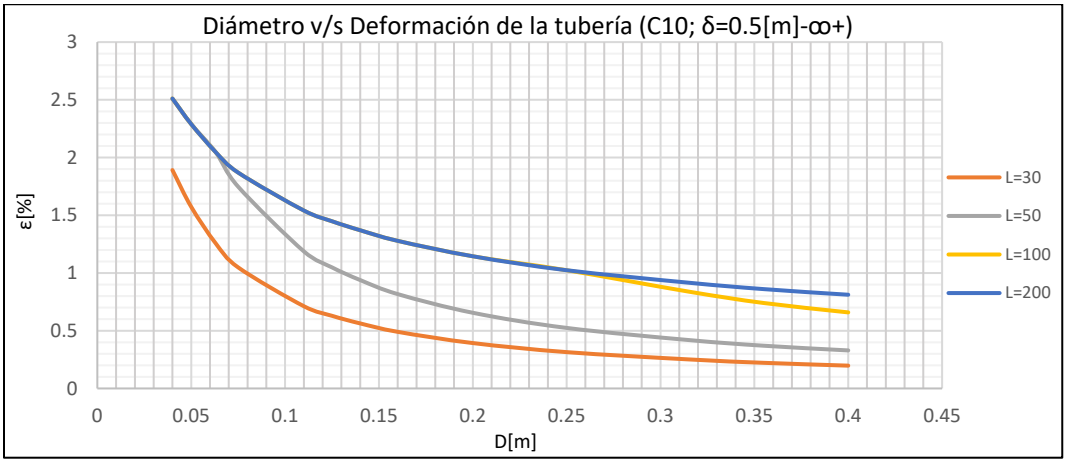


Gráfico 13-470: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C10, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena gruesa.

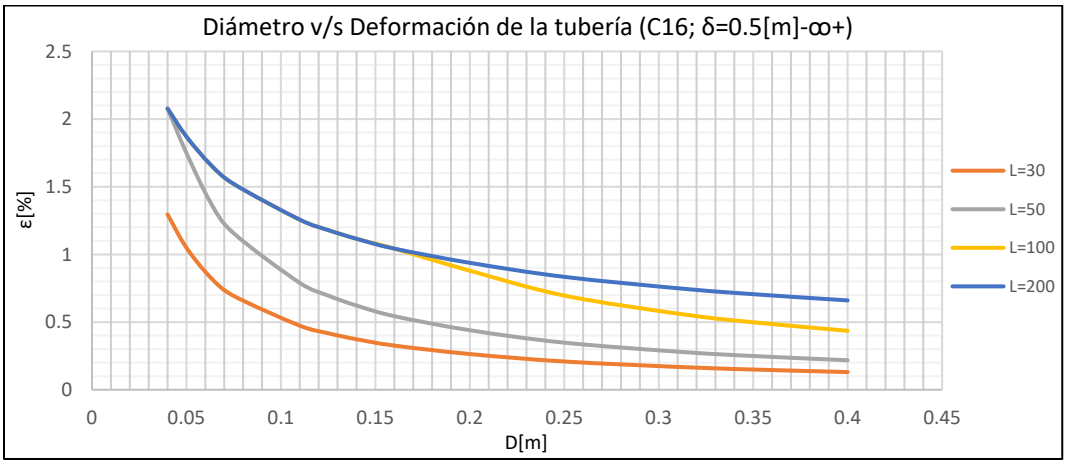


Gráfico 13-471: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C16, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo de Arena gruesa.

- **Suelo Tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

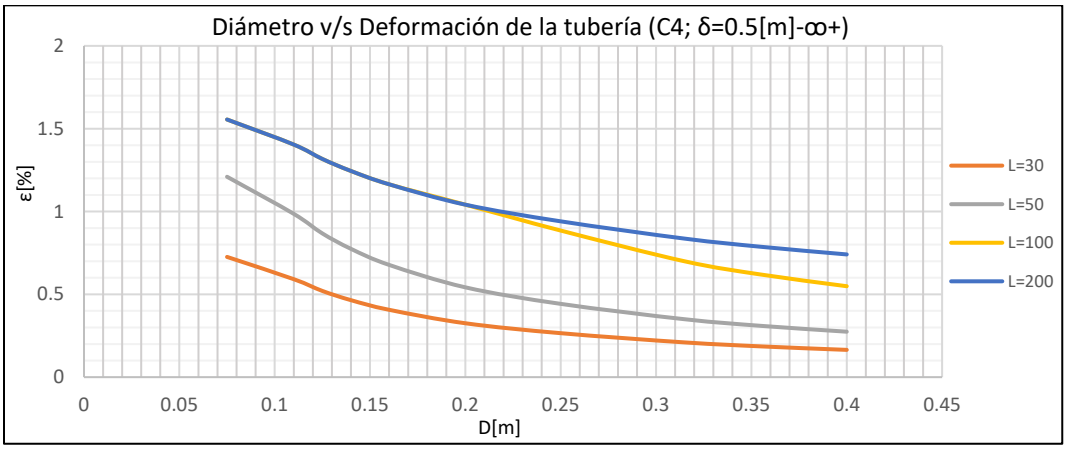


Gráfico 13-472: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C4, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

