



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA DE UNA LEY CONSTITUTIVA NO LINEAL
TIEMPO-DEPENDIENTE PARA EL ESTUDIO DE CABLES DE FIBRAS DE
POLIÉSTER ANTE CARGAS CÍCLICAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DAISY ANGELINE SALVATIERRA MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAFAEL RUIZ GARCIA
GERARDO DÍAZ RODENAS

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: DAISY ANGELINE SALVATIERRA MUÑOZ
FECHA: 09/06/2018
PROF. GUÍA: JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA DE UNA LEY CONSTITUTIVA NO LINEAL TIEMPO-DEPENDIENTE PARA EL ESTUDIO DE CABLES DE FIBRAS DE POLIÉSTER ANTE CARGAS CÍCLICAS

Los cables de fibra de poliéster tienen diversas aplicaciones, entre las que se encuentran el izaje en construcción, espías o sistemas de amarres de barcos, estructuras pretensadas de hormigón y anclajes de plataformas ubicadas en grandes profundidades marinas. Este último es el tema de interés de este trabajo de título ya que los cables están constantemente expuestos a situaciones de carga y descarga, proceso que afecta la rigidez del material.

El objetivo principal de este trabajo de investigación consiste en implementar numéricamente una ley constitutiva no lineal tiempo-dependiente para cables de fibra de poliéster ante la acción de cargas cíclicas, con la finalidad de reproducir el comportamiento de éstos. Para ello se realiza, en primera instancia, una revisión bibliográfica del tema para conocer los antecedentes que se tienen.

Posterior a ello, se realiza un estudio de las expresiones de deformación viscoelástica y viscoplástica presentadas por Huang et al., 2014, considerando cada caso según la magnitud de la carga aplicada. Además, se presenta la identificación de los parámetros que definen a la ley constitutiva como no lineal. Luego, se valida el modelo a partir de una evaluación numérica del modelo considerando el análisis de sensibilidad paramétrico de la ley constitutiva.

Por otro lado, se hace un estudio de una ley constitutiva para una fibra de poliéster y se compara con los resultados obtenidos del resto de los componentes del cable. Además, se analiza el comportamiento de la estructura interna de las fibras de poliéster, la cual se representa a partir de tres etapas que impactan directamente en el módulo de elasticidad del material, y por lo tanto, en su rigidez.

Finalmente, se realiza una implementación numérica de la respuesta estática de los cables de poliéster a partir de la ley constitutiva planteada anteriormente para los componentes básicos del cable. De igual manera, se reproduce la respuesta de tres cables distintos de diámetro mayor a partir de dicha implementación numérica. Se concluye que el modelo no capta la variación de rigidez con respecto al número de ciclos de carga.

*A quien siempre me deseó lo mejor en mis estudios,
pero partió al cielo antes de alcanzar este momento.*

*A la memoria de Saturnina de las Nieves Fuenzalida Castro,
mi abuelita Tuna.*

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi profesor guía, Juan Felipe Beltrán, por darme la oportunidad de trabajar en este tema de investigación, pero sobre todo por el gran apoyo y disposición que siempre ha mostrado.

A FONDECYT proyecto N°1150409 por el financiamiento otorgado a esta investigación.

A mi familia por creer en mí. A mi padre, por apoyarme siempre que lo he necesitado y darme una palabra de aliento en el momento indicado. A mi madre, por preocuparse de que nunca me faltara nada. A mi hermano Luis, por estar siempre a mi lado, por cuidarme, por apoyarme y por ser mi más grande confidente. A mi hermano Fernando, por sacarme sonrisas con sus locuras.

A José Antonio, por llegar a mi vida en el momento menos esperado y ser, mi cable a tierra, gracias por su amor incondicional y por apoyarme durante todo este tiempo.

A Luis Seguel, por la preocupación y tener la mejor disposición del mundo cuando necesité ayuda con mis prácticas profesionales.

A mis civiles favoritos, Niki, Meili, Ignacio y Leo, por ser mi gran apoyo y compañeros de aventuras durante la mayoría de mi vida universitaria. Gracias por tantas alegrías, días de estudios, carretes, risas y momentos vividos.

A mi civiloca, Corina, por sacarme tantas risas en los momentos menos esperados, por compartir días interminables de estudios y por los coffee break que eran más que necesarios.

En general, a todas las personas que he tenido la oportunidad de conocer en estos largos años universitarios y que han formado parte de mi vida.

A todos, muchas gracias.

Tabla de Contenido

Resumen	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos.....	iv
Tabla de Contenido	v
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Alcances.....	2
1.5. Metodología	2
2. Antecedentes	4
2.1. Revisión Bibliográfica	4
2.2. Antecedentes de datos experimentales	5
3. Descripción de un modelo de ley constitutiva no lineal tiempo-dependiente para el poliéster.....	8
3.1. Descripción de la ley constitutiva no lineal viscoelástica-viscoplástica: Huang et al., 2014.	8
3.2. Estudio deformación viscoelástica	12
3.2.1. Ensayo de creep – término viscoelástico.....	13
3.2.2. Ensayo de Ruptura – término viscoelástico	17
3.2.3. Curva sinusoidal – término viscoelástico	19
3.3. Estudio de deformación viscoplástica	22
3.3.1. Ensayo de creep – término viscoplástico.....	23
3.3.2. Curva a capacidad – término viscoplástico.....	24
3.3.3. Curva sinusoidal – término viscoplástico	24
3.4. Identificación de parámetros	24
3.4.1. Determinación de g_0	28
3.4.2. Determinación de g_1 , g_2 y a_σ	28

4.	Evaluación y Validación del Modelo Huang, et al., 2014.....	30
4.1.	Evaluación numérica del modelo de Huang et al., 2014.	30
4.1.1.	Ensayo a Capacidad – modelo de Huang et al., 2014.....	30
4.1.2.	Análisis de la estructura interna.....	34
4.1.3.	Estudio de parámetros del modelo	36
4.1.4.	Análisis de sensibilidad paramétrico del modelo	41
4.1.5.	Carga Sinusoidal – modelo de Huang et al., 2014.....	45
4.2.	Estudio de fibra de poliéster	51
5.	Implementación numérica de la respuesta estática de cables de poliéster	54
5.1.	Bases del modelo numérico	57
5.1.1.	Ley Constitutiva	57
5.1.2.	Equilibrio.....	58
5.1.3.	Compatibilidad de deformaciones.....	58
5.2.	Método de iteraciones.....	59
5.3.	Respuesta de cable de nueve elementos	60
5.4.	Respuesta de cables de diámetro mayor	60
6.	Comentarios y Conclusiones.....	67
	Bibliografía	69
	Apéndice	70
	Anexos	72

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Notación de las curvas experimentales de fibras de poliéster.	6
Tabla 2.2: Datos del cable de 9 elementos.	6
Tabla 2.3: Características de los cables R_1 , R_2 y R_3	7
Tabla 2.4: Tensión y Fuerza de ruptura de los elementos.	7
Tabla 3.1: Parámetros del modelo según Huang et al., 2014.	11
Tabla 3.2: Parámetros del modelo según Huang et al., 2015.	11
Tabla 3.3: Parámetros de la Serie de Prony.	12
Tabla 4.1: Parámetro g_0 para respuesta de cables.	40
Tabla 4.2: Valores determinados de D_0	41
Tabla 4.3: Valores de las pendientes p_1 , p_2 y p_3 , según curva de la Figura 4.25.	47
Tabla 5.1: Parámetros de la modelación de hebras.	61
Tabla 5.2: Valores de D_0 calculados para cada cable.	62
Tabla 5.3: Expresiones de g_0 obtenidos para cada tipo de hebra.	62
Tabla 5.4: Resumen de los valores calculados de D_0	64

Índice de Figuras

Figura 1.1: Cables de poliéster (Huang et al., 2015).	1
Figura 2.1: Gráfico tensión versus deformación de curvas experimentales de fibras de poliéster (Lechat et al., 2011).	4
Figura 2.2: (a) Cable de 9 sub-cables, (b) Cables tipo R_1 , R_2 y R_3	6
Figura 3.1: Gráfico de la respuesta de deformación (discreta) en el tiempo.	9
Figura 3.2: Curva tensión versus deformación de cables e fibras de poliéster (Huang, 2015).	13
Figura 3.3: Gráfico Ensayo de Creep.	13
Figura 3.4: Representación de la función Heaviside.	14
Figura 3.5: Representación ensayo a ruptura de cables de poliéster.	18
Figura 3.6: Creep y recuperación de deformación (a) tensión aplicada en el tiempo, (b) respuesta del material.	25
Figura 4.1: Gráfico tensión-deformación de los datos experimentales de los componentes del cable, hasta el 60%MBL.	31
Figura 4.2: Gráfico de las distintas componentes de la expresión de deformación total para los elementos del cable.	32
Figura 4.3: Gráfico tensión-deformación del modelo hasta 60%MBL, con variación de D_0 y tiempo.	33
Figura 4.4: Gráfico tensión versus deformación viscoelástica instantánea, con variación de tiempo.	33
Figura 4.5: Gráfico módulo de elasticidad con respecto a la variación de tensión aplicada a componentes del cable.	34
Figura 4.6: Gráfico del módulo de elasticidad con respecto a la deformación total de componentes del cable.	35
Figura 4.7: Evolución del módulo elástico para curvas de PET y PEN con respecto a (a) deformación y (b) carga (Lechat et al., 2011).	36
Figura 4.8: (a) Morfología Microestructural de fibras de poliéster. (b) Modelo esquemático (Lechat et al., 2011).	36
Figura 4.9: Gráfico g_0 con respecto a la tensión experimental de los componentes del cable.	37
Figura 4.10: Gráfico comparativo para g_0 dado por Huang et al., 2014 y g_0 dado por Huang et al., 2015.	38
Figura 4.11: Gráfico tensión-deformación de sub-cables con polinomial y exponencial, y datos experimentales.	39
Figura 4.12: Obtención del polinomio de g_0 a partir de datos experimentales de sub-cable 1.	39
Figura 4.13: Gráfico tensión versus deformación de simulación del modelo con distintos D_0	40
Figura 4.14: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación del parámetro g_0	42

Figura 4.15: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación de g_1 .	43
Figura 4.16: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación de g_2 .	43
Figura 4.17: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación Dp .	44
Figura 4.18: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación del parámetro m .	45
Figura 4.19: Gráfico de la tensión aplicada en el tiempo según el protocolo de ensayo de carga sinusoidal, 10 ciclos.	47
Figura 4.20: Gráfico de variación de g_1 en el tiempo, 10 ciclos.	48
Figura 4.21: Gráfico de la variación de parámetros viscoplásticos, 10 ciclos.	48
Figura 4.22: Gráfico tensión deformación del modelo, considerando g_1 de Tabla 3.1, para 900 ciclos.	49
Figura 4.23: Relación tensión-deformación basado en resultados experimentales, 900 ciclos (Huang et al., 2014).	49
Figura 4.24: Relación tensión-deformación basado en resultados del modelo sinusoidal con 900 ciclos.	50
Figura 4.25: Gráfico tensión-deformación de ensayo de carga sinusoidal, con g_0 determinado dado en la Tabla 4.1, para 900 ciclos.	50
Figura 4.26: Gráfico deformación con respecto a variación de tensión para sub-cables y fibras de poliéster.	52
Figura 4.27: Gráfico g_0 con respecto a la tensión aplicada sobre sub-cables y fibras de poliéster, curvas experimentales y modeladas.	53
Figura 5.1: Distribución de los componentes del cable de poliéster.	54
Figura 5.2: (a) Representación de la distribución helicoidal de los componentes exteriores del cable (b) geometría del ángulo de inclinación de los elementos helicoidales.	55
Figura 5.3: Representación de la distancia a.	55
Figura 5.4: Representación de alargamientos de elementos del cable.	55
Figura 5.5: Gráfico comparativo de Cables experimento A, B, C y D, con respecto a la simulación realizada para el cable de 9 elementos.	60
Figura 5.6: Gráfico Fuerza versus deformación de cables R_1 , R_2 y R_3 de 35[tonf].	63
Figura 5.7: Gráfico fuerza versus deformación de cables R_2 y R_3 , de 700 [tonf].	63
Figura 5.8: Gráfico resumen de las curvas g_0D_0 versus tensión.	65
Figura 5.9: Gráfico resumen de las curvas tensión versus deformación, experimental y modelada.	66

1. Introducción

En este capítulo se da a conocer el contenido de la memoria para optar al título de ingeniero civil, donde se presenta la motivación, los objetivos, el alcance y la metodología de trabajo.

1.1. Motivación

A diferencia de los cables de acero que presentan un comportamiento lineal en la relación tensión-deformación, los cables de fibras sintéticas tienen un comportamiento no lineal y además se siguen deformando en el tiempo, proceso denominado Creep.

Los cables de fibras sintéticas tienen distintas aplicaciones entre las que se encuentran el izaje en construcción, espías o sistemas de amarre de barcos, estructuras pretensadas de hormigón, anclajes de plataformas ubicadas sobre aguas profundas, entre otras. Esta última aplicación ha tenido una masiva utilización debido a que los cables de fibras sintéticas cuentan con algunas ventajas por sobre los cables metálicos, como por ejemplo, los primeros mencionados tienen menor peso, mayor facilidad de almacenamiento y no tienen problemas de corrosión como los cables y cadenas metálicos tradicionalmente utilizados para este propósito. En esta aplicación, los cables están expuestos a ciclos de carga y descarga constante por lo que es importante que una ley constitutiva del material calcule la dependencia con respecto a los ciclos de carga, con respecto al tiempo y con respecto a la magnitud de la carga aplicada.

Existen cables de fibras sintéticas de variados diámetros, con distinto número de sub-cuerdas y de distintos materiales. En particular, en este trabajo de título, el modelo se desarrolla para las componentes o sub-cuerdas de cables de fibras de poliéster, con diámetros y distribución de elementos definidos. Para desarrollar el modelo los investigadores Wei Huang, Haixiao Liu, Yushun Lian y Linan Li utilizan los cables de la Figura 1.1 para identificar los parámetros que se requieren en la implementación del modelo.



Figura 1.1: Cables de poliéster (Huang et al., 2015).

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo de título es la implementación numérica de una ley constitutiva no lineal tiempo-dependiente para cables de fibras de poliéster ante cargas cíclicas, para analizar el comportamiento de este material y la variación de la rigidez dependiendo de la magnitud de las cargas aplicadas.

1.3. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo de título son:

- Estudiar las expresiones de viscoelasticidad y viscoplasticidad del modelo.
- Generar un algoritmo que reproduzca y simule el comportamiento de los componentes del cable.
- Verificar que los parámetros del modelo y la ley constitutiva en estudio reproduzcan el comportamiento experimental de los componentes de cables de poliéster.
- Estudiar la sensibilidad del modelo a partir de la variación de los parámetros.
- Generar una respuesta del cable de poliéster a partir del modelo generado para los componentes del cable.

1.4. Alcances

Los alcances del presente trabajo es lograr obtener una ley constitutiva que reproduzca el comportamiento de los cables a partir de un algoritmo en el software computacional MatLab R2015a y verificar la sensibilidad del modelo con respecto a la variación de los parámetros propios de la ley constitutiva en estudio.

1.5. Metodología

Inicialmente, se hace la revisión bibliográfica para conocer los antecedentes del trabajo de título.

La primera parte del trabajo de título consiste en estudiar el modelo no lineal tiempo dependiente, para lo cual se analizan tres casos de interés, es decir, se estudia el modelo en ensayos de ruptura, ensayo de creep y carga sinusoidal, de los componentes del cable de poliéster.

Al mismo tiempo, se verifica que los parámetros se ajusten a las curvas que presentan las variables de forma experimental. En caso de no ajustarse se estudia una

nueva representación de los parámetros a partir de los datos experimentales. Además, se realiza un análisis de sensibilidad del modelo ante la variación de los parámetros no lineales del modelo.

Luego, se genera un algoritmo en MatLab R2015a que reproduzca el comportamiento de los componentes del cable de poliéster. La respuesta de cables se realiza a partir de la ley constitutiva implementada para los componentes del cable, donde se considera la geometría en las que se dispongan sus elementos.

2. Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes que se tienen del tema a tratar en este trabajo de título, además de dar a conocer los datos experimentales con los cuales se realiza la implementación numérica y la validación del modelo.

2.1. Revisión Bibliográfica

Con el paso de los años, los cables de fibra sintética se han convertido en una alternativa muy atractiva a los convencionales cables metálicos en algunas aplicaciones las cuales son descritas por Foster, 2002. Esto se debe a la gran cantidad de ventajas que presentan los cables de fibras sintéticas por sobre los metálicos, como por ejemplo, el bajo costo, la alta tenacidad, menor peso, alta durabilidad, menor requerimiento de espacio para ser almacenados, propiedad resistente a la corrosión, entre otros.

Existe una gran variabilidad en los datos experimentales obtenidos en ensayos de ruptura de elementos de fibras sintéticas según la investigación de Lechat et al., 2011. La Figura 2.1 presenta los resultados de 30 especímenes de fibra de PET (Polyethylene Terephthalate) cuyo nombre comercial se conoce como poliéster. Además, en esta investigación se explica la reorganización de la estructura interna a nivel de fibra y el comienzo de su proceso de falla. Las macromoléculas de las fibras sintéticas se agrupan en fibrillas las cuales están unidas por una fase amorfa interfibrilar que está ligeramente orientada a lo largo del eje de la fibra, llamada fase mesamórfica. Éste estudio se ha realizado para PET y PEN (Polyethylene Naphthalate)

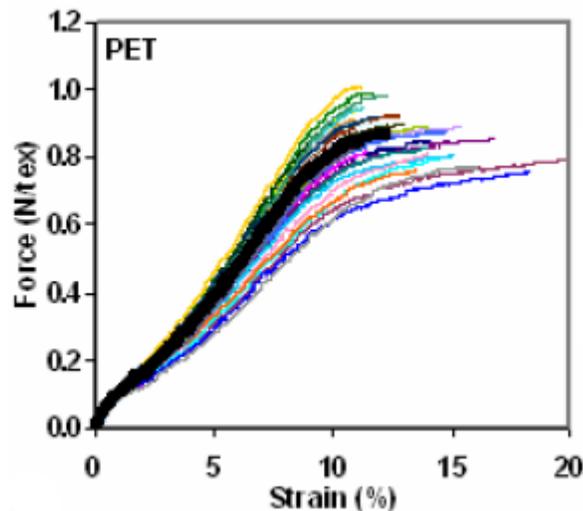


Figura 2.1: Gráfico tensión versus deformación de curvas experimentales de fibras de poliéster (Lechat et al., 2011).

Otro tipo de investigaciones similar a la presentada en este trabajo de título que utiliza un procedimiento distinto es la realizada por Flory et al., 2004. Dicho documento

explica y define las propiedades de cambio de longitud de los cables de fibra sintética y rigidez que son importantes para el diseño del sistema de amarre de plataformas en aguas profundas. Propone como estas propiedades se pueden determinar mediante pruebas con cables y mediante modelado con softwares computacionales. Además muestra cómo deben usarse las propiedades de cambio de longitud en el diseño y análisis del sistema de amarre. Al igual que en este estudio, considera que las características de estiramiento y rigidez típica de los cables de fibras sintéticas dependen del tiempo y no son lineales, además experimentan deformación elástica y permanente. Sin embargo, una parte del estudio de este documento usa un modelo analógico de resortes y amortiguadores para describir el estiramiento principal de los cables de fibra sintética y características de rigidez.

Liu et al., 2014, emplea un sistema experimental especialmente diseñado para investigar sistemáticamente los comportamientos no lineales de tres tipos de cables de fibra sintética bajo cargas cíclicas, entre los que se encuentran poliéster, aramida y polietileno de alto módulo (HMPE). La rigidez de los cables de fibra se deriva del análisis dimensional y se examina mediante experimentos. Con base a los datos medidos se propone una expresión empírica que toma en cuenta tanto la carga media, la amplitud de deformación y el número de ciclos de carga. Para cada prueba se realizaron 1000 ciclos de carga. Luego del análisis se distinguen algunos comportamientos como que la relación de tensión-deformación es fuertemente no lineal bajo carga cíclica, el ciclo de histéresis cambia con el aumento del número de ciclos, la rigidez aumenta con los ciclos y gradualmente se estabiliza debido a la propiedad dependiente del tiempo, la tensión residual después de cada ciclo también aumenta y se acumula con los ciclos de carga y gradualmente se estabiliza, entre otros.

Por otro lado, Huang et al., 2014, propone un modelo no lineal tiempo dependiente para cables de fibras sintética el cual es presentado en la sección 3.1 del capítulo 3. De igual forma, Huang et al., 2015, hace un análisis para cables de fibras de poliéster y aramida presentando la identificación de parámetros y los resultados de sus simulaciones. En dicho caso, el modelo presentado para la deformación viscoelástica es similar al planteado en este trabajo de título, sin embargo, los parámetros utilizados son distintos, lo cual entrega respuestas diferentes a lo esperado como se mostrará en el análisis.

2.2. Antecedentes de datos experimentales

Para realizar el estudio y análisis del modelo se cuenta con una serie de datos experimentales de ensayos de ruptura de los diferentes niveles en la estructura del cable. La Tabla 2.1 es la descripción de las fibras experimentales que se obtuvieron de la Figura 2.1, cuyos valores de la curva promedio, flexible y rígida se encuentran en el Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3, respectivamente.

De igual forma, se cuenta con datos experimentales para tres sub-cables diferentes los cuales son componentes de un cable de nueve elementos (un núcleo y ocho elementos helicoidales) (Figura 2.2 (a)), cuyos valores medidos se encuentran en los Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6. Además, el Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9 y Anexo 10

corresponden a los datos experimentales de cuatro ensayos de ruptura de cables cuyos parámetros geométricos se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1: Notación de las curvas experimentales de fibras de poliéster.

Nombre de la curva	Descripción
Fibra Experimental 1	Promedio de Curvas
Fibra Experimental 2	Curva rígida de Figura 2.1
Fibra Experimental 3	Curva flexible de Figura 2.1

Tabla 2.2: Datos del cable de 9 elementos.

Parámetro	Valor
n° elementos	9
D [mm]	6,096

Por otro lado, la Figura 2.2 (b) corresponde al corte transversal de los cables tipo R_1 , R_2 y R_3 , cuyos componentes son los sub-cables, los que a su vez están compuestos de las denominadas hebras, hasta llegar al elemento más pequeño del cable llamado fibra. La Tabla 2.3 muestra la fuerza de ruptura, diámetro y número de sub-cables del cable, el número de hebras por cada sub-cable, y el diámetro y el ángulo helicoidal con el que los elementos que recubren el núcleo ficticio se distribuyen en torno a él.