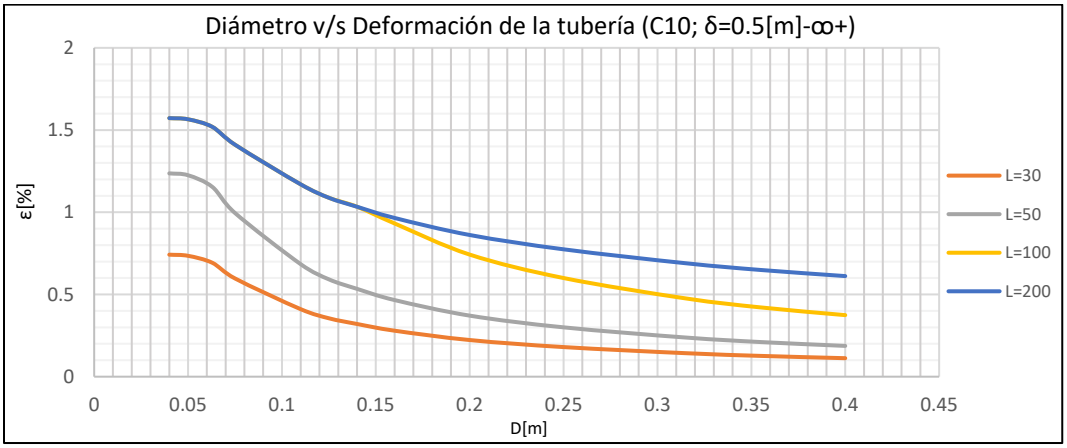


Gráfico 13-473: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C10, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

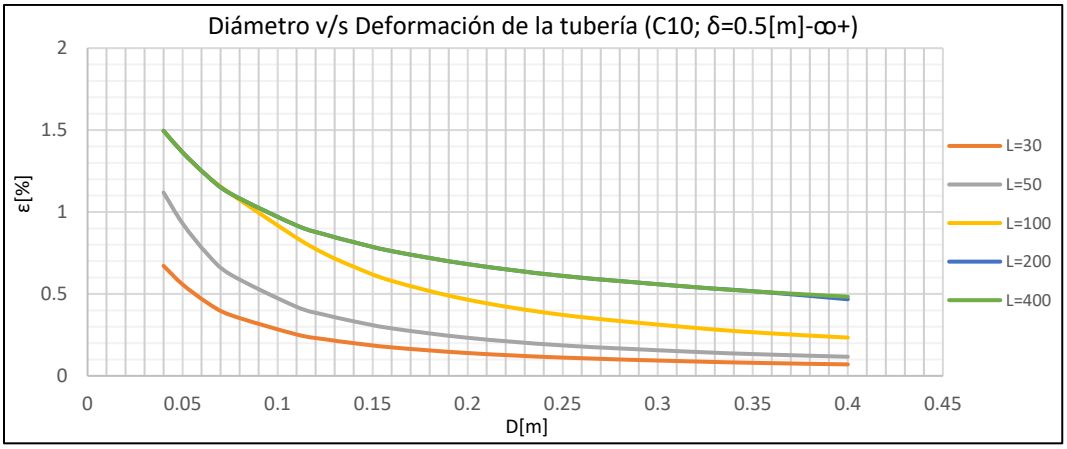


Gráfico 13-474: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C10, desplazamiento longitudinal mayor a 0.5[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

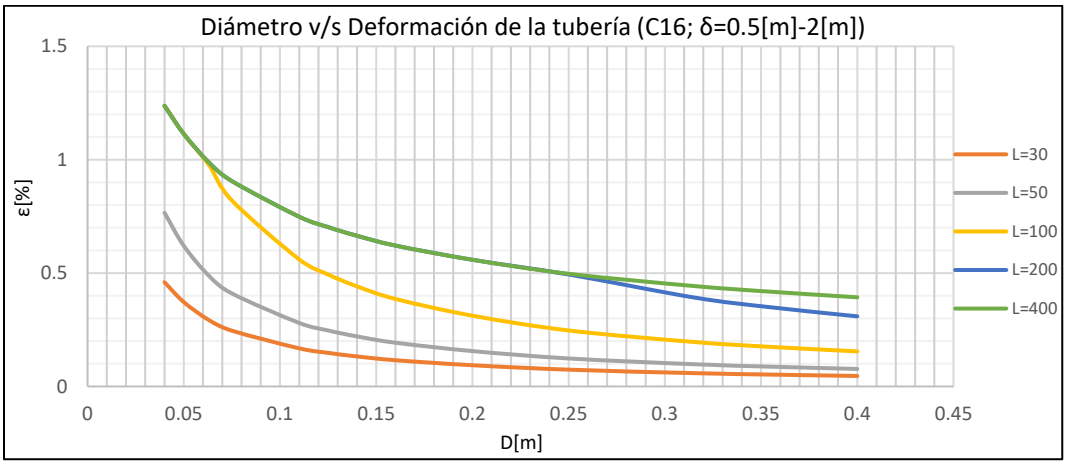


Gráfico 13-475: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C16, desplazamiento longitudinal entre 0.5[m] y 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

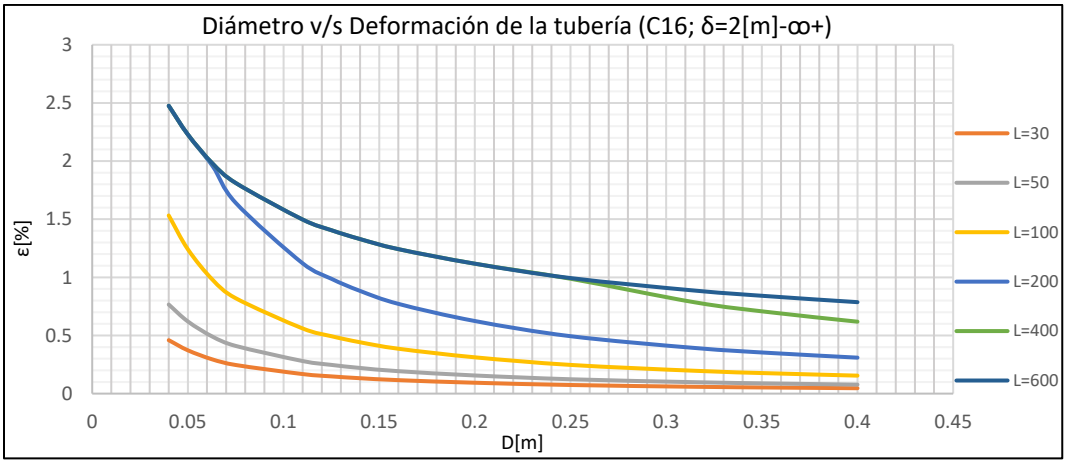


Gráfico 13-476: Diámetro v/s Deformación de la tubería, Tubería de PVC, Presión máxima nominal C16, desplazamiento longitudinal mayor a 2[m], Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

M. Separación de Unión debido a DPS transversal

M.1. Tuberías de Hierro Dúctil

- **Tipo de suelo 1: Arena Fina**

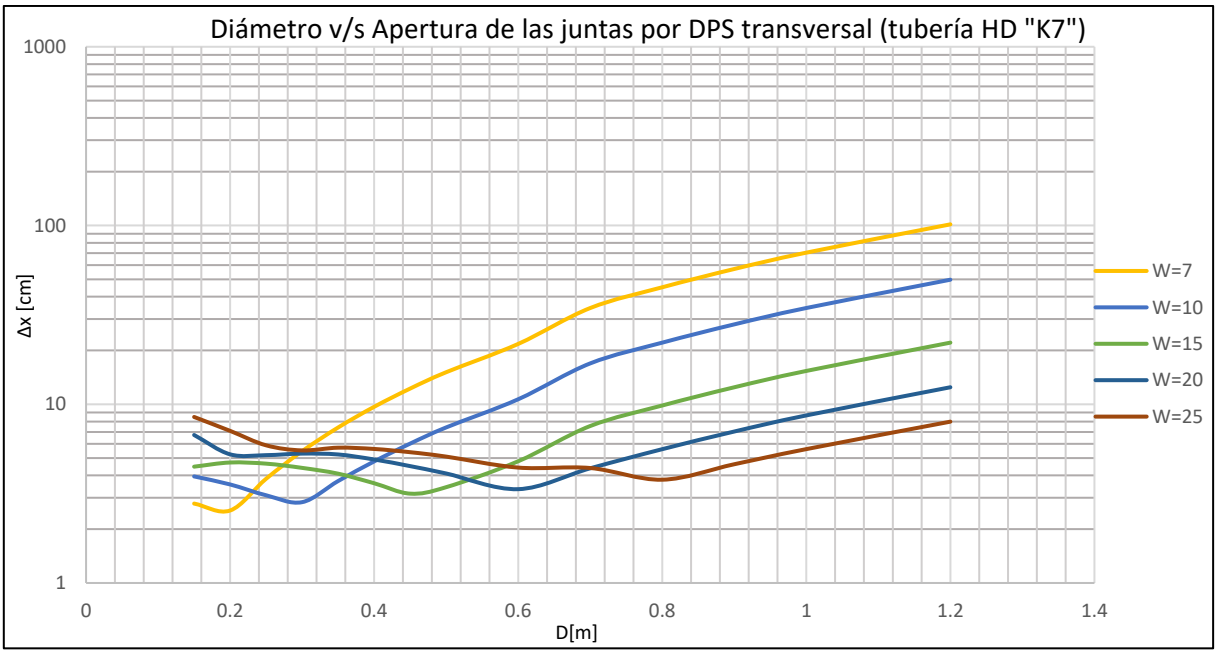


Gráfico 13-477: Diámetro v/s Apertura de junta por DPS transversal, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, Suelo de Arena Fina.