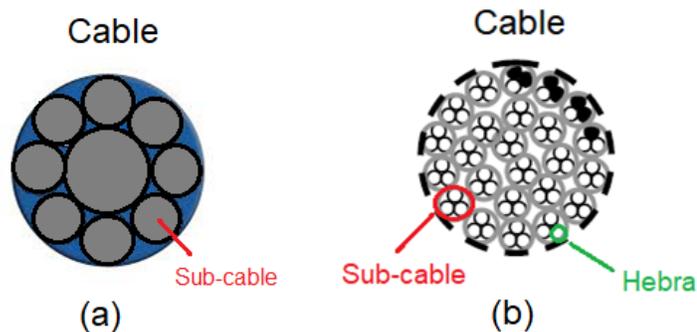


Figura 2.2: (a) Cable de 9 sub-cables, (b) Cables tipo R_1 , R_2 y R_3 .

Para el modelo presentado en este trabajo de título es importante conocer la tensión de ruptura (MBL: *Minimun breaking load*) o la fuerza máxima que soportan los cables, sub-cables o hebras por lo que estos valores se muestran en la Tabla 2.4. En los casos en que se presenta la fuerza máxima de los cables en vez del MBL, la distribución del campo de tensiones en la sección transversal del cable no es la misma para cada una de sus componentes internas, es por esto que no se puede hablar de una tensión en particular.

Tabla 2.3: Características de los cables R_1 , R_2 y R_3 .

Tipo Cable	Cables			Sub-cables	Hebras	
	$F_{m\acute{a}x}$ [tonf]	D [mm]	N° sub-cables	N° hebra	D [mm]	θ [°]
R_1	35	32	24	3	2.70	12
	700	160	24	3	13.10	12
R_2	35	32	18	3	3.20	12
	700	147	20	3	12.25	12
R_3	35	36	10	3	4.50	10
	700	166	10	3	20.00	10

Tabla 2.4: Tensión y Fuerza de ruptura de los elementos.

Elemento	σ_r (MBL) [GPa]	F_r [kN]
Fibra experimental 1	0,8618	-
Fibra experimental 2	0,7471	-
Fibra experimental 3	0,9803	-
Sub-cable 1 experimental	0,9197	-
Sub-cable 2 experimental	0,9400	-
Sub-cable 3 experimental	0,8854	-
Experimento A Cable de 9 sub-cables	-	23,0979
Experimento B Cable de 9 sub-cables	-	25,5835
Experimento C Cable de 9 sub-cables	-	22,3238
Experimento D Cable de 9 sub-cables	-	25,5043
Cable R_1 35[tonf]	-	320,4600
Cable R_2 35[tonf]	-	347,1921
Cable R_2 700[tonf]	-	6674,1550
Cable R_3 35[tonf]	-	383,4660
Cable R_3 700tonf]	-	6834,3033

3. Descripción de un modelo de ley constitutiva no lineal tiempo-dependiente para el poliéster

Los cables de fibras sintéticas utilizados como sistemas de anclajes de plataformas en aguas profundas se encuentran expuestos a ciclos de carga y descarga producto del oleaje marino. En periodos de tormenta esta condición de ciclado aumenta, por lo que es importante generar un modelo que reproduzca su comportamiento.

Para conocer la respuesta de un cable es necesario conocer una ley constitutiva de los componentes que forman un cable y aplicar condiciones de equilibrio y relaciones desplazamiento-deformación correspondientes a la hipótesis de deformación de un cable sometido a condiciones axisimétricas.

En este capítulo se presenta en forma detallada una ley constitutiva que considera el comportamiento viscoelástico y viscoplástico y su dependencia del tiempo para una fibra de poliéster según lo descrito por Huang et al., (2014).

3.1. Descripción de la ley constitutiva no lineal viscoelástica-viscoplástica: Huang et al., 2014.

La viscoelasticidad y la viscoplasticidad son propiedades características de los cables de fibras sintéticas expuestas a carga. La viscoelasticidad es la propiedad de los materiales que exhiben tanto características viscosas como elásticas cuando se someten a deformación. La característica viscosa define la tensión relativa al tiempo, mientras que la característica elástica describe el comportamiento de los materiales de recuperar la deformación producida. Por otro lado, la viscoplasticidad es la propiedad de los materiales en donde exhiben una deformación permanente (irrecuperable) producto de la aplicación de una carga temporal.

Para reproducir el comportamiento viscoelástico y viscoplástico de los componentes del cable de fibras sintéticas Huang et al., 2014 emplea la teoría termodinámica de Schapery (Schapery, 1969, 1997) y una función viscoplástica para describir el modelo. La deformación total de los componentes del cable $\varepsilon(t)$ se define como la suma de una parte viscoelástica recuperable $\varepsilon_{ve}(t)$ y una parte viscoplástica irre recuperable $\varepsilon_{vp}(t)$, representado por:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{ve}(t) + \varepsilon_{vp}(t) \quad (3.1)$$

La parte viscoelástica depende del historial de carga y puede ser representada por la ecuación constitutiva integral desarrollada por Schapery, que es un modelo macroscópico basado en supuestos termodinámicos. La ecuación de Schapery es una expresión lineal donde existe una relación inseparable entre la dependencia del tiempo y el desarrollo de fluencia lenta o también denominado creep.

Si se aplica una carga a un material viscoelástico, el material presenta una respuesta instantánea y, posterior a ello, el material se deforma a carga constante (creep). Dicho proceso se muestra en la Figura 3.1, en donde se aplica una carga en $t = 0$ equivalente a $\sigma(0)$, cuya respuesta queda definida por $\varepsilon(t)|_{t=0} = \sigma_0 \cdot J(t)$, con $J(t)$ una función que representa el comportamiento de la fluencia lenta en el material. Luego, en $t = \tau$ se aplica un incremento de carga $\Delta\sigma$ cuya deformación se obtiene de la expresión $\varepsilon(t)|_{t=\tau} = \Delta\sigma \cdot J(t - \tau)$. Así, la respuesta de deformación se expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot J(t) + \sum_{t=0}^{\infty} d\sigma_i \cdot J(t - \tau_i) \quad (3.2)$$

donde el primer término corresponde a la cepa instantánea y el segundo término corresponde a la respuesta del material producto del incremento de carga. Cuando $t \rightarrow \infty$, la deformación viscoelástica se obtiene linealmente como sigue:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot J(t) + \int_0^t J(t - \tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3.3)$$

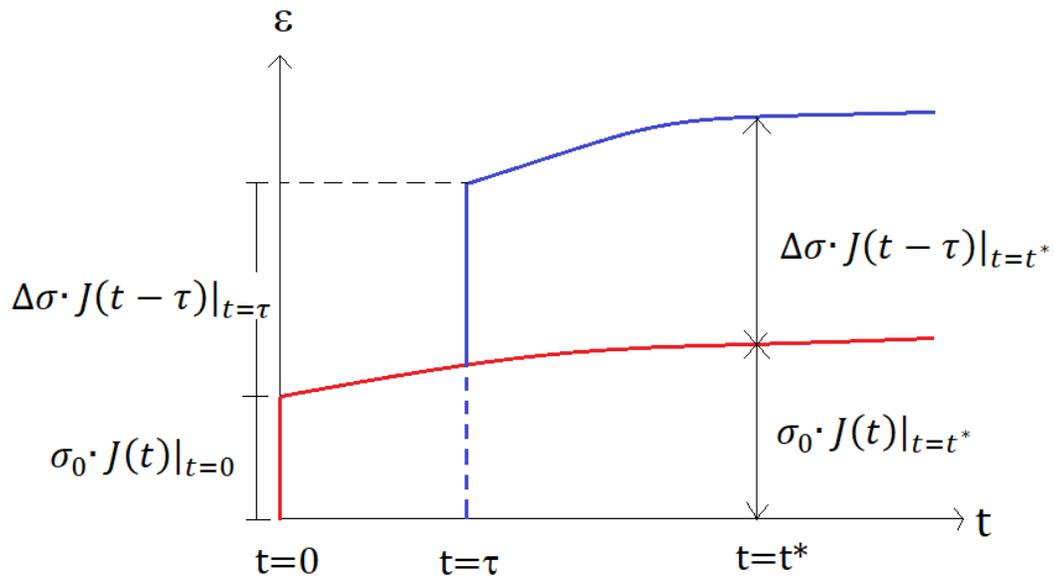


Figura 3.1: Gráfico de la respuesta de deformación (discreta) en el tiempo.

El modelo viscoelástico lineal, se puede escribir de forma no lineal considerando las funciones f_1 , f_2 y f_3 que dependen del historial de carga $\sigma(t)$ como se muestra en la ecuación (3.4). Luego, para la deformación uniaxial bajo condiciones isotérmicas, la viscoelasticidad no lineal se puede expresar según la ecuación (3.5).

$$\varepsilon(t) = f_1(\sigma(t)) + f_2(\sigma(t)) \int_0^t J(t - \tau) \frac{df_3(\sigma(t))}{d\tau} d\tau \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0 D_0 \sigma(t) + g_1 \int_0^t \Delta D[\psi(t) - \psi'(\tau)] \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \quad (3.5)$$

El término $\sigma(t)$ describe la tensión axial en el tiempo t ; g_0 es el parámetro no lineal relacionado con la flexibilidad de la respuesta elástica instantánea el cual mide el aumento o reducción en la rigidez; g_1 denota el parámetro de fluencia transitoria que mide el efecto no lineal de la flexibilidad transitoria; g_2 es el parámetro del efecto de la tasa de carga sobre la respuesta de fluencia; D_0 es el parámetro que define la flexibilidad instantánea y $\Delta D(\psi)$ es el parámetro que define la flexibilidad de transitoria del creep; ψ es el tiempo reducido el cual está definido por la expresión:

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{ds}{a_\sigma[\sigma(s)]} \quad (3.6)$$

donde a_σ indica el parámetro de escala de tiempo; las propiedades de los materiales no lineales g_0 , g_1 , g_2 , y a_σ son todos parámetros en función de la tensión $\sigma(t)$. Cabe destacar que estos parámetros son siempre positivos y se consideran unitarios para valores pequeños de tensión. Es decir, cuando estas funciones son unitarias la ecuación (3.5) corresponde al principio de superposición de Boltzmann (ecuación (3.2)), el cual dice que el esfuerzo es aditivo, es decir, el esfuerzo resultante de la suma de varias deformaciones es la suma de los esfuerzos producidos por las deformaciones aisladamente. Notar que, al considera los parámetros g_0 , g_1 , g_2 , y a_σ iguales a uno, no se recupera la ley constitutiva lineal, ya que el comportamiento del material presenta fluencia lenta, como se muestra en la Figura 3.1, por lo que la expresión continúa siendo no lineal. Además, la flexibilidad transitoria ΔD se puede representar mediante una serie de Prony (Haj-Ali y Muliana, 2004), la cual es una serie de expansión en potencia que se ajusta a la curva, expresada como:

$$\Delta D(\psi) = \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n \psi)}] \quad (3.7)$$

donde N es el número de términos; D_n es el coeficiente n -ésimo de la serie de Prony; λ_n es el n -ésimo recíproco del tiempo retardado. Alternativamente, la serie de Prony se puede considerar según la expresión mostrada en la ecuación (3.8) de Brinson et al., 2008, donde D_1 y η son constantes del material.

$$\Delta D(\psi) = D_1 \psi^\eta \quad (3.8)$$

La implicancia tanto de la deformación viscoelástica como de la deformación viscoplástica en el comportamiento de los componentes de cables de fibras sintéticas varía dependiendo de la magnitud de la carga y, además, la no linealidad del modelo está dado por los coeficientes de la ley constitutiva, por lo que es importante definirlos. Huang et al., 2014, define los parámetros no lineales del modelo mediante expresiones descritas por polinomios como se muestra en la Tabla 3.1. Alternativamente, la Tabla 3.2, definida por Huang et al., 2015, presenta expresiones mediante exponenciales y polinomios para los parámetros no lineales. La diferencia entre los resultados obtenidos al aplicar las expresiones de ambas tablas se analiza en el capítulo 4. Además, los parámetros de la Serie de Prony se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.1: Parámetros del modelo según Huang et al., 2014.

$\begin{cases} g_0 = 1 & \sigma < 10\%MBL \\ g_0 = 0.972 + 0.442\sigma - 2.029\sigma^2 + 4.687\sigma^3 - 3.616\sigma^4 & \sigma \geq 10\%MBL \end{cases}$
$\begin{cases} g_1 = 1.005 - 2.867\sigma + 26.622\sigma^2 & \sigma < 30\%MBL \\ g_1 = 5.155 - 9.745\sigma + 3.314\sigma^2 & \sigma \geq 30\%MBL \end{cases}$
$\begin{cases} g_2 = 1 & \sigma < 10\%MBL \\ g_2 = -0.5 + 15\sigma & 10\%MBL \leq \sigma < 20\%MBL \\ g_2 = 23.4 - 220.5\sigma + 805.6\sigma^2 - 1281.4\sigma^3 + 745.7\sigma^4 & \sigma \geq 20\%MBL \end{cases}$
$\begin{cases} a_\sigma = 1 & \sigma < 20\%MBL \\ a_\sigma = 0.55 + 5.483\sigma - 21.833\sigma^2 + 31.667\sigma^3 - 16.667\sigma^4 & \sigma \geq 20\%MBL \end{cases}$
$\begin{cases} D_p = 0 & \sigma < 20\%MBL \\ D_p = -0.084 + 1.139\sigma - 4.204\sigma^2 + 6.156\sigma^3 - 3.189\sigma^4 & \sigma \geq 20\%MBL \end{cases}$
$\begin{cases} m = 0 & \sigma < 20\%MBL \\ m = 0.055 + 2.758\sigma - 18.75\sigma^2 + 39.167\sigma^3 - 25\sigma^4 & \sigma \geq 20\%MBL \end{cases}$

Tabla 3.2: Parámetros del modelo según Huang et al., 2015.

$g_0 = 0.115 + 0.75e^{-4.1\sigma}$
$g_1 = 0.555 + 21.510\sigma - 53.840\sigma^2 - 36.220\sigma^3$
$g_2 = 2.050 - 14.300\sigma + 37.340\sigma^2 - 30.490\sigma^3$
$\begin{cases} a_\sigma = -2.190 + 32.380\sigma & \sigma \leq 0.2MBL \\ a_\sigma = 8.736 - 35.030\sigma + 65.340\sigma^2 - 23.520\sigma^3 & \sigma > 0.2MBL \end{cases}$

Por otro lado, la parte plástica puede ser representada por la siguiente expresión (Zapas and Crissman, 1984):

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sigma D_p(\sigma) t^{m(\sigma)} \quad (3.9)$$

Tabla 3.3: Parámetros de la Serie de Prony.

n	λ_n	D_n
1	1	$1.662 \cdot 10^{-3}$
2	10^{-1}	$2.524 \cdot 10^{-3}$
3	10^{-2}	$2.527 \cdot 10^{-3}$
4	10^{-3}	$4.551 \cdot 10^{-3}$
5	10^{-4}	$7.615 \cdot 10^{-3}$
6	10^{-5}	$13.366 \cdot 10^{-3}$

donde D_p denota la tasa de deformación plástica y m corresponde al parámetro del material asociado a la función plástica, con ambos parámetros dependientes de la tensión aplicada. La deformación viscoplástica bajo un historial de carga arbitrario $\sigma_i \geq \sigma_y$ (σ_y : tensión de fluencia del material) está dado por:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \int_0^t \sigma(\tau) D_p(\sigma) m(\sigma) \tau^{m(\sigma)-1} d\tau \quad (3.10)$$

3.2. Estudio deformación viscoelástica

Debido a la particularidad que tienen los cables de fibras sintéticas ante el estímulo de las cargas, se analizan tres casos de importancia que afectan la respuesta de los sub-cables.

- Ensayo de Fluencia lenta o Creep.
- Ensayo de ruptura o capacidad.
- Carga sinusoidal.

A lo largo de la aplicación de las cargas, las fibras sintética se deforman en el tiempo, a pesar de que la carga sea nula en algún momento, esto se debe a que experimenta fluencia lenta o también llamado Creep. Por otro lado, se analiza el ensayo a capacidad, ya que es necesario conocer la carga de ruptura del material en estudio. El estudio de carga sinusoidal se hace para conocer la respuesta de los cables expuestos a la acción de cargas cíclicas, ya que éstos varía su rigidez dependiendo del historial de carga y del número de ciclos que se aplique.

La Figura 3.2 permite ver de forma gráfica el estudio que se hace a continuación, donde es posible diferenciar el inicio como parte de una curva monótonica (sin alcanzar la ruptura), acompañado de la respuesta de cargas cíclicas.

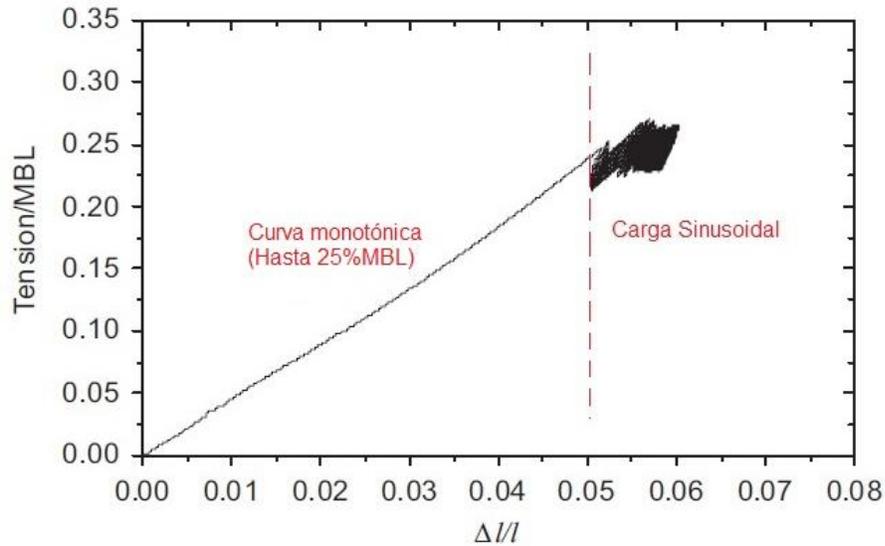


Figura 3.2: Curva tensión versus deformación de cables e fibras de poliéster (Huang, 2015).

3.2.1. Ensayo de creep – término viscoelástico

La Figura 3.3 representa el ensayo de creep básico donde se aplica una tensión constante σ_c hasta un tiempo t_c , posterior a ese tiempo el material se sigue deformando lo cual se debe determinar. La tensión queda representada por:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_c & 0 \leq t \leq t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases} \quad (3.11)$$

lo que se puede expresar como:

$$\sigma(t) = \sigma_c [H(t) - H(t - t_c)] \quad (3.12)$$

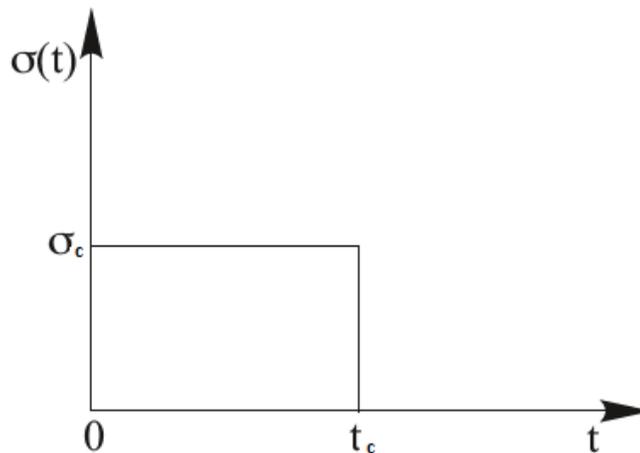


Figura 3.3: Gráfico Ensayo de Creep.

donde $H(t)$ es la función Heaviside, definida como una función escalón que toma valores uno o cero, como se presenta en la Figura 3.4, es decir:

$$H(t) = 1 \quad \forall t \quad (3.13)$$

$$H(t - t_c) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_c \\ 1 & t > t_c \end{cases} \quad (3.14)$$

En este caso, cabe destacar que $\sigma(t)$ es constante por lo que los parámetros g_0 , g_1 , g_2 y a_σ de la expresión (3.5) son constantes en el tramo ya que dependen de $\sigma(t)$.