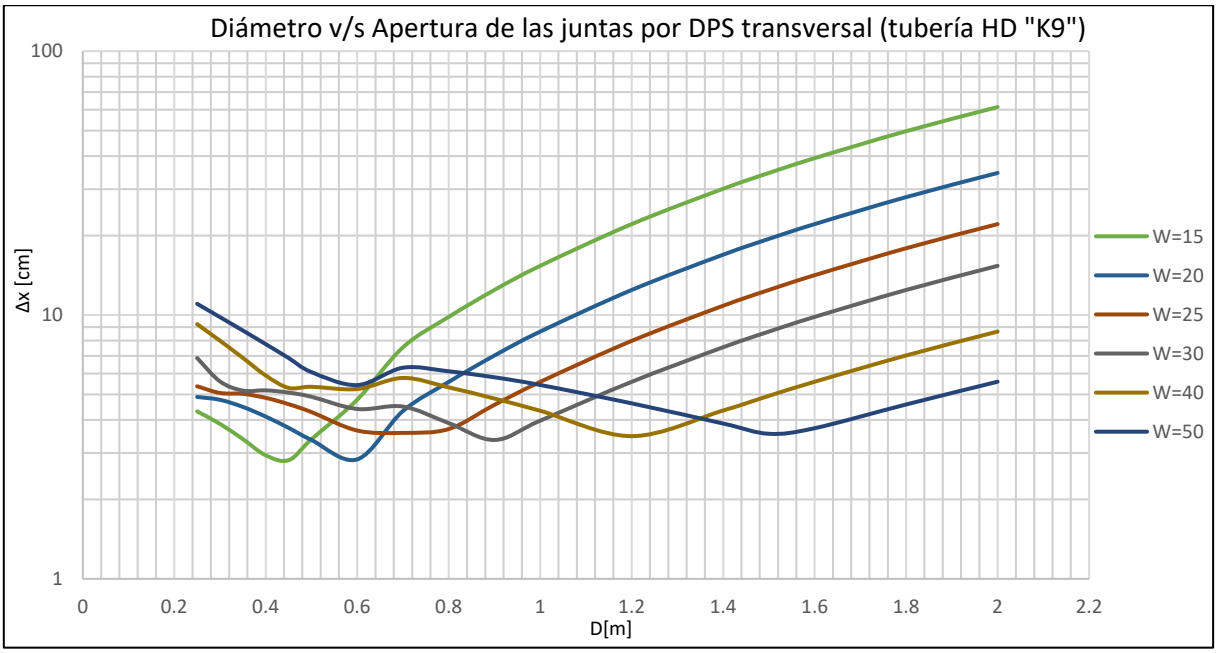


Gráfico 13-478: Diámetro v/s Apertura de junta por DPS transversal, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, Suelo de Arena Fina.