Al reemplazar el valor de $\sigma(t)$ en la ecuación (3.5), se obtiene:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ve}(t) = & g_0^c D_0 \sigma_c H(t) + (g_0^b \sigma_b - g_0^c \sigma_c) D_0 H(t - t_c) \\ & + g_1 \int_0^t \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] \frac{d[g_2^c \sigma_c H(\tau) + (g_2^b \sigma_b - g_2^c \sigma_c) H(\tau - t_c)]}{d\tau} d\tau \end{aligned} \quad (3.15)$$

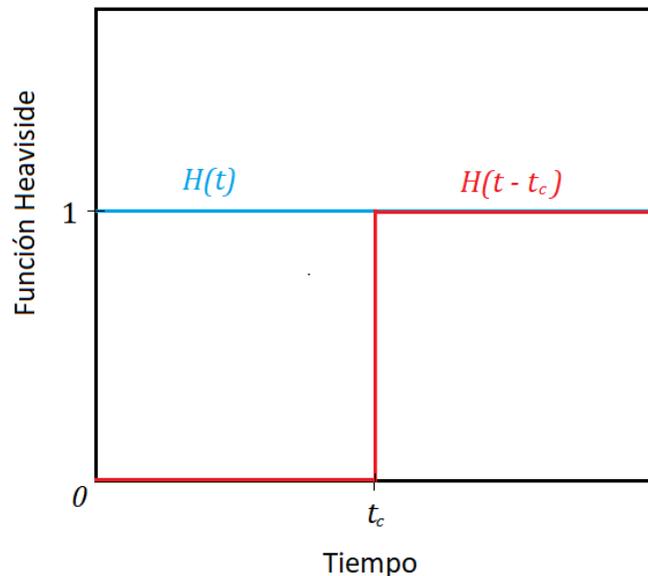


Figura 3.4: Representación de la función Heaviside.

donde $\sigma_b = 0$, según la Figura 3.3. El superíndice c de los parámetros representa a la acción de la carga antes del tiempo t_c , y el superíndice b indica la tensión aplicada posterior a ese tiempo. La derivada de la función escalón (Heaviside) corresponde a la función Delta de Dirac, la cual se define de la siguiente manera:

$$\delta(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad (3.16)$$

$$\delta(t - t_c) = \frac{dH(t - t_c)}{dt} \quad (3.17)$$

Al desarrollar el tercer término de la ecuación (3.15) y reemplazar (3.16) y (3.17) se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ve}(t) = & g_0^c D_0 \sigma_c H(t) + (g_0^b \sigma_b - g_0^c \sigma_c) D_0 H(t - t_c) \\ & + g_1^c \int_0^{t_c^-} \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [g_2^c \sigma_c \delta(\tau) + (g_2^b \sigma_b - g_2^c \sigma_c) \delta(\tau - t_c)] d\tau \\ & + g_1^b \int_{t_c^-}^t \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [g_2^c \sigma_c \delta(\tau) + (g_2^b \sigma_b - g_2^c \sigma_c) \delta(\tau - t_c)] d\tau \end{aligned} \quad (3.18)$$

donde $\delta(\tau - t_c)$ queda fuera del intervalo para $0 \leq t \leq t_c$, al igual que $\delta(\tau)$ para el intervalo $t > t_c$. Por lo que resulta una expresión general para todo t , representada por:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ve}(t) = & g_0^c D_0 \sigma_c H(t) + (g_0^b \sigma_b - g_0^c \sigma_c) D_0 H(t - t_c) \\ & + g_1^c \int_0^{t_c^-} \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [g_2^c \sigma_c \delta(\tau)] d\tau \\ & + g_1^b \int_{t_c^-}^t \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [(g_2^b \sigma_b - g_2^c \sigma_c) \delta(\tau - t_c)] d\tau \end{aligned} \quad (3.19)$$

Debido a que la función Delta de Dirac es una derivada, ésta indica el cambio que se produce en cada tramo de la función Heaviside. Para $0 \leq t \leq t_c^-$ la función Heaviside tiene un cambio en $t = 0$, por lo que $\delta(\tau) = 0, \forall \tau - \{0\}$, mientras que para $t > t_c^-$, la función Heaviside presenta una variación en $t = t_c$, por lo que $\delta(\tau - t_c) = 0, \forall \tau - \{t_c\}$.

A partir de la ecuación (3.19) es posible desarrollar la deformación para dos tramos distintos para facilitar el análisis.

a) $0 \leq t \leq t_c$:

En este caso, la deformación viscoelástica $\varepsilon_{ve}(t)$ queda definida por la ecuación:

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0^c D_0 \sigma_c H(t) + g_1^c \int_0^{t_c^-} \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [g_2^c \sigma_c \delta(\tau)] d\tau \quad (3.20)$$

donde $\delta(\tau) \neq 0$ para $\tau = 0$, por lo que el tiempo reducido $\psi(\tau)$ se evalúa en ese punto.

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{ds}{a_{\sigma^c}} = \frac{t}{a_{\sigma^c}} \quad (3.21)$$

$$\psi(\tau = 0) = \int_0^{\tau=0} \frac{ds}{a_\sigma^c} = \frac{\tau}{a_\sigma^c} = 0 \quad (3.22)$$

Por lo tanto, $\Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] = t/a_\sigma^c$ la cual no depende de τ , y la deformación viscoelástica toma el siguiente valor para $0 \leq t \leq t_c$:

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0^c D_0 \sigma_c H(t) + g_1^c \Delta D \left[\frac{t}{a_\sigma^c} \right] g_2^c \sigma_c \int_0^{t_c^-} \delta(\tau) d\tau \quad (3.23)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{ve}(t) = H(t) \sigma_c \left[g_0^c D_0 + g_1^c g_2^c \Delta D \left[\frac{t}{a_\sigma^c} \right] \right] \quad (3.24)$$

b) $t > t_c$:

De forma análoga al caso anterior, la deformación viscoelástica para $t > t_c$, queda definida por la expresión (3.25).

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0^b D_0 \sigma_b H(t - t_c) + I_1 + I_2 \quad (3.25)$$

donde

$$I_1 = g_1^b \int_0^{t_c^-} \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [g_2^c \sigma_c \delta(\tau)] d\tau \quad (3.26)$$

$$I_2 = g_1^b \int_{t_c^-}^t \Delta D[\psi(t) - \psi(\tau)] [(g_2^b \sigma_b - g_2^c \sigma_c) \delta(\tau - t_c)] d\tau \quad (3.27)$$

Las integrales de I_1 e I_2 se evalúan en $\tau = 0$ y $\tau = t_c$, respectivamente. El tiempo efectivo ψ queda definido según las expresiones (3.28) y (3.29) para I_1

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{dt}{a_\sigma} = \int_0^{t_c} \frac{dt}{a_\sigma^c} + \int_{t_c}^t \frac{dt}{a_\sigma^b} = \frac{t_c}{a_\sigma^c} + \frac{t - t_c}{a_\sigma^b} \quad (3.28)$$

$$\psi(\tau = 0) = \int_0^\tau \frac{dt}{a_\sigma} = \frac{\tau}{a_\sigma} = 0 \quad (3.29)$$

y según las expresiones (3.30) y (3.31) para I_2 .

$$\psi(t) = \int_{t_c}^t \frac{dt}{a_\sigma^b} = \frac{t - t_c}{a_\sigma^b} \quad (3.30)$$

$$\psi(\tau = t_c) = \int_{t_c}^{\tau} \frac{dt}{a_\sigma^b} = \frac{\tau - t_c}{a_\sigma^b} = 0 \quad (3.31)$$

Luego, la deformación viscoelástica para el creep es

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ve}(t) = g_0^b D_0 \sigma_b + g_1^b g_2^c \sigma_c \Delta D \left[\frac{t_c}{a_\sigma^c} + \frac{t - t_c}{a_\sigma^b} \right] + g_1^b (g_2^b \sigma_b \\ - g_2^c \sigma_c) \Delta D \left[\frac{t - t_c}{a_\sigma^b} \right] \end{aligned} \quad (3.32)$$

3.2.2. Ensayo de Ruptura – término viscoelástico

La curva de capacidad de un elemento de fibra sintética implica que la tensión aplicada presenta un crecimiento constante en el tiempo lo cual queda representado en la Figura 3.5. La variable $\sigma(t)$ se puede representar como $\sigma(t) = p \cdot t$, donde p es la pendiente de la curva y t es el tiempo. Al reemplazar $\sigma(t)$ en la expresión de deformación viscoelástica (3.5), resulta una ecuación que sólo depende del tiempo t , como se muestra en la expresión (3.33).

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0 D_0 p t + g_1 \int_0^t \Delta D [\psi(t) - \psi'(\tau)] \frac{d(g_2 p t)}{d\tau} d\tau \quad (3.33)$$

En este caso, se realiza un análisis similar al caso de ensayo de creep, es decir, se hace un análisis por partes debido a la definición de los parámetros no lineales del modelo (mostrados en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2) los cuales dependen del porcentaje de la carga de ruptura que se aplica al material. Como se verá en el capítulo 4, los parámetros no lineales que se validan para este modelo son los definidos en la Tabla 3.1, razón por la cual, el análisis de ensayo de ruptura se realiza a partir de dichos parámetros.

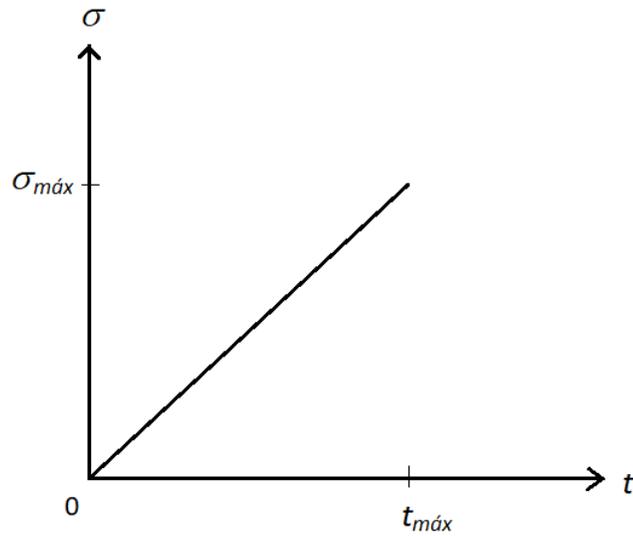


Figura 3.5: Representación ensayo a ruptura de cables de poliéster.

a) Para $\sigma < 10\%MBL$

En este caso, los coeficientes $g_0 = g_1 = g_2 = a_\sigma = 1$, $d(g_2 \cdot p \cdot t)/dt = p$ y el tiempo reducido ψ queda definido por:

$$\psi(t) = \int_0^\tau \frac{dt}{a_\sigma(t)} = \frac{\tau}{a_\sigma} = \tau \quad (3.34)$$

$$\psi'(\tau) = \psi(t=0) = \int_0^\tau \frac{dt}{a_\sigma} = \frac{\tau}{a_\sigma} = 0 \quad (3.35)$$

Luego, la serie de Prony queda definida como:

$$\Delta D(\tau - 0) = \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n \tau)}] \quad (3.36)$$

Reemplazando todas las variables en la expresión (3.33), se obtiene la deformación viscoelástica para cargas inferiores al 10% de la carga de ruptura como se muestra en la ecuación (3.37).

$$\varepsilon_{ve}(t) = D_0 p t + p \left[\sum_n D_n t + \sum_n \frac{D_n}{\lambda_n} (e^{-\lambda_n t} - 1) \right] \quad (3.37)$$

donde los coeficientes D_n y λ_n de la serie de Prony están dados en la Tabla 3.3.

b) Para $10\%MBL \leq \sigma < 20\%MBL$

En este caso, el valor del tiempo reducido, ψ , no varía debido a que a_σ tiene una variación a partir del 20% del MBL, por lo tanto, la expresión de la serie de Prony no cambia y las ecuaciones (3.34), (3.35) y (3.36) siguen siendo válidas.

Además, la derivada de $g_2\sigma$ está dada por la ecuación (3.38) y al sustituir las variables en la ecuación (3.33), se obtiene la expresión (3.39) de la deformación viscoelástica para una carga de ruptura entre 10-20% de MBL.

$$\frac{d(g_2\sigma)}{dt} = -0.5p + 30p^2t \quad (3.38)$$

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0 D_0 p t + g_1 \int_0^t \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n \tau)}] [-0.5p + 30p^2\tau] d\tau \quad (3.39)$$

donde los coeficientes del modelo se presentan en la Tabla 3.1 y los coeficientes de la serie de Prony en la Tabla 3.3.

c) Para $\sigma \geq 20\%MBL$

Al igual que los casos anteriores, la derivada de $g_2\sigma$ está dada por la expresión (3.40) y el tiempo reducido ψ (ecuación (3.41)) se determina de forma numérica debido a su complejidad mediante la regla del trapecio para integrar. Luego, basta reemplazar los datos en la ecuación (3.33).

$$\frac{d(g_2\sigma)}{dt} = 23.4p - 441p^2t + 2416.8p^3t^2 - 5.125.6p^4t^3 + 3728.5p^5t^4 \quad (3.40)$$

$$\psi(t) = \int_0^\tau \frac{dt}{0.55 + 5.483pt - 21.833(pt)^2 + 31.667(pt)^3 - 16.667(pt)^4} \quad (3.41)$$

$$\psi'(\tau = 0) = 0 \quad (3.42)$$

3.2.3. Curva sinusoidal – término viscoelástico

Para determinar el comportamiento de los componentes del cable ante cargas cíclicas es necesario realizar un procedimiento recursivo, el cual calcula la variación de la deformación viscoelástica para cada Δt . Al reemplazar la expresión (3.7) en (3.5), se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon_{ve}(t) = g_0 D_0 \sigma(t) + g_1 \int_0^t \sum_{n=1}^N [1 - e^{-\lambda_n[\psi(t) - \psi(\tau)]}] \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ve}(t) = g_0 D_0 \sigma(t) + g_1 \sum_{n=1}^N D_n \int_0^t \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \\ - g_1 \sum_{n=1}^N D_n \int_0^t e^{-\lambda_n[\psi(t) - \psi(\tau)]} \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \end{aligned} \quad (3.44)$$

Lo cual se puede reescribir como

$$\varepsilon_{ve}(t) = \varepsilon_{ve}^0(t) - g_1 \sum_{n=1}^N D_n q_n(t) \quad (3.45)$$

donde

$$\varepsilon_{ve}^0(t) = \left[g_0 D_0 + g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n \right] \sigma(t) \quad (3.46)$$

$$q_n(t) = \int_0^t e^{-\lambda_n[\psi(t) - \psi(\tau)]} \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \quad (3.47)$$

Considerando un incremento de tiempo Δt constante, q_n se puede separar en dos integrales con límites $(0, t - \Delta t)$ y $(t - \Delta t, t)$.

$$q_n(t) = \int_0^{t-\Delta t} e^{-\lambda_n[\psi(t) - \psi(\tau)]} \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau + \int_{t-\Delta t}^t e^{-\lambda_n[\psi(t) - \psi(\tau)]} \frac{d(g_2 \sigma)}{d\tau} d\tau \quad (3.48)$$

Además, el incremento del tiempo reducido está dado por:

$$\Delta\psi(t) = \psi(t) - \psi(t - \Delta t) \quad (3.49)$$

Luego, la primera integral de (3.48) puede ser escrita como se muestra en la expresión (3.50), donde $q_n(t - \Delta t)$ es la integral para todos los términos de la serie de Prony al final del tiempo anterior $(t - \Delta t)$. El segundo término de q_n se puede reescribir como en (3.51). Sustituyendo ambas expresiones en la ecuación (3.48) se obtiene que q_n está dado por (3.52).

$$\int_0^{t-\Delta t} e^{-\lambda_n[\psi(t)-\psi(\tau)]} \frac{d(g_2\sigma)}{d\tau} d\tau = e^{(-\lambda_n\Delta\psi)} q_n(t - \Delta t) \quad (3.50)$$

$$\int_{t-\Delta t}^t e^{-\lambda_n[\psi(t)-\psi(\tau)]} \frac{d(g_2\sigma)}{d\tau} d\tau = \frac{1 - e^{[-\lambda_n\Delta\psi(t)]}}{\lambda_n\Delta\psi(t)} [g_2(t)\sigma(t) - g_2(t - \Delta t)\sigma(t - \Delta t)] \quad (3.51)$$

$$q_n(t) = e^{(-\lambda_n\Delta\psi)} q_n(t - \Delta t) + \frac{1 - e^{[-\lambda_n\Delta\psi(t)]}}{\lambda_n\Delta\psi(t)} [g_2(t)\sigma(t) - g_2(t - \Delta t)\sigma(t - \Delta t)] \quad (3.52)$$

Reemplazando la ecuación (3.52) en la ecuación (3.45) se obtiene una deformación viscoelástica de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{ve}(t) = \Psi(t)\sigma(t) - \phi(t) \quad (3.53)$$

donde

$$\Psi(t) = g_0(t)D_0 + g_1(t)g_2(t) \sum_{n=1}^N D_n - g_1(t)g_2(t) \sum_{n=1}^N D_n \frac{1 - e^{[-\lambda_n\Delta\psi(t)]}}{\lambda_n\Delta\psi(t)} \quad (3.54)$$

$$\phi(t) = g_1(t) \sum_{n=1}^N D_n \left\{ e^{(-\lambda_n\Delta\psi)} q_n(t - \Delta t) - g_2(t - \Delta t) \left[1 - e^{(-\lambda_n\Delta\psi)} \right] \frac{\sigma(t - \Delta t)}{\lambda_n\Delta\psi} \right\} \quad (3.55)$$

Sustituyendo q_n de la ecuación (3.52) en la expresión (3.55), $\phi(t)$ puede escribirse como:

$$\phi(t) = g_1(t) \sum_{n=1}^N D_n \left\{ q_n(t) - g_2(t)\sigma(t) \frac{1 - e^{(-\lambda_n\Delta\psi)}}{\lambda_n\Delta\psi} \right\} \quad (3.56)$$

Así mismo, $\phi(t - \Delta t)$ puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \phi(t - \Delta t) = & g_1(t) \\ & - \Delta t) \sum_{n=1}^N D_n \left\{ q_n(t - \Delta t) - g_2(t - \Delta t)\sigma(t - \Delta t) \right. \\ & \left. - \Delta t) \frac{1 - e^{(-\lambda_n\Delta\psi(t-\Delta t))}}{\lambda_n\Delta\psi(t - \Delta t)} \right\} \end{aligned} \quad (3.57)$$

El incremento de la deformación viscoelástica se puede obtener a partir de la expresión:

$$\Delta\varepsilon_{ve}(t) = \Delta(\Psi\sigma) - \Delta\phi \quad (3.58)$$

donde

$$\Delta(\Psi\sigma) = \Psi(t)\sigma(t) - \Psi(t - \Delta t)\sigma(t - \Delta t) \quad (3.59)$$

$$\Delta\phi = \phi(t) - \phi(t - \Delta t) = Q + P \quad (3.60)$$

$$Q = \sum_{n=1}^N D_n \{g_1(t)e^{[-\lambda_n\Delta\psi(t)]} - g_1(t - \Delta t)\} q_n(t - \Delta t) \quad (3.61)$$

$$P = g_2(t - \Delta t) \sum_{n=1}^N D_n \left\{ g_1(t - \Delta t) \frac{1 - e^{(-\lambda_n\Delta\psi(t-\Delta t))}}{\lambda_n\Delta\psi(t - \Delta t)} - g_1(t) \frac{1 - e^{(-\lambda_n\Delta\psi(t))}}{\lambda_n\Delta\psi(t)} \right\} \sigma(t - \Delta t) \quad (3.62)$$

3.3. Estudio de deformación viscoplástica

Cuando se aplica la carga a los cables de fibras sintéticas se percibe una deformación remanente después de superar cierto umbral de tensión, la cual se va acumulando según el historial de carga.

Es decir, si se tiene un historial de cargas $\sigma_1(t_1), \sigma_2(t_2), \dots, \sigma_i(t_i), \dots, \sigma_n(t_n)$, la deformación viscoplástica ocurre si $\sigma_i > \sigma_Y$, donde σ_Y es la tensión de fluencia del cable; luego la variación de la deformación plástica para una magnitud en particular está dada por la expresión (3.63) y la deformación viscoplástica se presenta en la expresión (3.64).

$$\Delta\varepsilon_{vp}^i = \varepsilon_{vp}(\sigma_i, t_i^e + \Delta t_i) - \varepsilon_{vp}(\sigma_i, t_i^e) \quad (3.63)$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{vp}^i \quad (3.64)$$

Para poder cuantificar la magnitud de la deformación se propone una función de deformación plástica (Zapas and Crissman, 1984) la cual está representada por la expresión (3.65).

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sigma D_p(\sigma) t^{m(\sigma)} \quad (3.65)$$

donde D_p es la tasa de deformación plástica y m es un parámetro del material. Cabe mencionar que ambas variables dependen de la tensión aplicada.

Al estudiar el límite de la función (3.65) se obtienen la expresión (3.66), la cual al ser integrada da como resultado la expresión (3.67) la cual corresponde a la deformación viscoplástica.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon_{vp}(t)}{\Delta t} = \frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} = \frac{d}{dt} [\sigma D_p(\sigma) t^{m(\sigma)}] = \sigma D_p(\sigma) m(\sigma) t^{m(\sigma)-1} \quad (3.66)$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \int_0^t d\varepsilon_{vp} = \int_0^t \sigma(\tau) D_p(\sigma) m(\sigma) t^{m(\sigma)-1} d\tau \quad (3.67)$$

Al igual que para el estudio de la deformación viscoelástica, la deformación viscoplástica puede influir mientras se está cargando monótonicamente, sinusoidalmente y a través de todo el proceso a partir de la fluencia lenta, por lo tanto, se estudia tres casos en los que este tipo de deformación puede influir: creep, capacidad y sinusoidal.

3.3.1. Ensayo de creep – término viscoplástico

En ensayos de creep se aplica una carga constante a lo largo del tiempo por lo que:

$$\sigma(\tau) = \sigma_c = \text{constante}$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sigma_c D_p m \int_0^t t^{m-1} d\tau = \sigma_c D_p m \frac{t^m}{m} \quad (3.68)$$

Al reemplazar $\sigma(\tau) = \sigma_c$ en la expresión (3.67), se obtiene (3.68) y, finalmente, la deformación viscoplástica para el análisis de creep está dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sigma_c D_p t^m \quad (3.69)$$

3.3.2. Curva a capacidad – término viscoplástico

A diferencia del análisis de la fluencia lenta, en ensayos de ruptura la carga aplicada varía en el tiempo por lo que la integral de la ecuación (3.67) no puede ser simplificada analíticamente, y en este caso la deformación viscoplástica se resuelve directamente al determinar la integral con la expresión (3.67).

3.3.3. Curva sinusoidal – término viscoplástico

La deformación viscoplástica depende de la tensión de fluencia σ_y y de la duración de la aplicación de la carga. Se considera un historial de carga $\sigma_1(t_1), \sigma_2(t_2), \dots, \sigma_i(t_i), \dots, \sigma_n(t_n)$, la deformación viscoplástica se genera y se acumula si $\sigma_i \geq \sigma_y$, y el incremento de deformación plástica $\Delta\varepsilon_{vp}^i$ debido a una tensión σ_i para un tiempo Δt_i puede ser definido como:

$$\Delta\varepsilon_{vp}^i = \varepsilon_{vp}(\sigma_i, t_i^e + \Delta t_i) - \varepsilon_{vp}(\sigma_i, t_i^e) \quad (3.70)$$

donde t_i^e denota el tiempo efectivo cuando comienza la deformación plástica. La deformación viscoplástica ante cargas cíclicas está dada por la sumatoria de los incrementos de deformación plástica $\Delta\varepsilon_{vp}^i$ como se muestra en la expresión (3.71). La deformación viscoplástica bajo cargas cíclicas está dada por la expresión de Zapas y Crissman, 1984, como en la ecuación (3.10).

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{vp}^i \quad (3.71)$$

3.4. Identificación de parámetros

La identificación de parámetros se puede hacer a partir de un ensayo de ruptura o a partir de un ensayo de creep. Huang et al., 2014, propone obtener los parámetros no lineales de un ensayo de creep, ya que con este procedimiento se pueden determinar los parámetros g_0, g_1, g_2 y a_σ , a diferencia del ensayo de ruptura en el cual sólo se puede determinar g_0 .

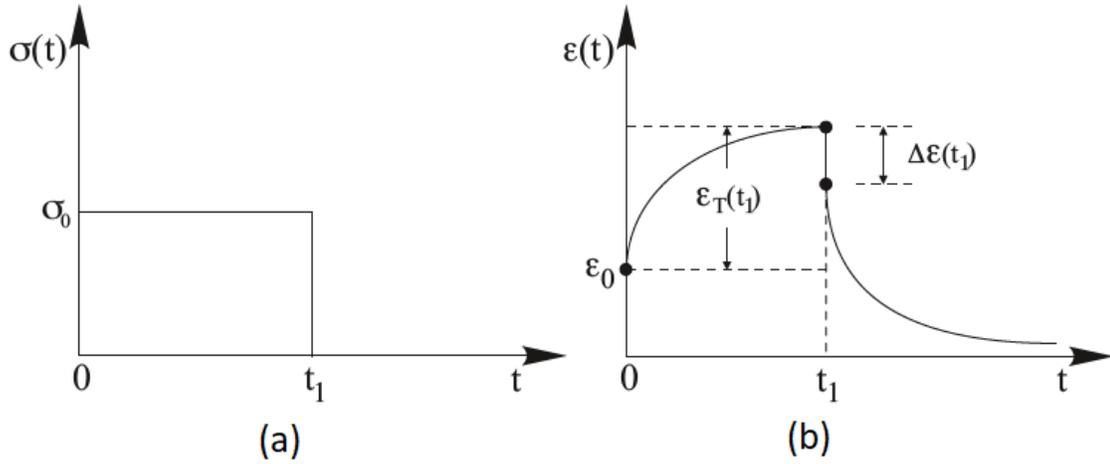


Figura 3.6: Creep y recuperación de deformación (a) tensión aplicada en el tiempo, (b) respuesta del material.

Según la Figura 3.6 (a), la tensión axial se representa como:

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t) - \sigma_0 H(t - t_1) \quad (3.72)$$

o bien,

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_0 & 0 < t \leq t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases} \quad (3.73)$$

y los parámetros $g_0^b = g_1^b = g_2^b = a_\sigma^b = 1$ en las ecuaciones (3.24) y (3.32).

Para la representación del ensayo de creep mostrado en la Figura 3.6, la fluencia lenta ocurre en el intervalo $0 < t \leq t_1$. Reemplazando $\sigma(t)$ y los parámetros unitarios en la expresión (3.24) se obtiene:

$$\varepsilon(t) = \left[g_0 D_0 + g_1 g_2 \Delta D \left(\frac{t}{a_\sigma} \right) \right] \sigma_0 H(t) \quad (3.74)$$

donde ΔD es la serie de Prony dada por la ecuación (3.7). Entonces $\forall 0 < t \leq t_1$

$$\varepsilon(t) = \left[g_0 D_0 + g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n t / a_\sigma)}] \right] \sigma_0 H(t) \quad (3.75)$$

La recuperación de fluencia ocurre en el intervalo $t > t_1$, la cual se obtiene al reemplazar (3.72) o (3.73) en la ecuación (3.32). Así, resulta:

$$\varepsilon_r(t) = g_2 \sigma_0 \left[\Delta D \left(\frac{t_1}{a_\sigma} + t - t_1 \right) - \Delta D(t - t_1) \right] \quad (3.76)$$

Reemplazando la serie de Prony en la expresión anterior, se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon_r(t) = g_2 \sigma_0 \sum_{n=1}^N D_n \left[e^{-\lambda_n(t-t_1)} - e^{-\lambda_n \left(\frac{t_1}{a_\sigma} + t - t_1 \right)} \right] \quad (3.77)$$

La ecuación (3.77) se puede reescribir como sigue

$$\varepsilon_r(t) = g_2 \sigma_0 \sum_{n=1}^N D_n e^{-\lambda_n(a_\sigma \lambda) \frac{t_1}{a_\sigma}} \left[1 - e^{-\lambda_n \frac{t_1}{a_\sigma}} \right] \quad (3.78)$$

El creep y la recuperación de fluencia ocurren como se muestra en la Figura 3.6 (b). La magnitud de ésta última está dada por:

$$\Delta \varepsilon(t_1) = \varepsilon(t_1^+) - \varepsilon(t_1^-) \quad (3.79)$$

De las expresiones (3.75) y (3.77)

$$\varepsilon(t_1^-) = \left[g_0 D_0 + g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n \left[1 - e^{(-\lambda_n t_1 / a_\sigma)} \right] \right] \sigma_0 \quad (3.80)$$

y

$$\varepsilon_r(t_1^+) = g_2 \sum_{n=1}^N D_n \left[1 - e^{(-\lambda_n t_1 / a_\sigma)} \right] \sigma_0 \quad (3.81)$$

Entonces

$$\Delta \varepsilon(t_1) = -g_0 D_0 \sigma_0 + g_2 \sigma_0 \sum_{n=1}^N D_n \left[1 - e^{(-\lambda_n t_1 / a_\sigma)} \right] [1 - g_1] \quad (3.82)$$

Notar que el salto en la deformación cuando la carga de creep se aplica por primera vez en $t = 0$, es

$$\varepsilon(t = 0) = g_0 D_0 \sigma_0 \quad (3.83)$$

De la ecuación (3.75), la deformación transitoria del creep en $t = t_1$ está dada por:

$$\varepsilon_T(t_1) = g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n t_1 / a_\sigma)}] \sigma_0 \quad (3.84)$$

El creep y la recuperación de fluencia de las ecuaciones (3.80) y (3.78), respectivamente, pueden ser escritas como

$$\varepsilon(t_1^-) = g_0 D_0 \sigma_0 + \varepsilon_T(t_1) \quad (3.85)$$

y

$$\varepsilon_r(t) = \frac{\varepsilon_T(t_1)}{g_1} e^{-\lambda_n \frac{t_1}{a_\sigma} (a_\sigma \lambda)} \quad (3.86)$$

En el creep y la recuperación de deformación en el rango lineal, los parámetros no lineales se consideran unitarios, es decir, $g_0 = g_1 = g_2 = a_\sigma = 1$. Entonces la ecuación (3.86) se puede escribir como

$$\frac{\varepsilon_r(t)}{\varepsilon_T(t_1)} = e^{-\lambda_n t_1 \lambda} \quad (3.87)$$

El numerador del lado izquierdo de la expresión anterior son los datos que se pueden obtener mediante ensayos, el lado derecho es la representación numérica de los datos de ensayos y $\varepsilon_T(t_1)$ representa la recuperación lineal de datos que se deben desplazar hacia abajo en una escala logarítmica de un gráfico $\varepsilon_r(t)$ versus λ , para hacer coincidir la curva con el exponente adecuado y es equivalente a la tensión de fluencia transitoria en t_1 para el mismo nivel de tensión en el rango lineal.

Alternativamente, $\varepsilon_T(t_1)$, se puede encontrar resolviendo la ecuación (3.87) al tomar dos valores diferentes de λ . El valor de $\varepsilon_T(t_1)$ determinado para varios valores de λ debería ser el mismo pero debido a un error experimental, se puede obtener una pequeña variación usando diferentes puntos y se debe utilizar el promedio.

Luego, la ecuación para la fluencia lenta de la ecuación (3.75) para el material viscoelástico puede ser escrita como

$$\varepsilon(t) = \left[D_0 + \sum_{n=1}^N D_n (1 - e^{-\lambda_n t}) \right] \sigma_0 = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 (1 - e^{-\lambda_n t}) \quad (3.88)$$

3.4.1. Determinación de g_0

Usando la ecuación (3.75) de creep,

$$\varepsilon(t) = \left[g_0 D_0 + g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n t/a_\sigma)}] \right] \sigma_0 \quad (3.89)$$

Y dos valores de deformación medidos para dos valores de tiempo, se puede determinar g_0 y $g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n t/a_\sigma)}]$ en cada nivel de tensión no lineal. Esto también permite la determinación de la deformación inicial ε_0 , ε_1 y la tensión transitoria $\varepsilon_T(t_1)$ para cada nivel de tensión en el rango no lineal.

3.4.2. Determinación de g_1 , g_2 y a_σ

La recuperación de fluencia de la ecuación (3.86) se puede escribir como:

$$\frac{\varepsilon_r(t)}{\varepsilon_T(t_1)/g_1} = e^{-\lambda_n \frac{t_1}{a_\sigma} (a_\sigma \lambda)} \quad (3.90)$$

Los datos para todos los niveles de tensión se pueden desplazar para que coincidan con los datos viscoelásticos que se obtienen del gráfico antes mencionado ($\varepsilon_r(t)$ versus λ) moviendo cada curva hacia abajo por la cantidad $\varepsilon_T(t_1)/g_1$ y a la izquierda en la cantidad a_σ . Como la tensión transitoria, $\varepsilon_T(t_1)$, se ha determinado previamente para cada nivel de esfuerzo en el rango no lineal, se puede determinar g_1 . Por lo tanto, ahora a_σ y g_1 son conocidos. El parámetro g_2 se puede encontrar como todos los demás parámetros en la expresión $g_1 g_2 \sum_{n=1}^N D_n [1 - e^{(-\lambda_n t/a_\sigma)}]$.

Alternativamente, g_1 se puede obtener de la expresión (3.98) donde todas las variables se pueden determinar a partir de datos experimentales como el que se muestra en la Figura 3.6 para diferentes niveles de tensión. Luego, el creep se puede escribir como

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} \quad (3.91)$$

donde ε_c es la fluencia lenta cuyo valor en un tiempo $t = 0$ está dado por la expresión (3.92). Considerando que σ_c es constante, cuyo resultado de reemplazarla junto a la expresión (3.5), en (3.91), se obtiene como resultado (3.93), con t_1^- correspondiente al tiempo antes de la descarga.

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c|_{t=0} = g_0 D_0 \sigma_c \quad (3.92)$$

$$\varepsilon_c(t_1^-) = g_0 D_0 \sigma_c + g_1 g_2 \Delta D \left(\frac{t_1^-}{a_\sigma} \right) \sigma_c + \varepsilon_{vp} \quad (3.93)$$

En el proceso de recuperación de fluencia en t_1^+ :

$$\varepsilon_r(t_1^+) = g_2 \Delta D \left(\frac{t_1^+}{a_\sigma} \right) \sigma_c + \varepsilon_{vp} \quad (3.94)$$

Entonces

$$\varepsilon_c(t_1^-) - g_0 D_0 \sigma_c - \varepsilon_{vp} = g_1 g_2 \Delta D \left(\frac{t_1^-}{a_\sigma} \right) \sigma_c \quad (3.95)$$

$$\varepsilon_c(t_1^-) - \varepsilon_0 - \varepsilon_{vp} = g_1 g_2 \Delta D \left(\frac{t_1^-}{a_\sigma} \right) \sigma_c \quad (3.96)$$

Pero

$$g_2 \Delta D \left(\frac{t_1^+}{a_\sigma} \right) \sigma_c = \varepsilon_r(t_1^+) - \varepsilon_{vp} \quad (3.97)$$

Por lo tanto, g_1 resulta a partir de la expresión:

$$g_1 = \frac{\varepsilon_c(t_1^-) - \varepsilon_0 - \varepsilon_{vp}}{\varepsilon_r(t_1^+) - \varepsilon_{vp}} \quad (3.98)$$

Ahora se conocen todos los parámetros necesarios para predecir la respuesta de un material viscoelástico no lineal usando la teoría de Schapery.

4. Evaluación y Validación del Modelo Huang, et al., 2014.

En el presente capítulo, se evalúa y se validan los casos descritos en el capítulo anterior, como el ensayo de ruptura y de carga sinusoidal. Para esto se cuenta con bases de datos experimentales, las cuales fueron explicadas en el segundo capítulo de este trabajo de título.

Además, se realiza un estudio para determinar variables importantes para el modelo que dependen del ciclado inicial que se le da al material y un estudio que muestra la sensibilidad de la ley constitutiva ante la variación de los parámetros no lineales. Por otro lado, se establece la diferencia en la respuesta del material dependiendo si el elemento del análisis es una fibra, una hebra, un sub-cable o el cable de poliéster.

4.1. Evaluación numérica del modelo de Huang et al., 2014.

La implementación numérica en cada uno de los casos de interés se realiza con la finalidad de verificar como afecta cada uno de ellos en la deformación viscoelástica, deformación viscoplástica y, por lo tanto, deformación total de los componentes del cable y de cables de poliéster.

4.1.1. Ensayo a Capacidad – modelo de Huang et al., 2014

Para hacer un estudio detallado acerca de cómo impacta cada término de la deformación viscoelástica en la deformación total, las expresiones (3.37), (3.39) o (3.33), dependiendo del caso $\sigma < 10\%MBL$, $10\%MBL \leq \sigma < 20\%MBL$ o $\sigma \geq 20\%MBL$, respectivamente, se separan en dos términos para facilitar el análisis. A modo de ejemplo, la ecuación (3.33) se separa en dos factores, el primero de ellos corresponde a la deformación viscoelástica instantánea (ecuación (4.1)) y el segundo está dado por la expresión (4.2).

$$\varepsilon_{ve1}(t) = g_0 D_0 \sigma = g_0 D_0 p t \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{ve2}(t) = g_1 \int_0^t \Delta D [\psi(t) - \psi'(\tau)] \frac{d(g_2 p t)}{d\tau} d\tau \quad (4.2)$$

Al introducir datos que corresponden a la tensión de los componentes del cable denominado sub-cable 1 en el modelo presentado en el tercer capítulo se obtienen curvas con deformación negativas (contracción del cable) para altas tensiones (ver Apéndice 1) lo cual es imposible para el poliéster ya que se contradice con sus propiedades y comportamiento. El modelo reproduce el comportamiento de los componentes del cable hasta el 60%MBL, como se presenta en la Figura 4.1, ya que los parámetros no lineales del modelo son válidos hasta dicha magnitud de carga. A partir de este gráfico se

desglosa que el factor que controla la deformación total de los componentes del cable en un ensayo de ruptura (carga monotónica) es la deformación viscoelástica instantánea (ϵ_{ve1}), ya que el resto de los factores (ϵ_{ve2} y ϵ_{vp}) son pequeños, es decir, los elementos que constituyen los cables de poliéster se pueden modelar sólo con la deformación viscoelástica instantánea para la carga monotónica.

La Figura 4.2 presenta cada uno de los términos de la deformación por separado, es decir, muestra la deformación viscoelástica instantánea (ϵ_{ve1}), el segundo término de la deformación viscoelástica (ϵ_{ve2}), la deformación viscoelástica (ϵ_{ve}) y la deformación viscoplástica. Cabe notar que ϵ_{ve2} muestra un comportamiento poco estable lo que se debe a un reordenamiento de la estructura interna. Así mismo, la deformación viscoplástica tiene comportamiento nulo hasta el 20%MBL, ya que el modelo se planteó desde el supuesto de que este factor comienza a influir en los componentes posterior a dicha magnitud de carga.

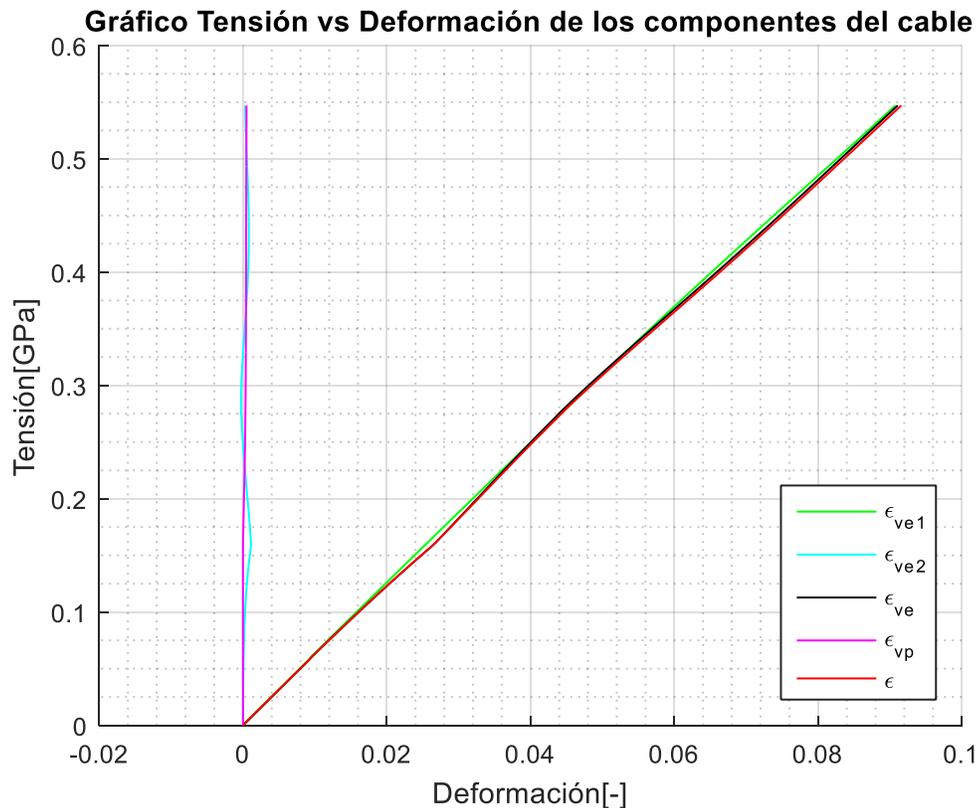


Figura 4.1: Gráfico tensión-deformación de los datos experimentales de los componentes del cable, hasta el 60%MBL.

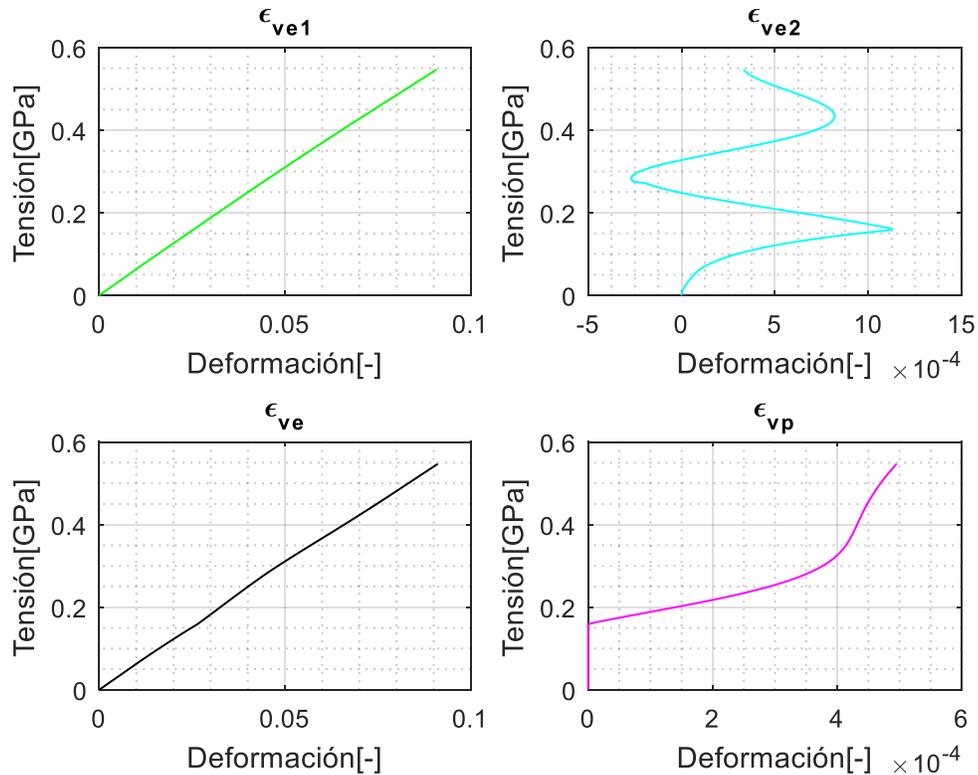


Figura 4.2: Gráfico de las distintas componentes de la expresión de deformación total para los elementos del cable.

Por otro lado, es importante conocer el impacto de la variación del tiempo total del ensayo de ruptura en la respuesta del modelo. La Figura 4.3 muestra la simulación considerando el modelo de Huang et al., 2014, para distintas constantes de flexibilidad ($D_0 = 0.107$ y $D_0 = 0.150$) y para dos valores diferentes de tiempo de ensayo ($t = 50[s]$ y $t = 300[s]$). Cuando se varía D_0 , sólo cambia la flexibilidad de la curva, es decir, mientras mayor es el valor de este parámetro, mayor es la flexibilidad de los resultados. En cuanto a la variación del tiempo total de ensayo, este parámetro tiene poco impacto en la deformación total (deformación viscoelástica y deformación viscoplástica) del material para un mismo valor de D_0 . Cuando $D_0 = 0.107$, la mayor variación que se da entre las curvas, con un tiempo total de ensayo $t = 50[s]$ y $t = 300[s]$, es de 6.7%, mientras que para $D_0 = 0.150$, la diferencia de deformación entre ambas curvas es de 3.5%. Cabe notar que las curvas de esta figura están graficadas hasta el 60%MBL, ya que los parámetros son válidos hasta esa magnitud de carga. Sin embargo, el impacto que produce la velocidad con que se realice el ensayo está reflejado sólo por el segundo término de deformación viscoelástica (ecuación (4.2)) y por la deformación viscoplástica, ya que la deformación viscoelástica instantánea presenta una variación de 0% para distintos tiempos de ensayo, como se muestra en la Figura 4.4.