- **Tipo de suelo 2: Arena Gruesa**

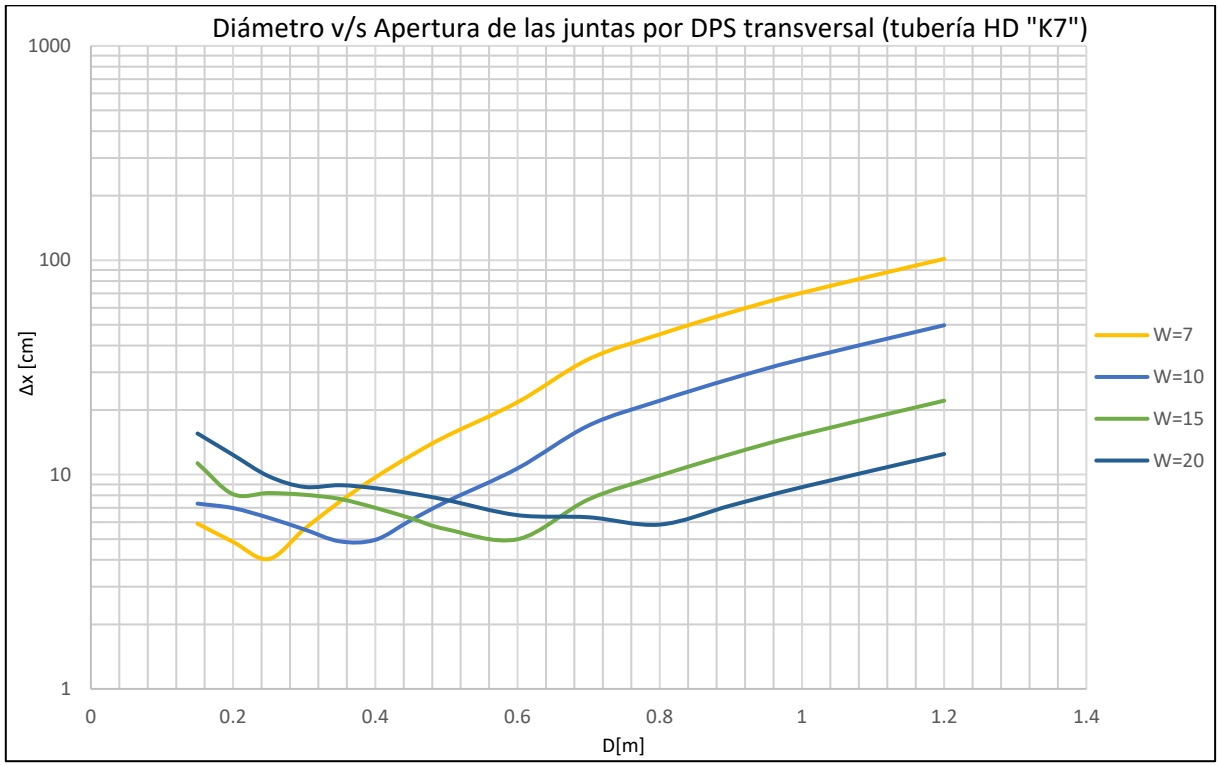


Gráfico 13-479: Diámetro v/s Apertura de junta por DPS transversal, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, Suelo de Arena Gruesa.

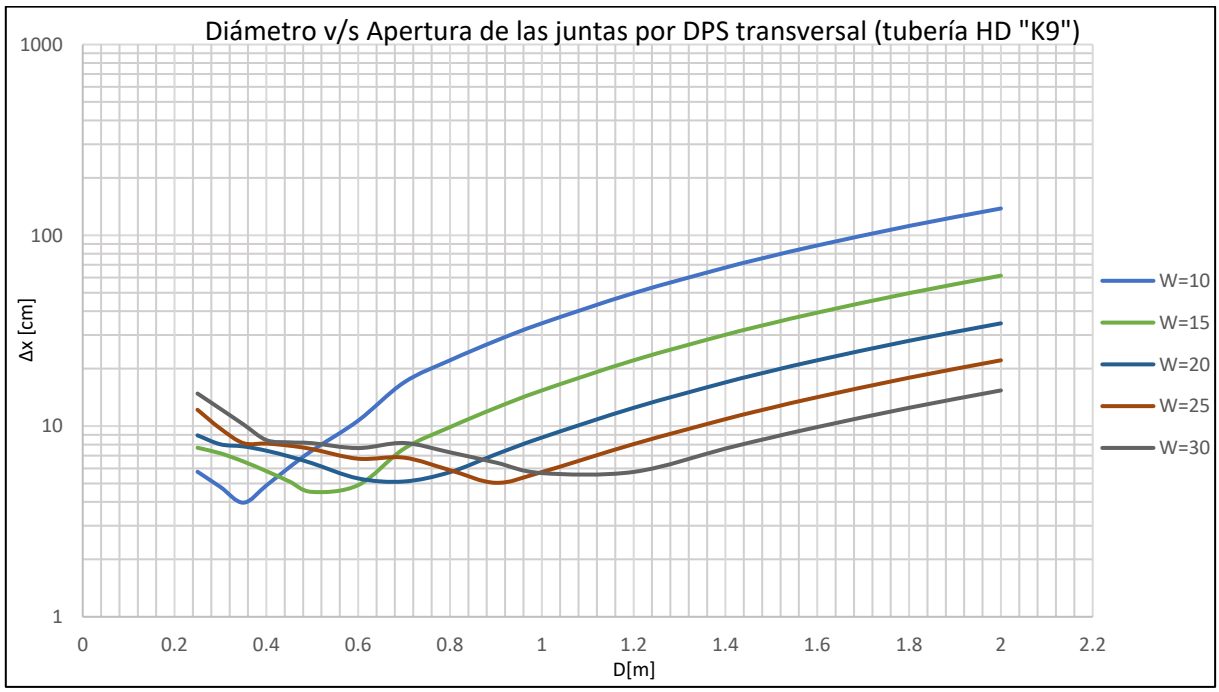


Gráfico 13-480: Diámetro v/s Apertura de junta por DPS transversal, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, Suelo de Arena Gruesa.