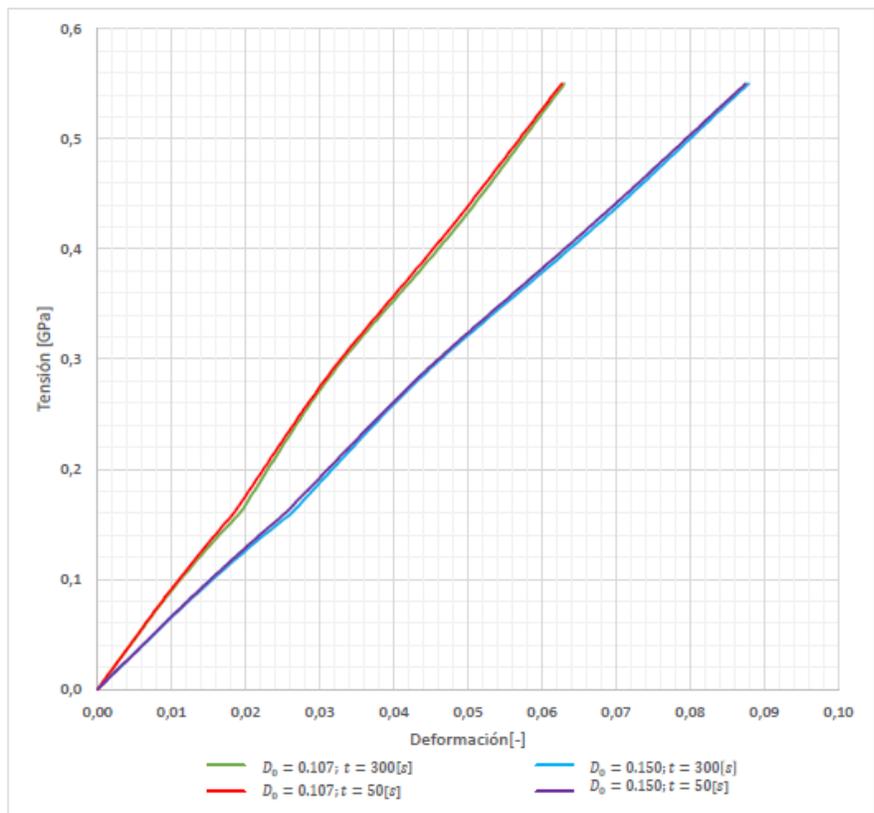


Figura 4.3: Gráfico tensión-deformación del modelo hasta 60%MBL, con variación de D_0 y tiempo.

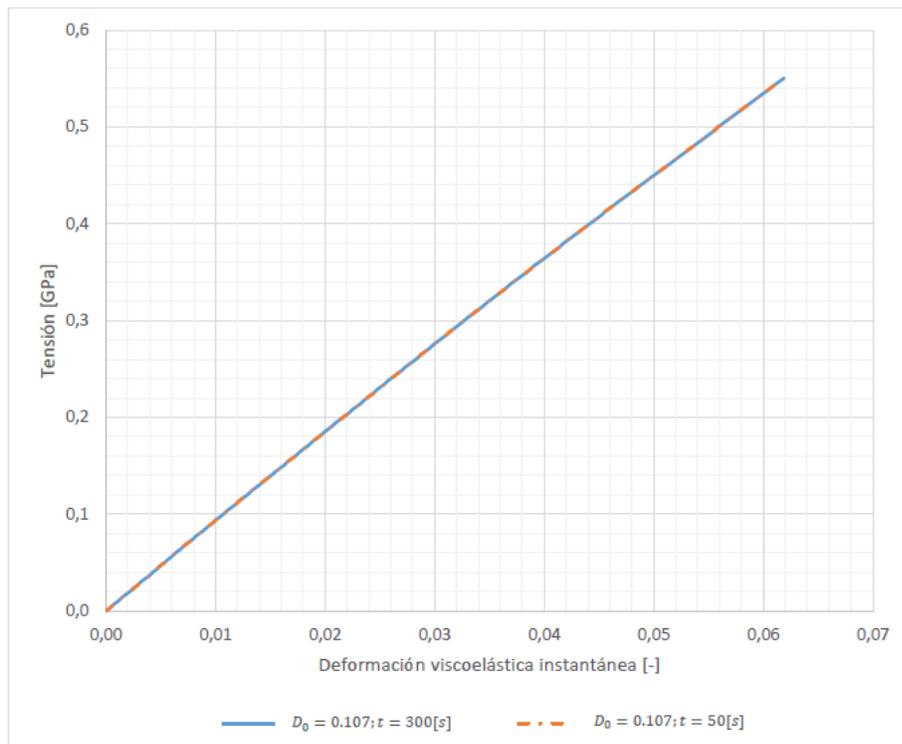


Figura 4.4: Gráfico tensión versus deformación viscoelástica instantánea, con variación de tiempo.

4.1.2. Análisis de la estructura interna

Dado que es suficiente implementar el modelo de los componentes del cable con la deformación viscoelástica instantánea, se puede hacer una comparación entre dicha expresión y la ley de Hooke, donde se obtiene una relación entre el módulo de elasticidad del material y los parámetros D_0 y g_0 del modelo de Huang et al., 2014, el cual está dado por la ecuación (4.3). La Figura 4.5 es un acercamiento de las curvas del Apéndice 2, en donde se muestra la relación entre el módulo elástico con respecto a la tensión aplicada. El módulo elástico es determinado de forma experimental a partir de la base de datos de sub-cables 1, 2 y 3, y de las fibras 1, 2 y 3. De igual forma, la Figura 4.6 muestra las curvas del módulo elástico con respecto a la deformación que adquiere el material de poliéster.

$$E = \frac{1}{D_0 g_0} \quad (4.3)$$

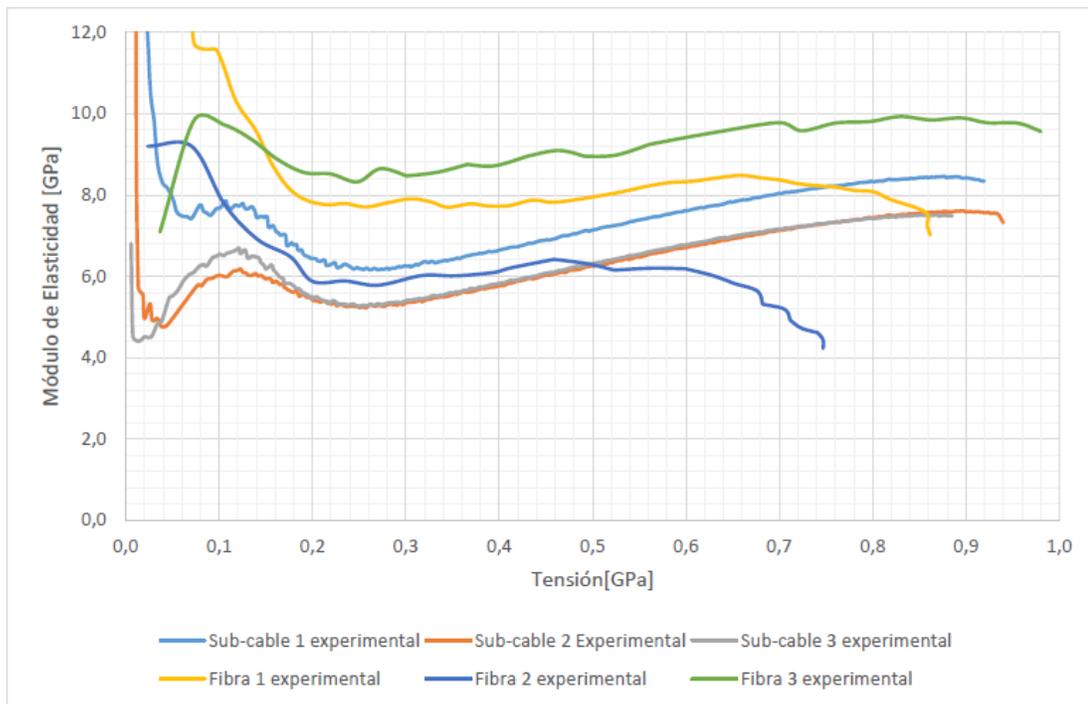


Figura 4.5: Gráfico módulo de elasticidad con respecto a la variación de tensión aplicada a componentes del cable.

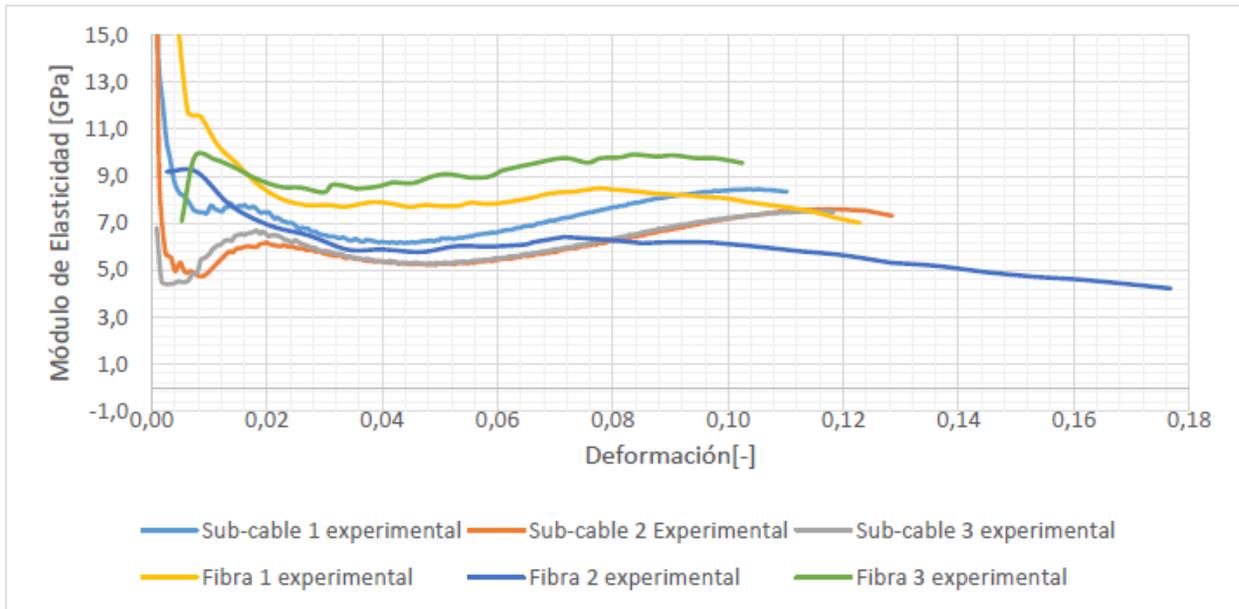


Figura 4.6: Gráfico del módulo de elasticidad con respecto a la deformación total de componentes del cable.

La Figura 4.7 muestra la relación que tiene el módulo de elasticidad con respecto a la deformación y con respecto a la carga aplicada, para dos materiales distintos (PEN y PET). En este trabajo de título, sólo se estudia el comportamiento de PET. Al comparar la curva de PET con las curvas de la Figura 4.6 se puede notar que existe una etapa de disminución del módulo de elasticidad, hasta el 2,5% de deformación, aproximadamente, luego, al aumentar la carga, y por lo tanto la deformación, aumenta la rigidez del material. Todas las curvas presentan un peak hasta el 7-8%, y posterior a eso tienen un leve descenso hasta la ruptura, lo cual tiene su explicación en que después de dicho peak el material presenta daño en su estructura interna.

Lechat et al., 2011, explica que la evolución del módulo de elasticidad durante la prueba de tracción se puede describir en tres etapas entre las que se encuentra la primera pendiente decreciente asociada al movimiento de fases amorfas, la segunda etapa que corresponde al aumento del módulo hasta alcanzar un peak producto de la carga que recibe el material y del aumento de la fase cristalina, y finalmente, la tercera etapa corresponde a la disminución del módulo hasta la ruptura lo que podría deberse a que las cadenas macromoleculares se deslizan o fallan. Las curvas que presentan un incremento del módulo al iniciar el ensayo de tracción pueden tener su explicación en la fricción interna del material.

Además, las macromoléculas se agrupan en fibrillas las cuales tienen una alternancia de zonas cristalinas y amorfas. Las fibrillas se unen mediante una fase amorfa interfibrilar que está ligeramente orientada a lo largo del eje de la fibra, llamada fase mesomórfica como lo muestra la Figura 4.8 (a). El modelo Microestructural de las fases del poliéster se representan en la Figura 4.8 (b), donde X_C es la fase cristalina, X_{ai} es la fase amorfa (o fase amorfa isotrópica) y X_{ao} es la fase mesomórfica (o fase amorfa orientada).

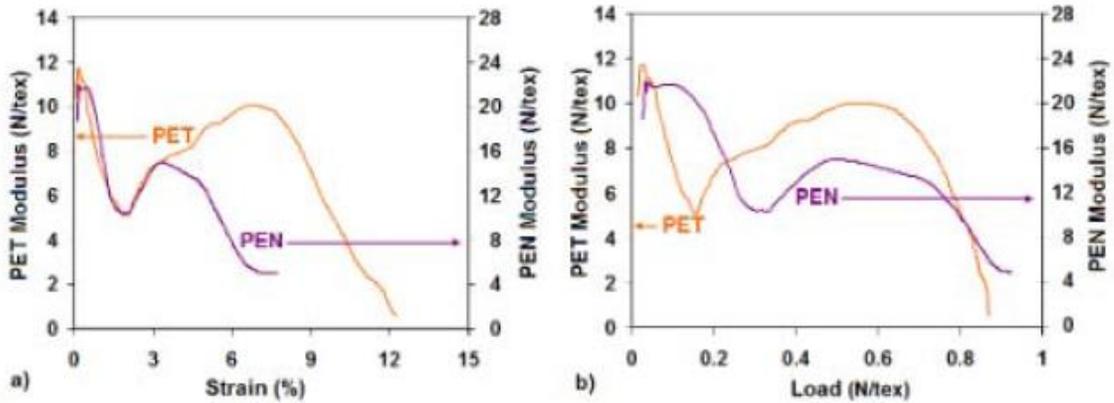


Figura 4.7: Evolución del módulo elástico para curvas de PET y PEN con respecto a (a) deformación y (b) carga (Lechat et al., 2011).

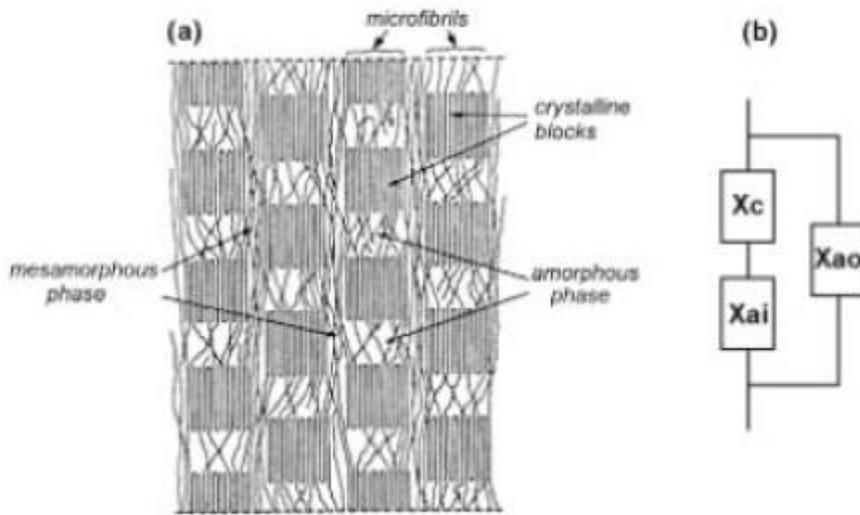


Figura 4.8: (a) Morfología Microestructural de fibras de poliéster. (b) Modelo esquemático (Lechat et al., 2011).

4.1.3. Estudio de parámetros del modelo

Debido a que la deformación viscoelástica instantánea es el término que controla el comportamiento de los componentes de un cable de poliéster, se realiza un estudio de los dos parámetros contenidos en éste término, es decir, D_0 y g_0 .

Al considerar una tensión entre 0 y 1[GPa], el valor de g_0 dado por el polinomio de la Tabla 3.1, toma valores entre 0.99 y 1.05. Sin embargo, el rango de valores que toma este parámetro, de forma experimental, es mucho más amplio. La ecuación (4.4) se obtiene al despejar g_0 de la expresión (4.1), y con ella es posible determinar los valores experimentales del parámetro en estudio.

$$g_0 = \frac{\varepsilon}{D_0 \sigma} \quad (4.4)$$

La variable ε es la deformación experimental, σ es la tensión axial experimental y D_0 es el parámetro asociado a la flexibilidad, el cual queda previamente definido. La Figura 4.9 muestra las curvas que resultan de las bases de datos experimentales, obtenidos de ensayos de ruptura para tres sub-cables, los cuales pertenecen a un cable de nueve elementos (ver Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6), y de tres fibras de cables de poliéster (ver Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3).

Notar que el comportamiento de estas curvas es similar pero opuesto al comportamiento que tiene el módulo de elasticidad con respecto a la tensión. Esto se debe a que el módulo de elasticidad es igual al inverso de $D_0 g_0$ (ver ecuación (4.3)), pero D_0 es una constante. Al comparar las Figura 4.5 y Figura 4.9, cuando se aplica un tensión entre $0.1 [GPa]$ y $0.25 [GPa]$, el módulo de elasticidad desciende mientras que el valor de g_0 aumenta hasta alcanzar un peak y luego éste disminuye producto de la falla que comienza a ocurrir a nivel de estructura interna. Por lo tanto, los resultados obtenidos en estas gráficas validan la expresión (4.3).

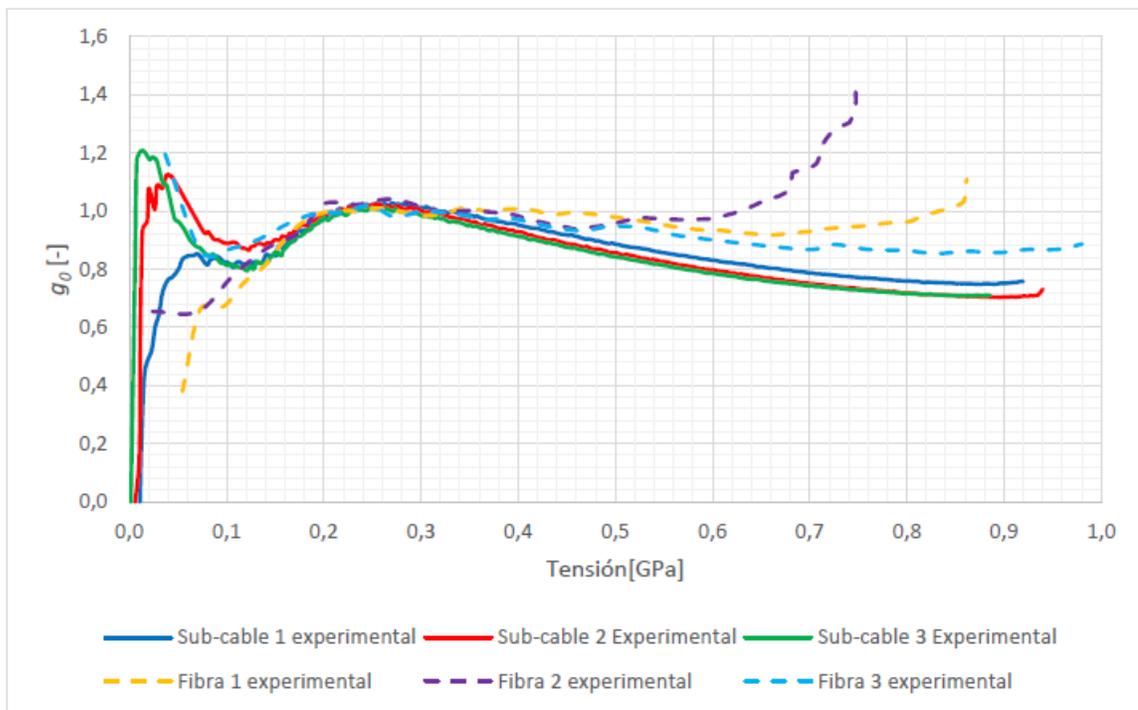


Figura 4.9: Gráfico g_0 con respecto a la tensión experimental de los componentes del cable.

Por otro lado, la Tabla 3.1 (Huang et al., 2014) y la Tabla 3.2 (Huang et al., 2015) tienen representaciones distintas para el valor de g_0 , por lo que la Figura 4.10 muestra gráficamente la diferencia entre ambas expresiones (hasta el 60%MBL) y los datos experimentales de tres sub-cables y tres fibras de poliéster (hasta el 100%MBL). El peak del valor adquirido por g_0 se obtiene para tensiones cercanas a $0.25 [GPa]$, por lo que en

este punto se hace una comparación para todas las curvas. Las curvas experimentales tienen variaciones inferiores al 1% entre ellas, mientras que la curva del modelo con g_0 polinomial tiene una diferencia de 1.1% y la curva del modelo con g_0 exponencial presenta variaciones de 62.4% para una tensión de 0.25 [GPa], por lo que esta última queda fuera del análisis de este trabajo de título debido a que no representa el comportamiento de este parámetro en el material.

Otra forma de notar que los parámetros no lineales dados por Huang et al, 2015, difieren notoriamente de la respuesta obtenida para los componentes de cables de poliéster vírgenes de ciclado, es analizar la Figura 4.11, donde se muestra gráficamente la evolución de la deformación para cada nivel de tensión, en la cual se incluye el modelo con g_0 de la Tabla 3.1 y de la Tabla 3.2. El modelo con g_0 polinomial puede ser una buena representación del comportamiento del poliéster, sin embargo, la curva con g_0 exponencial muestra una curva con pendiente mucho más rígida que el resto de ellas.

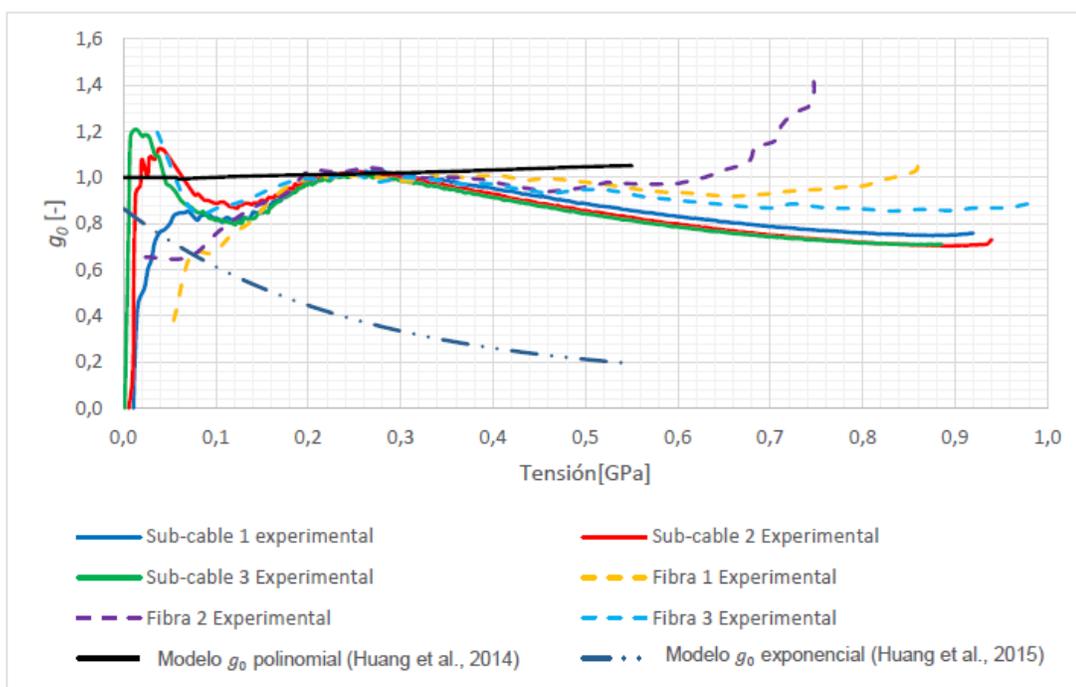


Figura 4.10: Gráfico comparativo para g_0 dado por Huang et al., 2014 y g_0 dado por Huang et al., 2015.

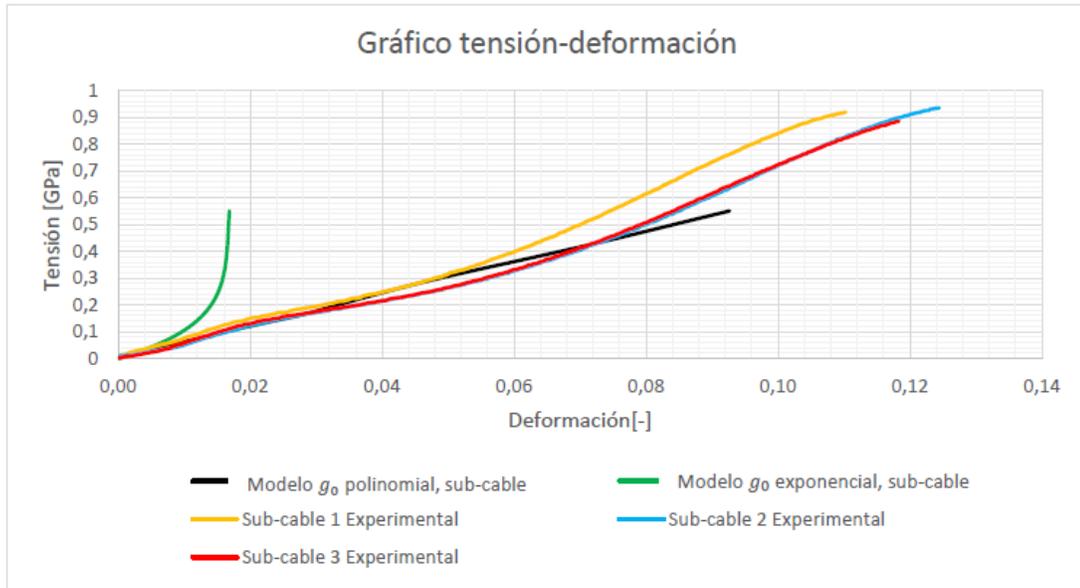


Figura 4.11: Gráfico tensión-deformación de sub-cables con g_0 polinomial y exponencial, y datos experimentales.

Para el resto del análisis se puede considerar el parámetro g_0 dado por Huang et al., 2014, o bien, se puede obtener una expresión a partir de los datos experimentales de los componentes del cable. La máxima diferencia que existe entre los valores de las curvas experimentales de los tres sub-cables es de 5.1%, por lo que no genera mayor impacto los datos que se utilicen para este propósito. La Figura 4.12 muestra la curva de datos experimentales g_0 versus tensión del sub-cable 1, donde se excluyen los datos iniciales debido a que éstos solo reproducen una inestabilidad del material producto del reordenamiento de la estructura interna. Luego, la expresión de g_0 para los componentes de un cable de poliéster está dada por la Tabla 4.1.

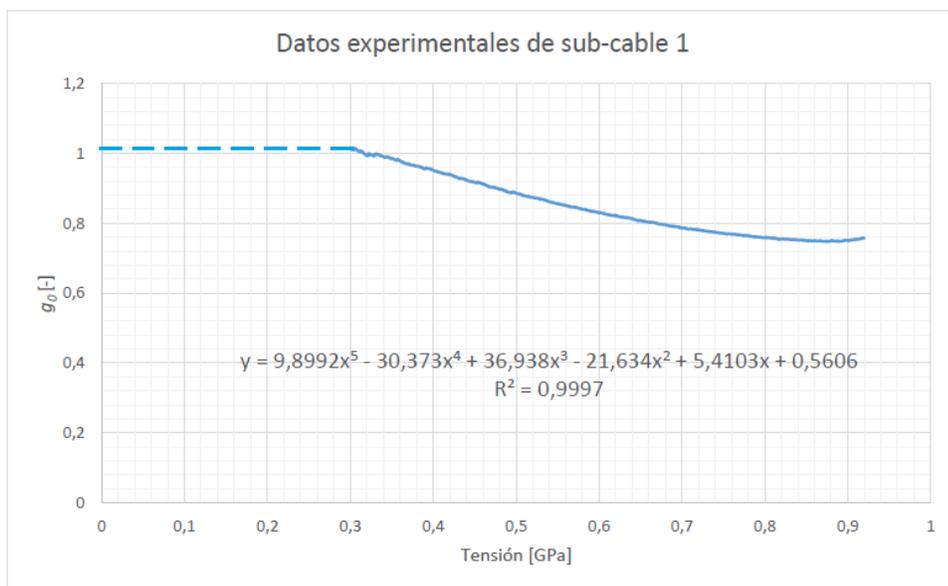


Figura 4.12: Obtención del polinomio de g_0 a partir de datos experimentales de sub-cable 1.

Tabla 4.1: Parámetro g_0 para respuesta de cables.

Clasificación	$g_0(\sigma)$
$\sigma < 30\%MBL$	1,022
$\sigma \geq 30\%MBL$	$9.899\sigma^5 - 30.373\sigma^4 + 36.938\sigma^3 - 21.634\sigma^2 + 5.4103\sigma + 0,5606$

Por otro lado, en la Figura 4.13 se presentan cuatro curvas, las cuales corresponden al modelo para ensayo de ruptura con distintos D_0 (0.107, 0.120, 0.135 y 0.150, respectivamente), donde el eje de las abscisas esta simulada como $\sigma(t) = p \cdot t$, donde $p = \sigma_r/t$ es la pendiente de la curva tensión versus tiempo, t es el tiempo y σ_r es la carga de ruptura dada por la tensión máxima de los datos experimentales de la subcuerda 1; el eje de las ordenadas corresponde a la deformación total dada por la expresión (3.1) de la curva de capacidad. Como se mostró en el análisis de la estructura interna, a medida que el valor de D_0 disminuye, la pendiente de la curva tensión-deformación aumenta, lo que indica una rigidización del material. Por lo tanto, la constante D_0 no es única en un material y su valor depende de las condiciones de ciclado en las que se encuentre previamente el elemento.

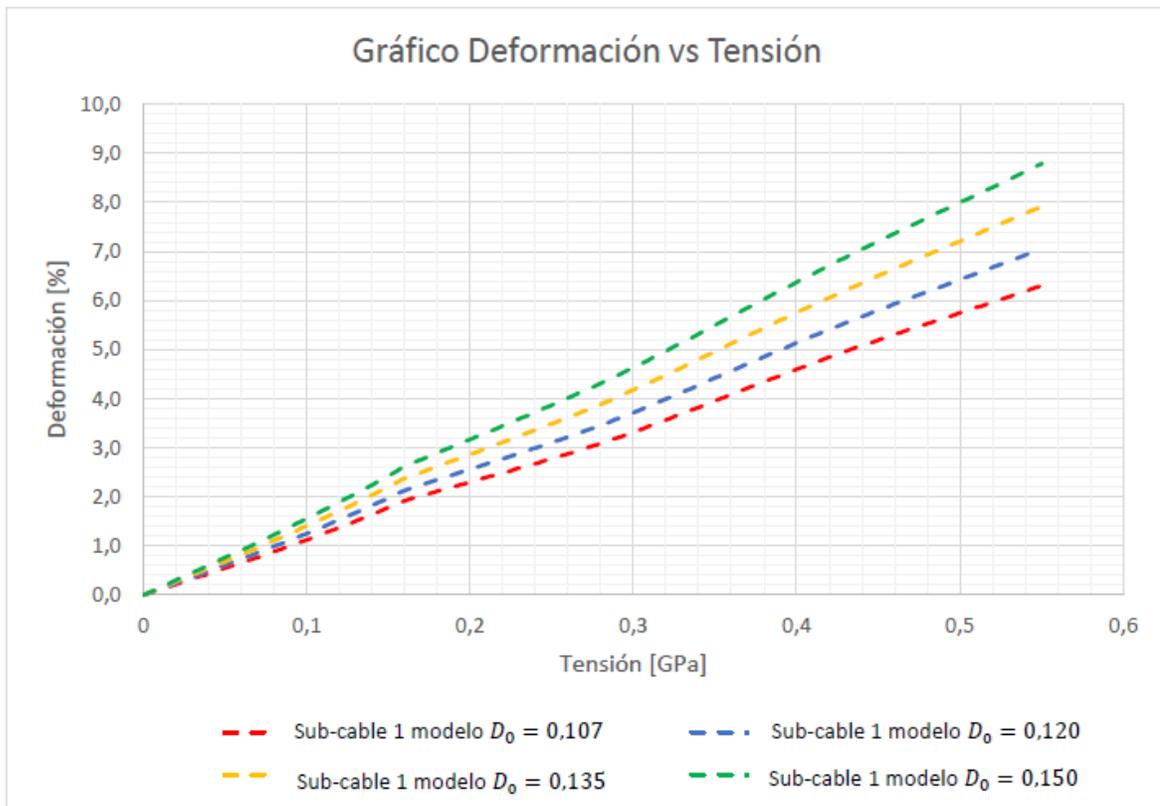


Figura 4.13: Gráfico tensión versus deformación de simulación del modelo con distintos D_0 .

Una manera de determinar D_0 es a partir de los datos experimentales de un ensayo de tracción hasta la ruptura. Con estos datos se determina D_{0_i} de la ecuación (4.5), donde $i = 1, \dots, k$, con k el número total de datos, es decir, se determina el valor de D_0 para cada

valor medido del ensayo. Luego, D_0 del material corresponde al promedio de D_{0i} una vez que el módulo de elasticidad o g_0 se estabiliza. Por ejemplo, en la Figura 4.9 las curvas g_0 versus tensión estabilizan su comportamiento para tensiones entre 0.25[GPa] y 0.30 [GPa]. Así, D_0 es el promedio de D_{0i} para dicho rango de tensiones.

$$D_{0i} = \frac{\varepsilon(t)_i}{\sigma(t)_i} \quad (4.5)$$

Luego, los valores calculados para los datos experimentales de los sub-cables y los cables de nueve elementos, y las fibras ensayadas se presentan en la Tabla 4.2. En ella se muestra una disminución de la rigidez a medida que aumenta el tamaño del elemento en estudio. Cabe notar que la tabla no muestra los valores D_0 de los cables R_1 , R_2 y R_3 , ya que en este caso no se tiene el valor de σ y el campo de tensiones no es el mismo en todos sus elementos constituyentes.

Tabla 4.2: Valores determinados de D_0 .

Elemento	Diámetro [mm]	D_0 [1/GPa]
Fibra 1 Experimental	$(22,9 \pm 0,9)10^{-6}$	0,129
Fibra 2 Experimental	$(22,9 \pm 0,9)10^{-6}$	0,166
Fibra 3 Experimental	$(22,9 \pm 0,9)10^{-6}$	0,118
Sub-cable 1	2,8	0,158
Sub-cable 2	2,8	0,187
Sub-cable 3	2,8	0,188
Cable Experimento A	6,1	0,215
Cable Experimento B	6,1	0,215
Cable Experimento C	6,1	0,215
Cable Experimento D	6,1	0,215

4.1.4. Análisis de sensibilidad paramétrico del modelo

La modificación en la respuesta que se obtiene del modelo ante la variación de los parámetros no lineales es importante para conocer la sensibilidad del modelo. Por esta razón, se realiza un análisis de éste cuando se varía g_0 , g_1 , g_2 , D_p y m . Dado que el modelo cuyos parámetros se consideran válidos en este análisis son los definidos por Huang et al., 2014, los parámetros que se consideran para este estudio son los de la Tabla 3.1.

El valor de g_0 dado por Huang et al., 2014, es igual a 1 y luego aumenta levemente, por lo que el análisis de sensibilidad del modelo ante la variación de dicho parámetro toma valores iguales a 1, 1.5 y 2, como se muestra en la Figura 4.14. Debido a que la deformación viscoelástica instantánea (ε_{ve1}) es el término que gobierna el comportamiento del material, la variación de la deformación total del modelo es

proporcional a la variación de g_0 debido a que el resto de los variables de ε_{ve1} son constantes para cada nivel de tensión. Es decir, mientras mayor sea la variación de g_0 , mayor es la variación de la deformación total con respecto a la tensión $\sigma(t)$. En cambio, el modelo es poco sensible a la variación de g_1 , como se muestra en la Figura 4.15, debido a que la influencia del segundo factor de la deformación viscoelástica (ε_{ve2}) es pequeña. Cabe notar que la mayor sensibilidad del modelo producto de la variación de g_1 ocurre entre 10 – 23%MBL

Por otro lado, g_2 es el parámetro del efecto de la tasa de carga sobre la respuesta de la fluencia, por lo que el cambio de g_2 afecta en mayor medida cuando se alcanza el 20%MBL, en donde se produce un salto en la deformación.

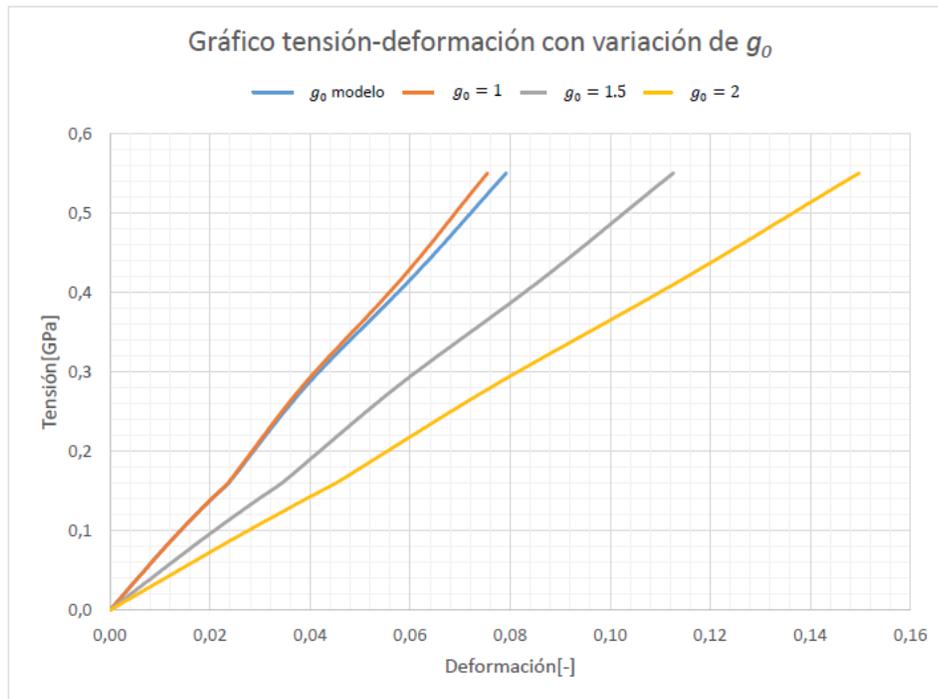


Figura 4.14: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación del parámetro g_0 .

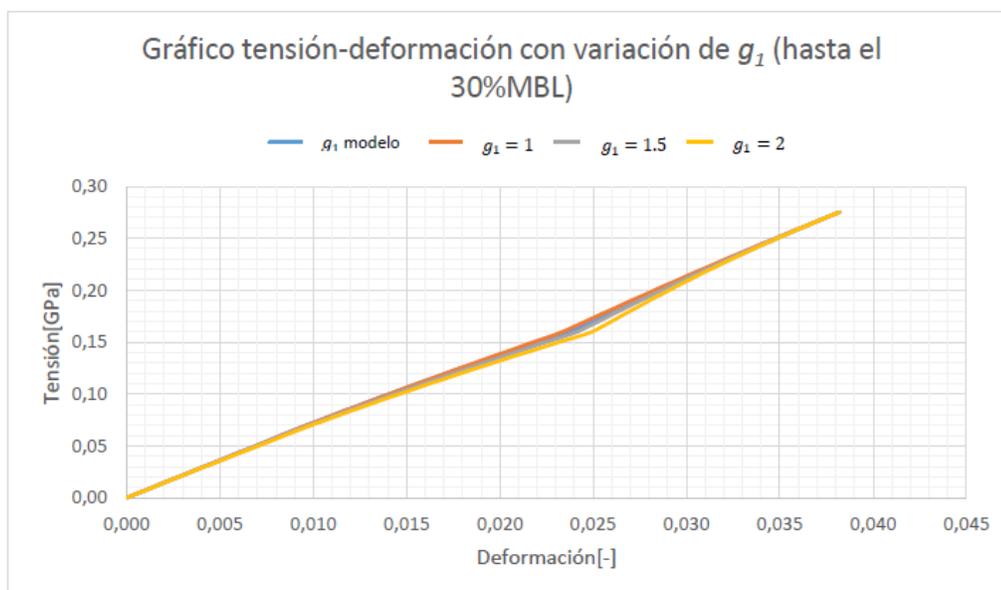


Figura 4.15: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación de g_1 .

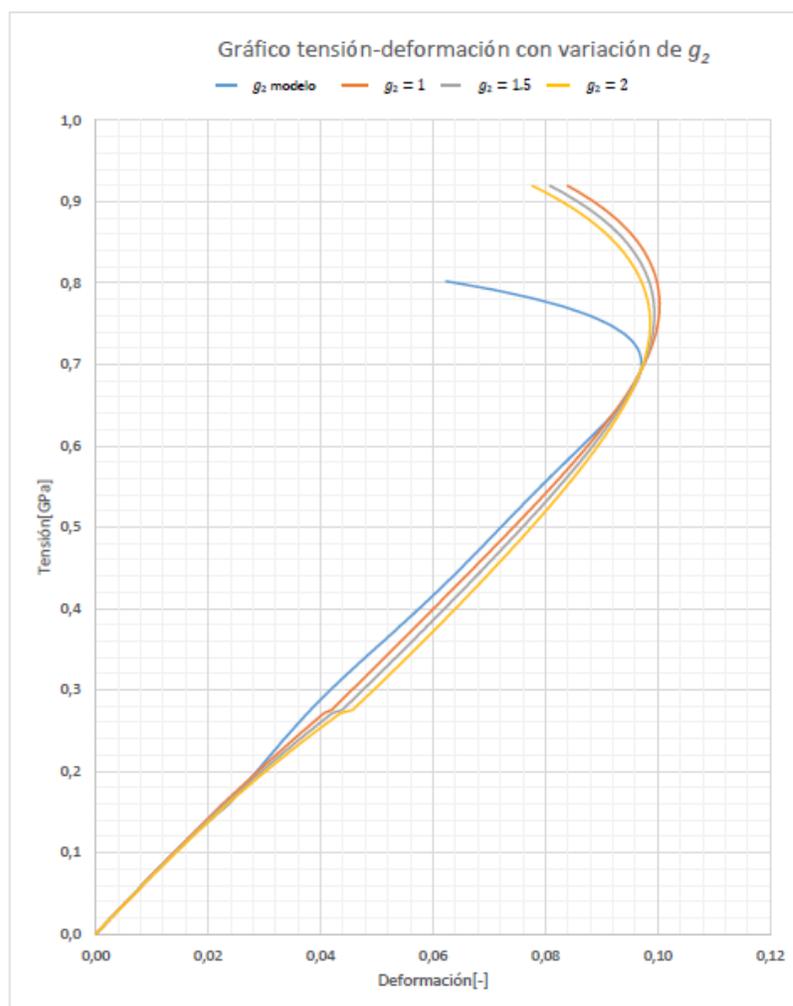


Figura 4.16: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación de g_2 .

A pesar de que la deformación viscoplástica (ε_{vp}) tiene un bajo impacto en la deformación total, como se muestra en la Figura 4.1, se hace un análisis de sensibilidad de sus parámetros no lineales (D_p y m) para conocer la influencia de la variación de éstos. La Figura 4.17 muestra las curvas tensión-deformación para valores de D_p igual a 0.002, 0.01 y 0.02. Si se mantiene el resto de las variables constante y se aumenta el valor de D_p , la deformación aumenta. De igual forma, la Figura 4.18 presenta la sensibilidad del modelo con respecto a la variación de m para valores de 0.025, 0.1 y 0.2. Ambos parámetros (D_p y m) son no nulos para una tensión mayor a 20%MBL por lo que la sensibilidad del modelo se presenta posterior a la aplicación de dicha magnitud de carga. Notar que la deformación aumenta para cada nivel de tensión, proporcional al aumento de sus parámetros no lineales. El modelo presenta mayor sensibilidad a la variación de m que de D_p .