- **Suelo tipo 3: Limo de Baja Plasticidad**

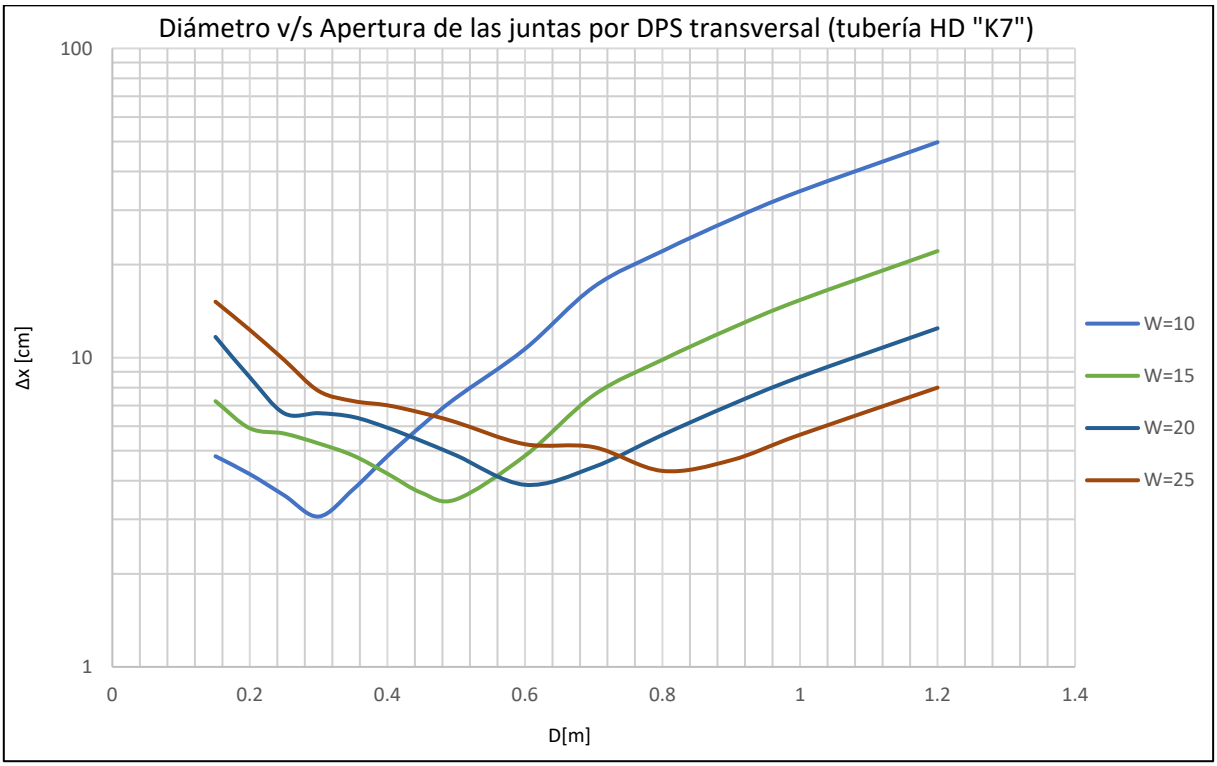


Gráfico 13-481: Diámetro v/s Apertura de junta por DPS transversal, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K7, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

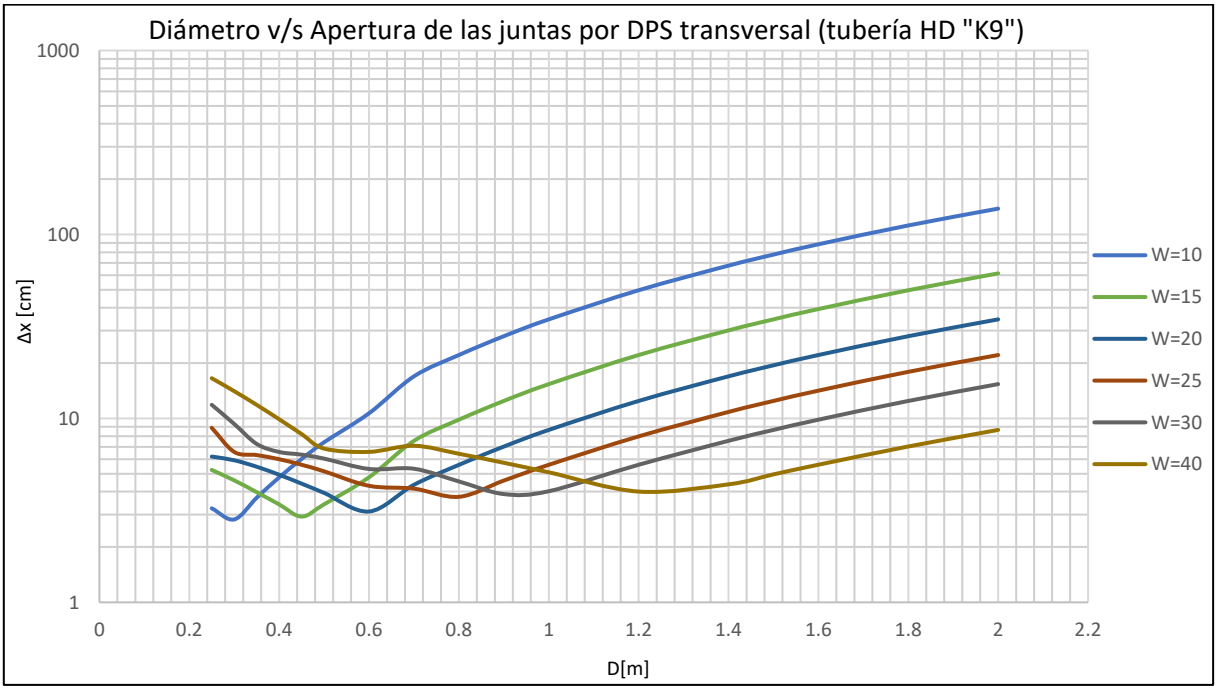


Gráfico 13-482: Diámetro v/s Apertura de junta por DPS transversal, Tubería de Hierro Dúctil, Presión máxima nominal K9, Suelo Limoso de Baja Plasticidad.