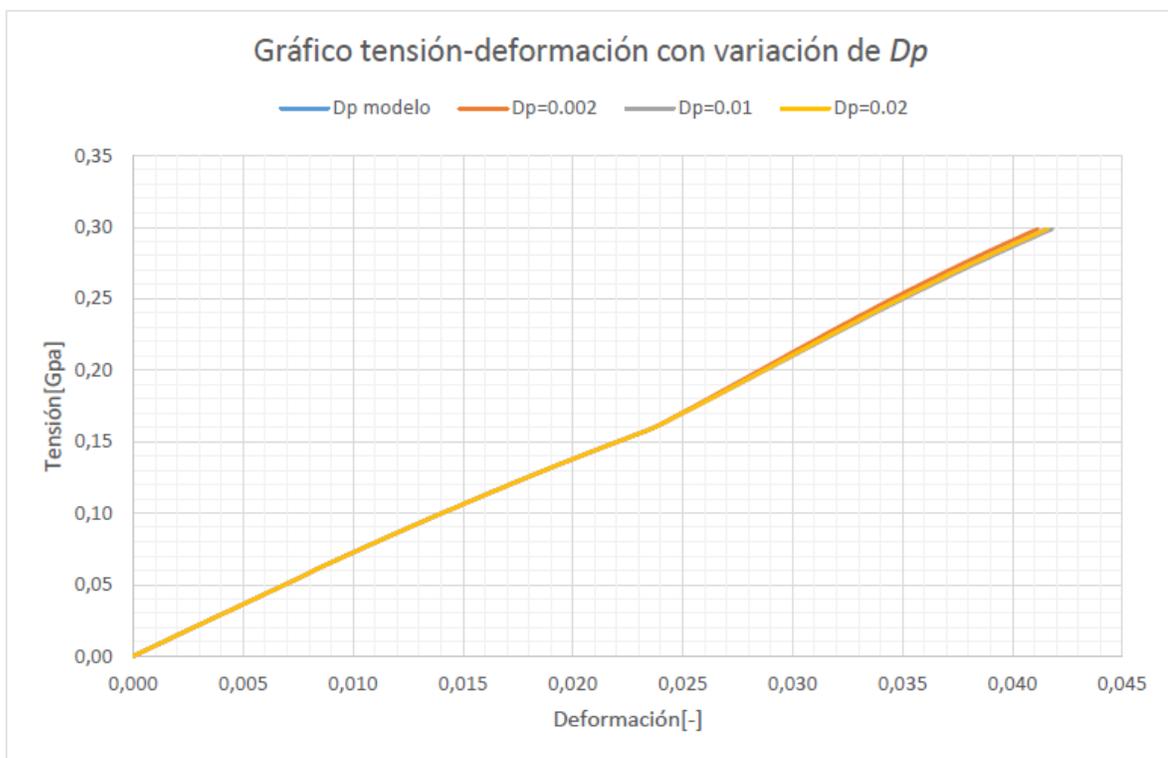


Figura 4.17: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación D_p .

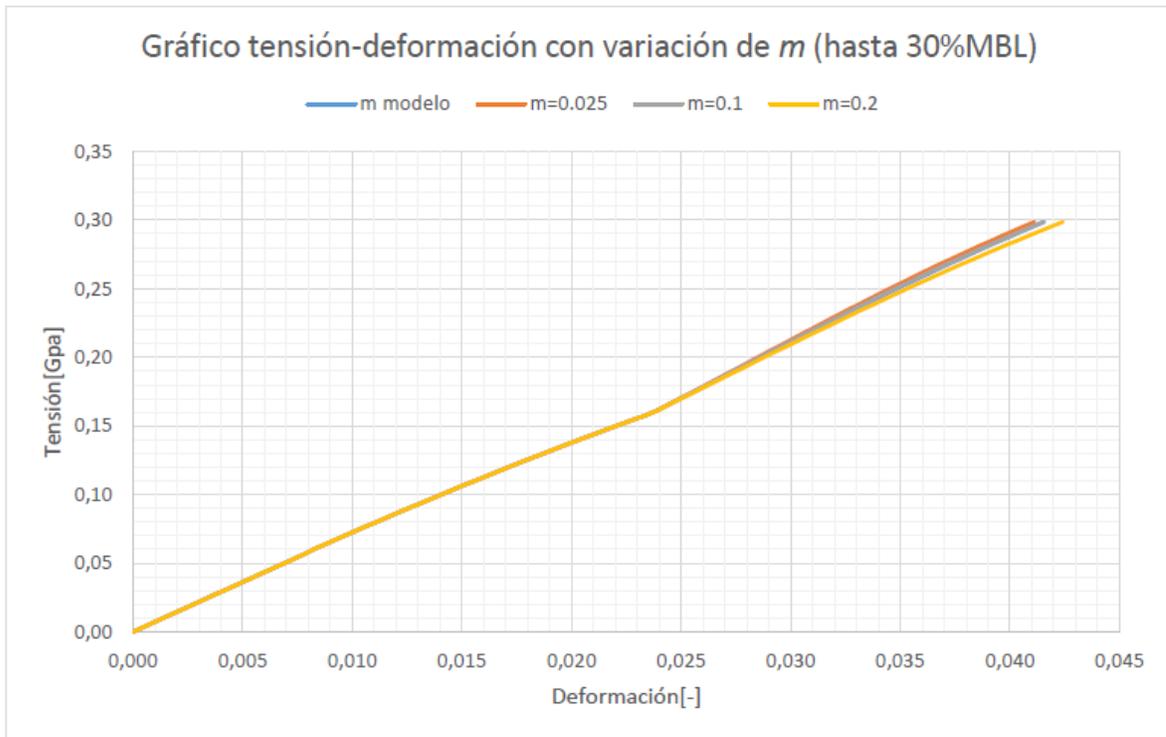


Figura 4.18: Gráfico tensión-deformación del modelo con variación del parámetro m .

4.1.5.Carga Sinusoidal – modelo de Huang et al., 2014

Wibner et al., 2003, considera que el protocolo de prueba de un cable para carga sinusoidal consta de dos etapas. La primera de ellas corresponde a una carga monotónica del cable hasta alcanzar una magnitud de carga previamente definida. La segunda etapa consiste en aplicar inmediatamente después, una carga cíclica con una amplitud A . La Figura 4.19 es un ejemplo de la tensión aplicada en el tiempo, para un ensayo de carga cíclica de 900 ciclos. La tensión de la curva monotónica (primera etapa) está dada por la ecuación (4.6) donde p es la pendiente del ensayo de ruptura y t es el tiempo de carga. La carga sinusoidal se obtiene al reproducir la expresión (4.7) donde σ_m [GPa] es la tensión media, la cual es la tensión final de la primera parte del ensayo que corresponde al 40%MBL, A [GPa] es la amplitud de la onda sinusoidal equivalente al 15%MBL, N es el número de ciclos, t_m [s] es el tiempo final de la carga lineal aplicada al cable, t_s [s] es el tiempo total de la carga sinusoidal dado por la ecuación (4.8). En dicha expresión, T [s] corresponde al periodo de cada ciclo equivalente a 48 [s].

$$\sigma(t) = p \cdot t \quad (4.6)$$

$$\sigma(t) = \sigma_m + A \cos \left[2\pi N \frac{(t - t_m)}{t_s} \right] \quad (4.7)$$

$$t_s = N \cdot T \quad (4.8)$$

Cabe notar que t_m es proporcional a σ_m , por lo que t_m equivale al 40% del tiempo de ruptura en el ensayo de capacidad.

El análisis de carga sinusoidal se hace con los parámetros no lineales de la Tabla 3.1. Huang et al., 2014 considera que algunos de estos parámetros son constantes debido a que afectan el comportamiento del material de fibra sintética y no logra reproducir un ensayo experimental de carga cíclica.

La Figura 4.20 es la representación gráfica de la variación de g_1 de la Tabla 3.1, para 10 ciclos de carga, donde éste alcanza valores entre 0.8 y 2.5, es decir, su variación con respecto al tiempo es alta, en comparación a la variación del resto de los parámetros. Luego, $d\varepsilon/dt$ es grande, debido a que g_1 es un ponderador del segundo término de la deformación viscoelástica como se muestra en la ecuación (4.2). Por esta razón, si g_1 obedece al polinomio de la Tabla 3.1 la acumulación de deformación es más grande de lo esperado en el ensayo experimental de la Figura 4.23, obteniendo como producto la curva de la Figura 4.22. Por lo tanto, g_1 se considera constante y unitario.

De igual forma, los parámetros no lineales de deformación viscoplástica, D_p y m , tienen impacto en la deformación acumulada. La Figura 4.21 presenta la variación de m y D_p , según la expresión polinómica de la Tabla 3.1. Como se presentó en el análisis de sensibilidad paramétrica, la variación de m tiene mayor impacto en los resultados del modelo, por esta razón, se simplifica D_p y se considera igual al máximo valor que adquiere en la Figura 4.21, es decir, $D_p = 0.0217$. En resumen, la Figura 4.24 es la simulación de un ensayo de carga sinusoidal considerando $g_1 = 1$, $D_p = 0.0217$ y el resto de los parámetros no lineales corresponden a las expresiones de la Tabla 3.1.

La curva mostrada en la Figura 4.23 corresponde a un ensayo experimental de carga sinusoidal, donde se puede notar que la carga monotónica tiene una pendiente distinta a la pendiente adquirida durante la aplicación de la carga cíclica. Esto se debe a que la magnitud máxima aplicada afecta a la estructura interna, donde se produce un cambio de fase amorfa a fase cristalina, lo cual se traduce en un cambio de rigidez entre la primera parte del ensayo (carga monotónica hasta una tensión media de 40%MBL) y la carga sinusoidal (con amplitud de 15%MBL). Por otro lado, los primeros bucles de carga cíclica presentan tres pendientes diferentes (p_1 , p_2 y p_3), en cambio, en el ciclo 900 la pendiente de la curva es única (p_4). Estos cambios de pendiente en su rigidez se deben a que el módulo de elasticidad varía para distintos niveles de carga. En la Figura 4.7(b), el módulo elástico para una carga cíclica de 25% – 55%MBL, se encuentra en la segunda etapa de la evolución del módulo de elasticidad (aumento de la fase cristalina). Cuando la tensión es igual al 55%MBL, la pendiente de la curva tensión-deformación de la Figura 4.23 es igual a p_1 . Cuando el cable se descarga hasta el 25%MBL, el módulo elástico disminuye por lo que la pendiente (p_3) es más flexible que p_1 . Con el aumento del número de ciclos, la pendiente de la curva se conserva a lo largo del proceso carga-descarga del material (p_4), lo cual tiene su respuesta en que la mayor parte de la fase amorfa ha cambiado a fase cristalina, logrando que la rigidez se estabilice.

Al comparar las curvas de la Figura 4.23 y Figura 4.24, se puede notar que esta última no muestra un cambio de rigidez entre la carga monotónica y carga sinusoidal, por lo que el modelo no captura la variación con respecto al aumento del número de ciclos.

La curva de la Figura 4.25 corresponde a una simulación de ensayo de carga sinusoidal considerando los mismos parámetros utilizados en la simulación de la Figura 4.24, excepto g_0 , el cual corresponde al polinomio de la Tabla 4.1. En este caso, g_0 se obtiene de datos experimentales de un ensayo de ruptura, por lo que se puede predecir de manera correcta el cambio de pendientes a lo largo del ensayo sinusoidal producto de la variación del módulo elástico. Comparando esta gráfica con la Figura 4.23, se obtiene que las pendientes en la Figura 4.25, son las que se presentan en la Tabla 4.3, donde hay un aumento de pendiente a medida que aumenta la tensión aplicada, es decir, aumenta la rigidez con el aumento de la tensión. Sin embargo, cabe notar que el cambio de pendiente en la carga cíclica es idéntico para todos los ciclos de carga, lo que se traduce en que independientemente de la expresión utilizada para los parámetros, el modelo no simula el cambio de rigidez con respecto al número de ciclos.

Tabla 4.3: Valores de las pendientes p1, p2 y p3, según curva de la Figura 4.25.

Pendiente	Valor [GPa]
p1	16,9
p2	13,5
p3	10,2

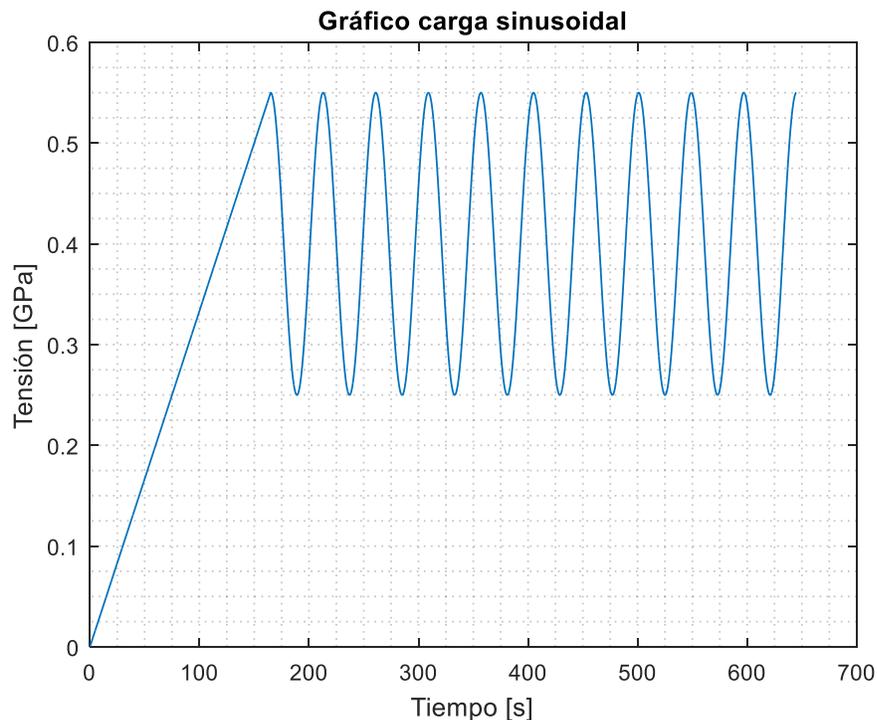


Figura 4.19: Gráfico de la tensión aplicada en el tiempo según el protocolo de ensayo de carga sinusoidal, 10 ciclos.

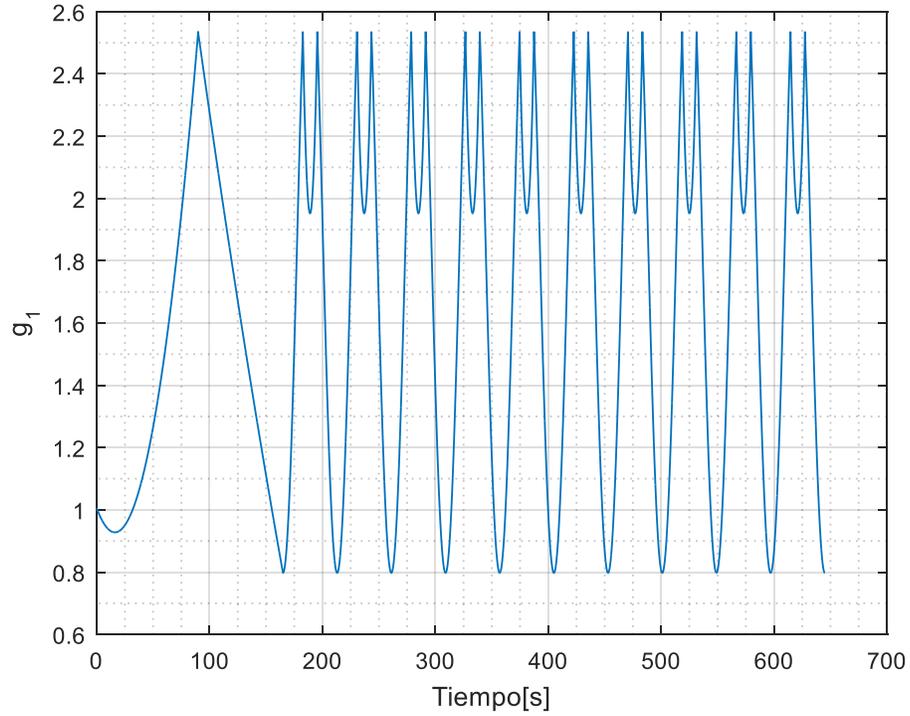


Figura 4.20: Gráfico de variación de g_1 en el tiempo, 10 ciclos.

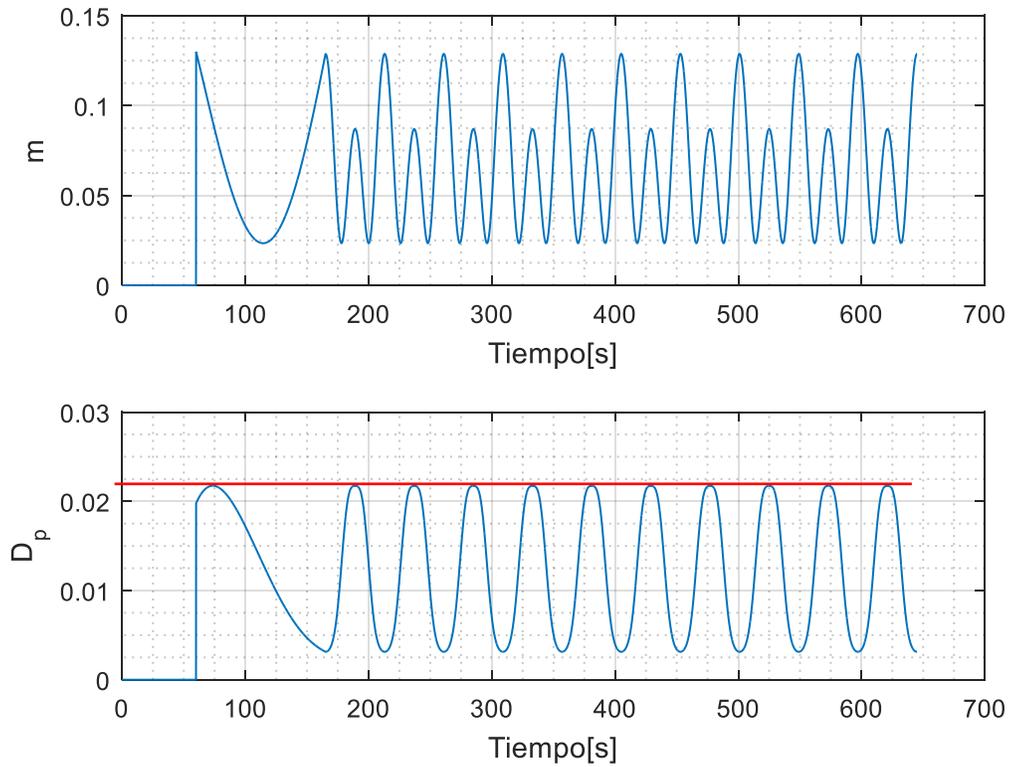


Figura 4.21: Gráfico de la variación de parámetros viscoplásticos, 10 ciclos.

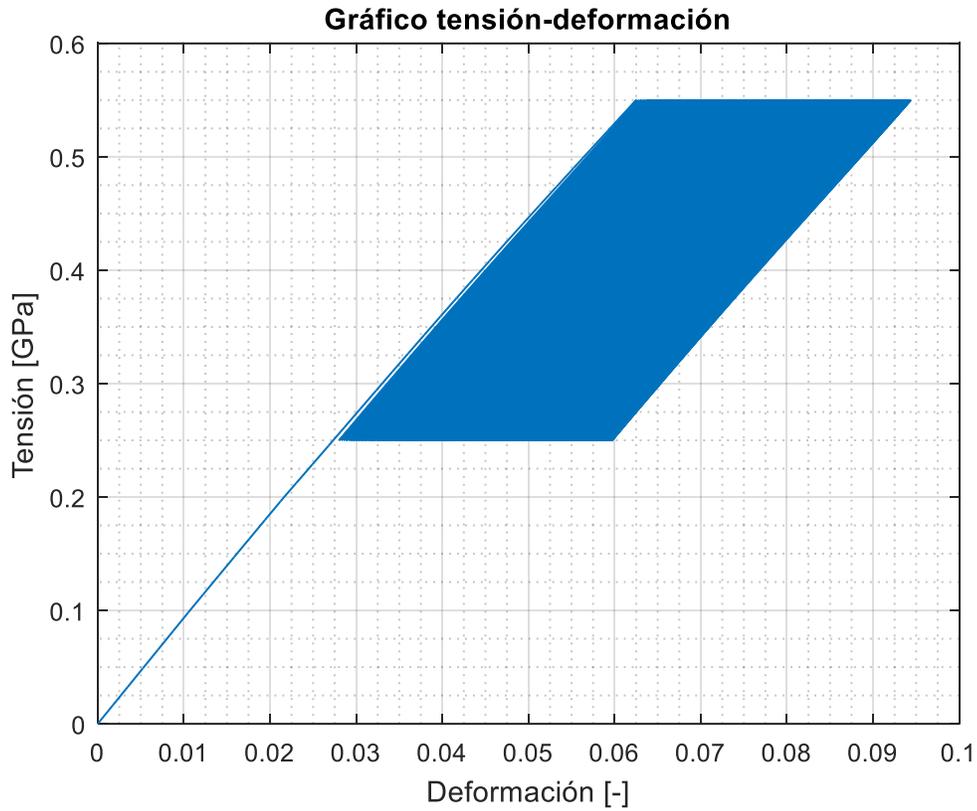


Figura 4.22: Gráfico tensión deformación del modelo, considerando g_1 de Tabla 3.1, para 900 ciclos.

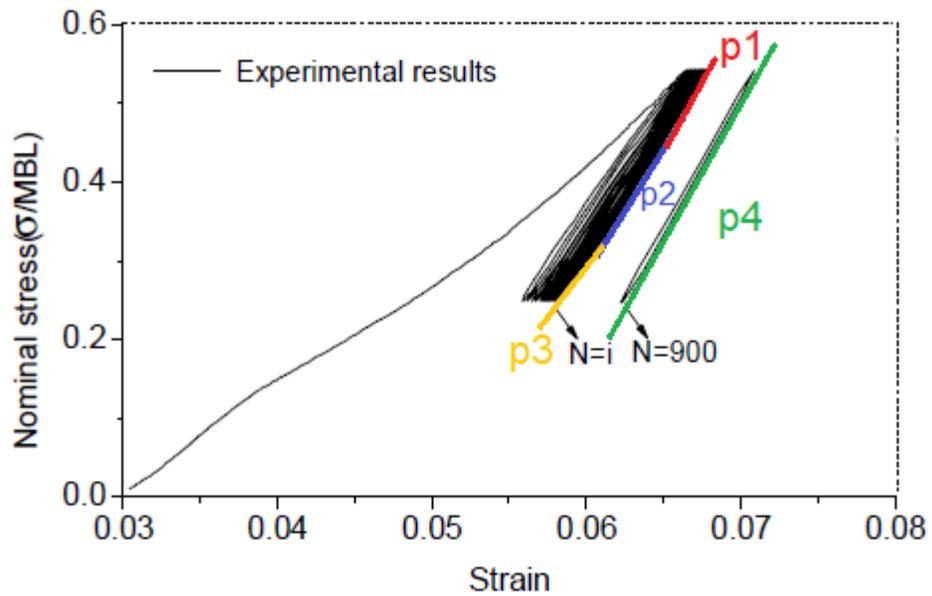


Figura 4.23: Relación tensión-deformación basados en resultados experimentales, 900 ciclos (Huang et al., 2014).