N. Separación de Unión debido a DPS longitudinal

N.1. Tuberías de Hierro Dúctil

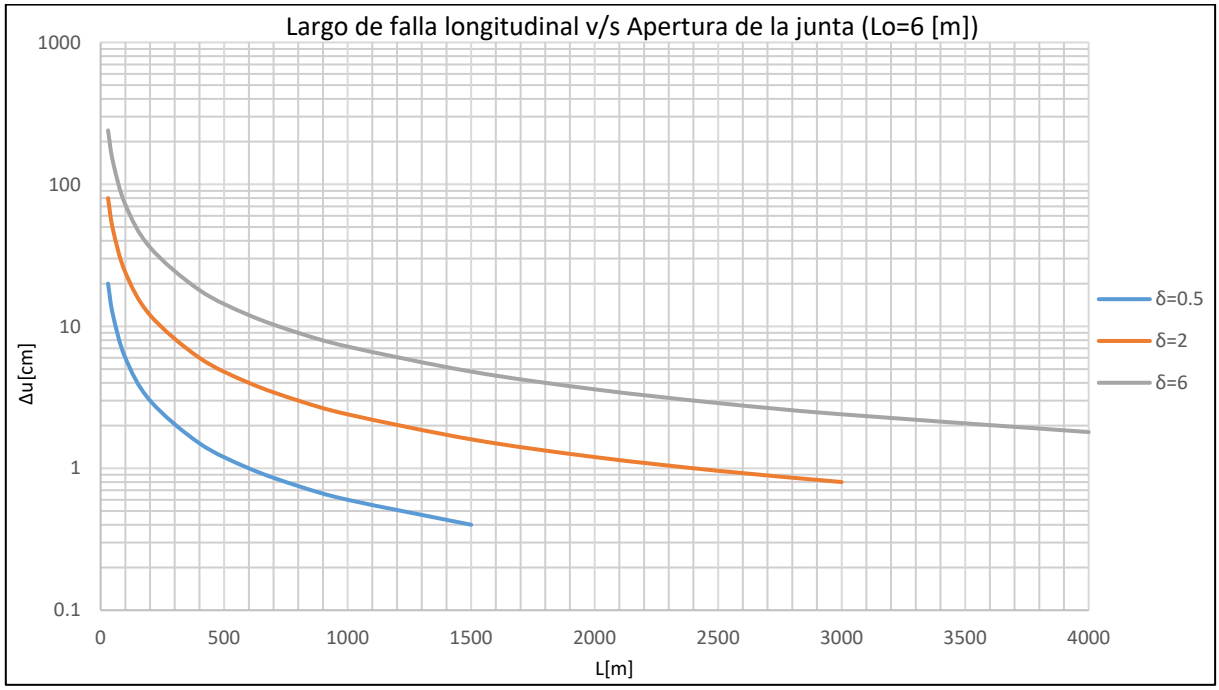


Gráfico 13-483: Largo de falla longitudinal v/s Apertura de la junta, para tubería de Hierro Dúctil con tramos de largo 6 metros.

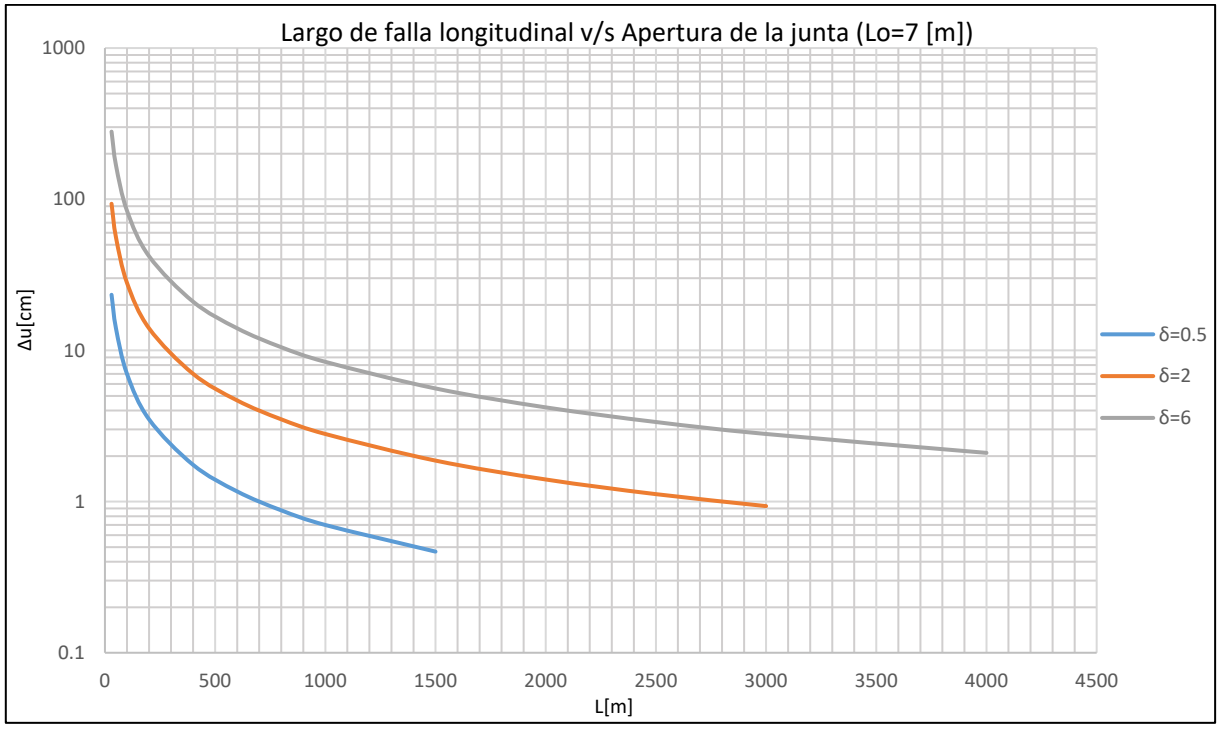


Gráfico 13-484: Largo de falla longitudinal v/s Apertura de la junta, para tubería de Hierro Dúctil con tramos de largo 7 metros.

N.2. Tuberías de PVC

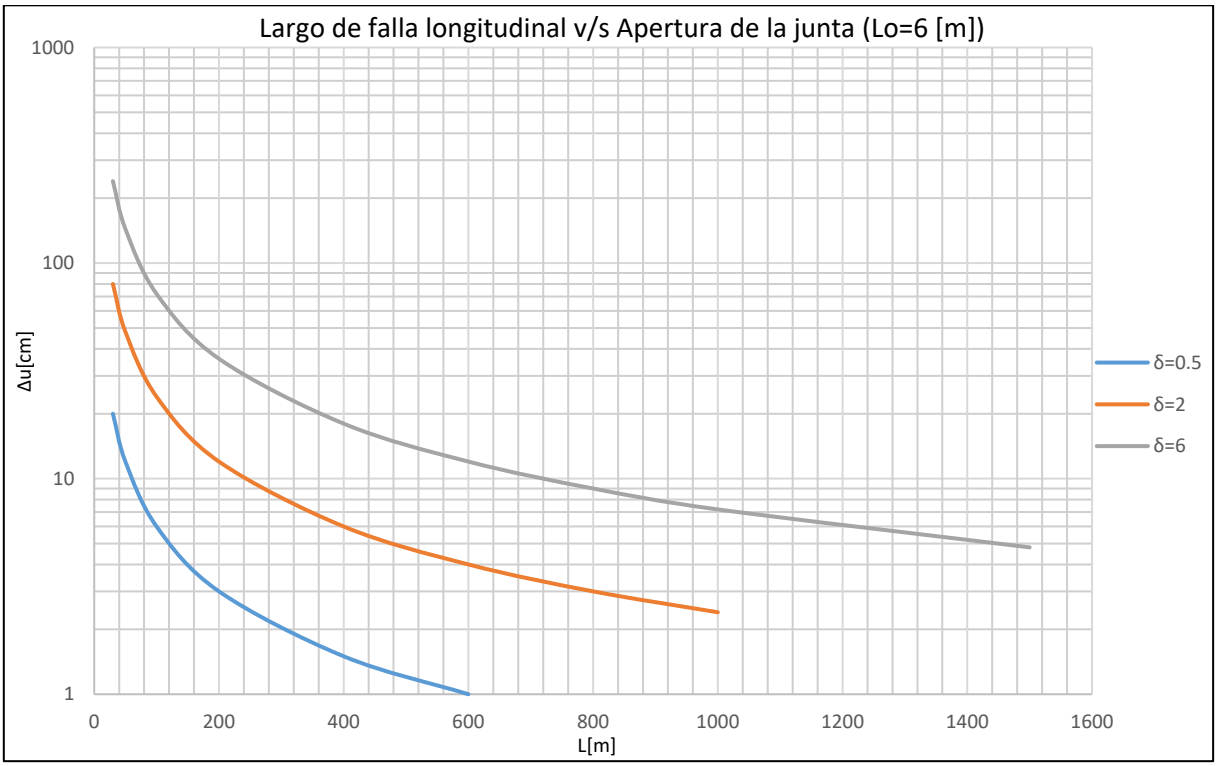


Gráfico 13-485: Largo de falla longitudinal v/s Apertura de la junta, para tubería de PVC con tramos de largo 6 metros.