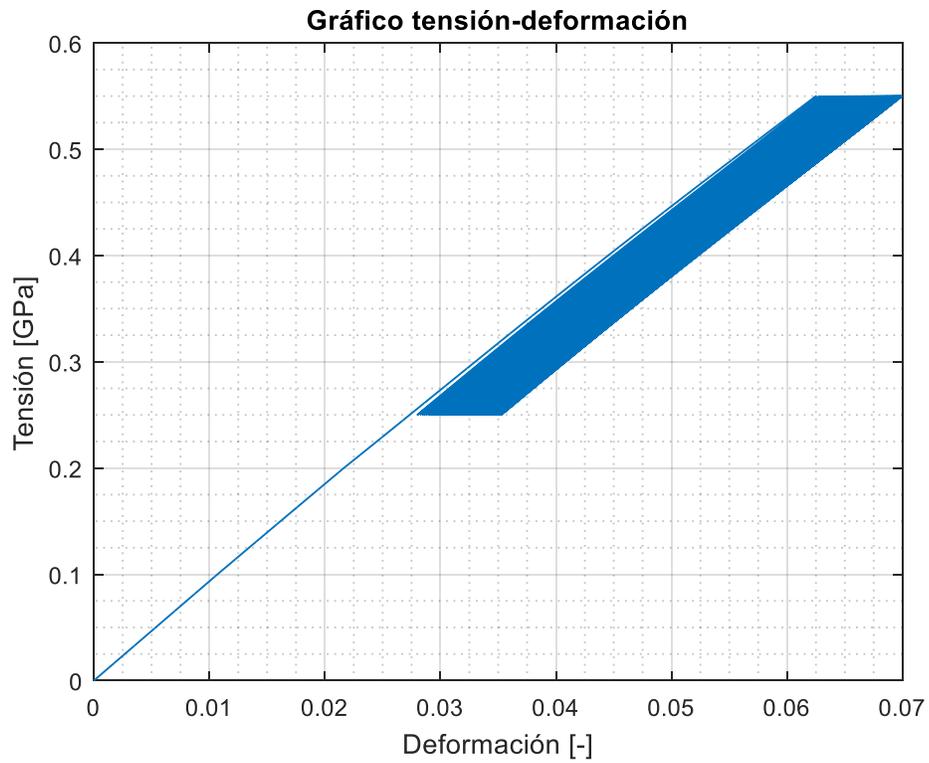


Figura 4.24: Relación tensión-deformación basado en resultados del modelo sinusoidal con 900 ciclos.

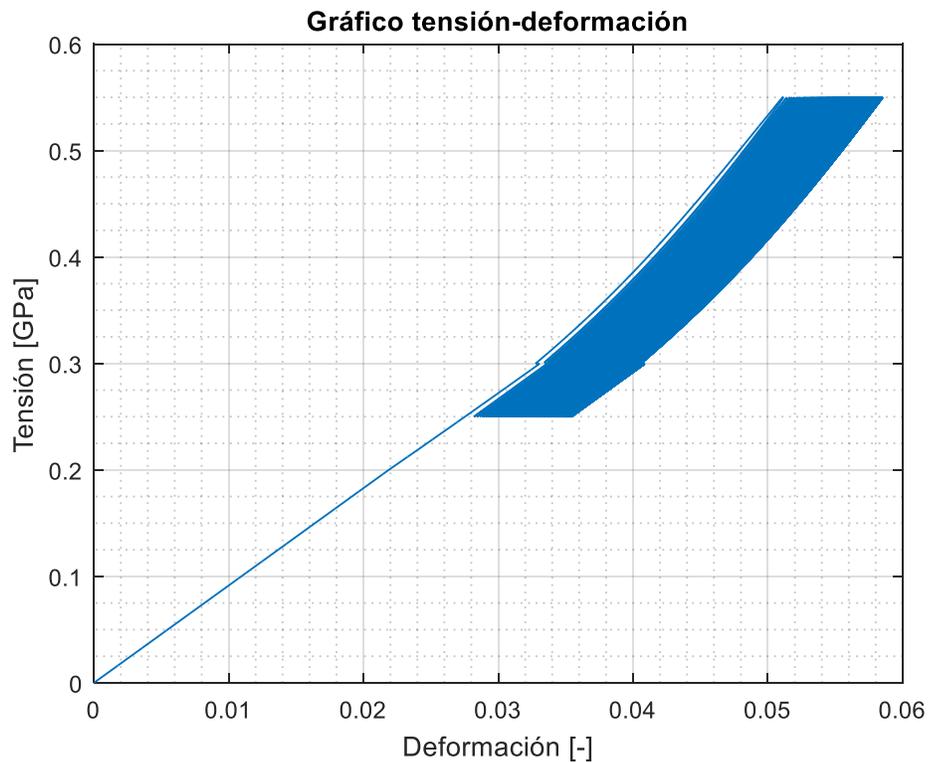


Figura 4.25: Gráfico tensión-deformación de ensayo de carga sinusoidal, con g_0 determinado dado en la Tabla 4.1, para 900 ciclos.

4.2. Estudio de fibra de poliéster

Los cables de poliéster tienen una gran cantidad de elementos entre sus componentes, los cuales se nombran desde el más grande al más pequeño de la siguiente manera: cable, sub-cable, hebra, hilos hasta llegar al elemento más pequeño denominado fibra.

Una ley constitutiva para un elemento se hace a partir del análisis de su unidad más pequeña, por lo tanto, a continuación se presenta una expresión que representa el comportamiento de la fibra dada por Beltrán, 2006.

$$T = T_{m\acute{a}x}(1,531x - 3,696x^2 + 6,894x^3 - 3,729x^4) \quad (4.9)$$

$$x = e_p / e_{p_{m\acute{a}x}} \quad (4.10)$$

donde $T[N]$ es la carga axial, $T_{m\acute{a}x}[N]$ es carga máxima la cual toma un valor de $81,4[N]$, x está dado por la ecuación (4.10), e_p es la deformación axial del elemento y $e_{p_{m\acute{a}x}}$ es la deformación axial máxima cuyo valor es de 13%. Además, el área transversal del elemento es de $0,089 [mm^2]$.

Para determinar el comportamiento de una fibra de poliéster se supone un vector de deformación con e_p constante y la deformación máxima conocida. Estos datos se reemplazan en la ecuación (4.9) y se obtiene la carga axial máxima la cual se divide en su área transversal, cuyo producto es la tensión. Al graficar los resultados, se obtiene la curva mostrada en la Figura 4.26 bajo el nombre de “ g_0 polinomio fibra”, la cual muestra un comportamiento similar al comportamiento presentado por los datos experimentales de sub-cables y está dentro de la variabilidad de curvas experimentales.

Notar que tanto en la Figura 4.26 como en la Figura 4.27 hay curvas que están graficadas hasta el 60%MBL, como las denominadas “Modelo g_0 Polinomial Huang ($D_0=0.158$)”, “Modelo g_0 polinomial Huang ($D_0=0.107$)” y “Modelo g_0 exponencial Huang ($D_0=0.4929$)”, y el resto de las curvas están graficadas hasta el 100%MBL debido a la diferencia que existe entre la validez de las expresiones de g_0 . Por ejemplo, el modelo de Huang, ya sea con g_0 polinomial o exponencial, describe su ley constitutiva considerándolo válido hasta el 60%MBL, ya que posterior a este valor las curvas adquieren valores que no son acorde al comportamiento del poliéster, como se muestra en el Apéndice 3, donde una de las curvas presenta deformaciones negativas y otra de las curvas tiene una variación pequeña de deformación a medida que aumenta la tensión como lo es el caso de la modelación con g_0 exponencial.

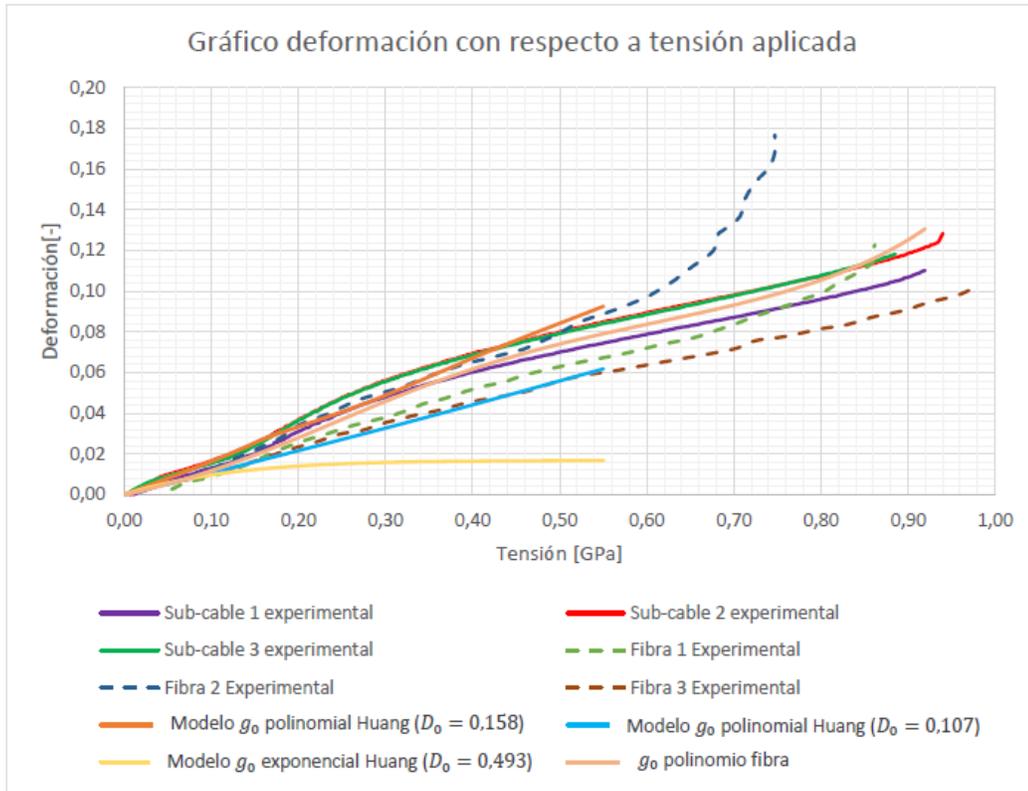


Figura 4.26: Gráfico deformación con respecto a variación de tensión para sub-cables y fibras de poliéster.

La Figura 4.27 muestra las curvas experimentales g_0 con respecto a la tensión de tres sub-cables y tres fibras de poliéster, además de las simulaciones del modelo con g_0 dado por Huang et al., 2014, por Huang et al., 2015, y g_0 determinado a partir de la ecuación (4.4) con los resultados obtenidos de la expresión (4.9) de fibra de poliéster. Ésta última, sigue la tendencia de los resultados experimentales y la expresión que define el comportamiento de una fibra está dada por la ecuación (4.11), la cual se determinó con un ajuste de curva.

$$g_0(\sigma) = 9.116\sigma^6 - 34.079\sigma^5 + 49.74\sigma^4 - 31.623\sigma^3 + 6.0445\sigma^2 + 1.216\sigma + 0.607 \quad (4.11)$$

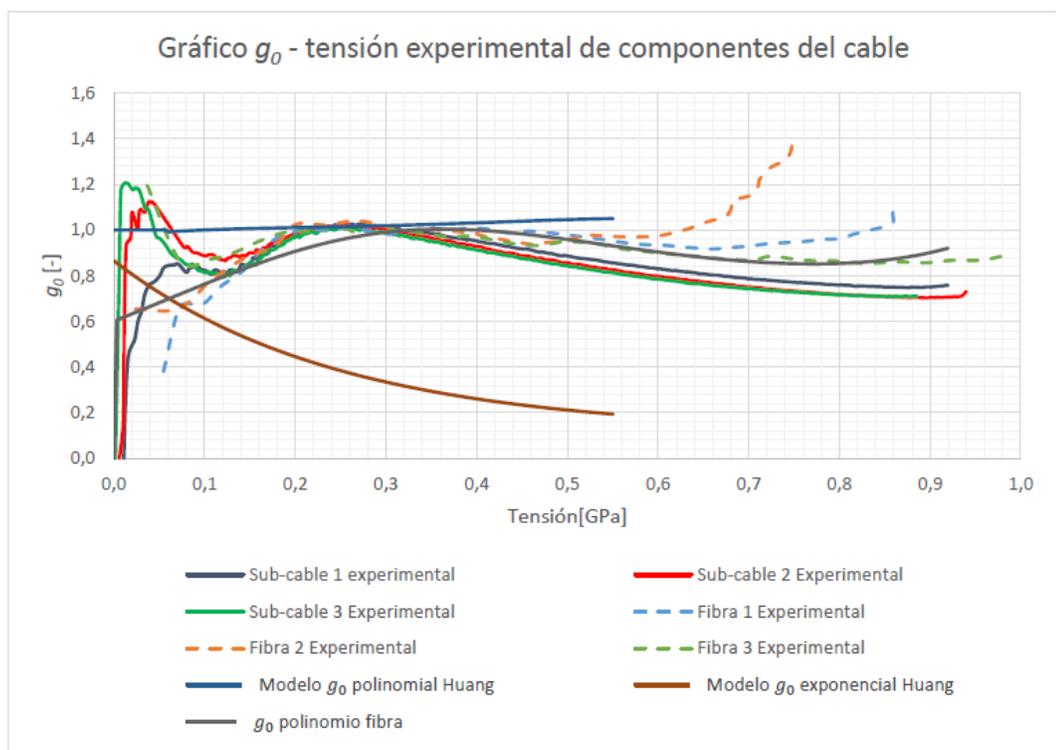


Figura 4.27: Gráfico g_0 con respecto a la tensión aplicada sobre sub-cables y fibras de poliéster, curvas experimentales y modeladas.

5. Implementación numérica de la respuesta estática de cables de poliéster

Como se mencionó en capítulos anteriores, la respuesta de un componente mayor se puede generar a partir de una componente básica considerando la distribución geométrica de éstas; en este caso, se genera la respuesta del cable de poliéster a partir de los parámetros del sub-cable, que es lo que se desarrolla en el presente capítulo.

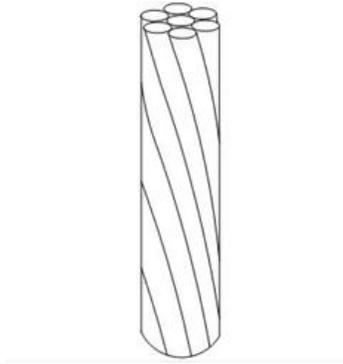


Figura 5.1: Distribución de los componentes del cable de poliéster.

La distribución geométrica de los componentes de un cable influye en el comportamiento del cable, por lo que se hace realiza una implementación numérica considerando las variables geométricas del cable. La Figura 5.1 es el ejemplo de un cable de siete elementos, un componente en el núcleo y 6 elementos que rodean al componente del núcleo distribuidos de forma helicoidal, mientras que la Figura 5.2(a) ilustra la distribución geométrica que tienen los elementos helicoidales con respecto a la vertical cuyo ángulo θ se puede determinar a partir de la expresión (5.1) cuya representación geométrica se presenta en la Figura 5.2(b), donde p es la distancia vertical entre un punto del cable y el próximo punto en que el componente da una vuelta al núcleo del cable y a es la distancia entre el centro de la sub-cuerda del núcleo y cada componente helicoidal como se puede ver en la Figura 5.3. Notar que el componente del núcleo puede ser un componente imaginario, como ocurre en los cables de tres elementos donde éstos se distribuyen de manera helicoidal.

$$\tan \theta = \frac{2\pi a}{p} \quad (5.1)$$

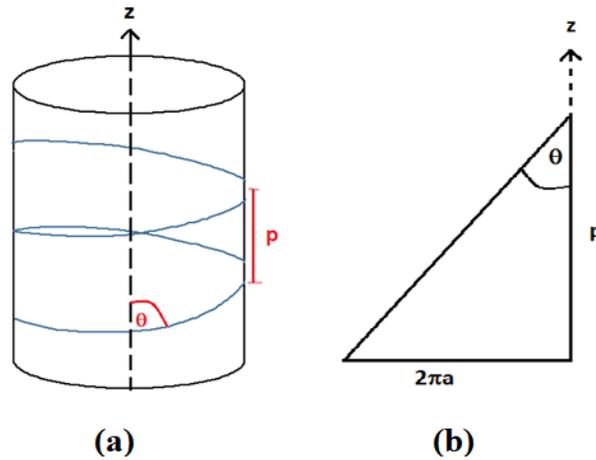


Figura 5.2: (a) Representación de la distribución helicoidal de los componentes exteriores del cable (b) geometría del ángulo de inclinación de los elementos helicoidales.

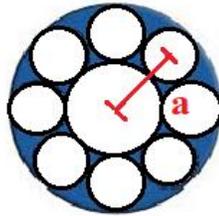


Figura 5.3: Representación de la distancia a.

Además, la distribución helicoidal de las sub-cuerdas del cable afecta la deformación de sus componentes, ya que el alargamiento es distinto por estar orientados con un ángulo de inclinación, como se presenta a continuación.

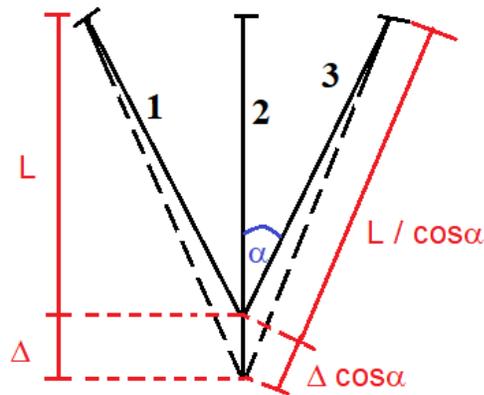


Figura 5.4: Representación de alargamientos de elementos del cable.

El elemento 2 de la Figura 5.4 representa la sub-cuerda ubicada en el núcleo del cable cuyo largo es L , mientras que los elementos 1 y 3 corresponden a sub-cuerdas orientadas helicoidalmente con ángulo α . Una vez que se aplica la carga, el cable tiene un alargamiento (Δ), la deformación que se percibe en el cable y en el núcleo está dado por la ecuación (5.2), mientras que la deformación de los elementos helicoidales está dada por la expresión (5.3).

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta}{L} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta \cdot \cos \alpha}{L / \cos \alpha} = \frac{\Delta}{L} \cos^2 \alpha \quad (5.3)$$

Por lo tanto,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_2 \cos^2 \alpha \quad (5.4)$$

En consecuencia, para que la deformación sea uniforme en todo el cable, las tensiones no se distribuyen de igual manera en el área transversal del cable, por lo que existe un campo de tensiones y es lo que se quiere determinar para conocer la respuesta del cable.

Como se vio en capítulos anteriores, el comportamiento de los elementos de un cable se pueden representar a partir de la deformación viscoelástica instantánea (expresión (5.5)), por lo que se utiliza esta analogía para determinar la respuesta de los cables a partir de la misma expresión con los parámetros de los sub-cables, en particular, del sub-cable 1. En este caso, se considera g_0 de la Tabla 4.1 ya que representa de mejor manera el comportamiento de este parámetro para cada nivel de tensión, y éste se puede modelar hasta el 100%MBL.

$$\varepsilon_{ve1} = D_0 g_0 \sigma \quad (5.5)$$

La implementación numérica de la respuesta de cables a partir leyes constitutivas de sus componentes se realiza mediante un método iterativo, el cual considera algunas relaciones matemáticas para definir el campo de tensiones.

5.1. Bases del modelo numérico

Para obtener la respuesta de los cables se analizan tres relaciones que son de interés:

- Equilibrio
- Ley constitutiva
- Compatibilidad de deformación

5.1.1. Ley Constitutiva

De forma discreta, la deformación viscoelástica instantánea se desarrolla como se muestra en la expresión (5.6).

$$\Delta \varepsilon = \Delta(g_0 D_0 \sigma) = D_0 \Delta g_0 \sigma + D_0 g_0 \Delta \sigma \quad (5.6)$$

donde Δg_0 se determina de la siguiente manera de la ecuación (5.7), j es el número de datos con los que se quiere trabajar. Así, se obtiene la expresión (5.8), la cual corresponde a un Taylor de primer orden.

$$g_0|_j = g_0|_{j-1} + \frac{dg_0}{d\sigma} \Delta \sigma \quad (5.7)$$

$$\Delta g_0 = g_0|_j - g_0|_{j-1} = \frac{dg_0}{d\sigma} \Delta \sigma \quad (5.8)$$

Por lo tanto

$$\Delta \varepsilon = D_0 \cdot \frac{dg_0}{d\sigma} \Delta \sigma \cdot \sigma + D_0 \cdot g_0 \cdot \Delta \sigma \quad (5.9)$$

$$\Delta \varepsilon = D_0 \left[\frac{dg_0}{d\sigma} \cdot \sigma + g_0 \right] \Delta \sigma \quad (5.10)$$

Luego, la ley constitutiva queda definida como sigue:

$$\Delta \varepsilon_j = D_0 \left[\sigma|_{j-1} \cdot \frac{dg_0}{d\sigma} \Big|_{j-1} + g_0|_{j-1} \right] \Delta \sigma_j \quad (5.11)$$

5.1.2. Equilibrio

En este caso, se definen dos sub-índices, n para indicar el componente del núcleo del cable y h para mencionar a los elementos que se distribuyen de forma helicoidal en torno al núcleo.

La derivada de la fuerza del elemento central está dada por la expresión (5.12), mientras que la derivada del elemento helicoidal está dado por (5.13). Luego, la expresión (5.14) representa la derivada de la fuerza aplicada en todo el cable, la cual está dada por la suma entre el elemento central y las componentes que la rodean, donde ch es el número de sub-cables helicoidales (en este caso, son ocho), y θ es el ángulo que éstos forman con la vertical.

$$\Delta F_n = \Delta \sigma_n \cdot A_n \quad (5.12)$$

$$\Delta F_h = \Delta \sigma_h \cdot A_n \quad (5.13)$$

$$\Delta F_{cuerda} = \Delta F_n + \sum_{i=1}^{ch} \Delta F_h \cdot \cos \theta \quad (5.14)$$

5.1.3. Compatibilidad de deformaciones

Como se explicó al principio de este capítulo, en la expresión (5.4), la deformación del elemento central no es igual a la que presenta los elementos helicoidales bajo una misma tracción, por lo que la compatibilidad de deformaciones de los sub-cables está dada por la relación definida en la ecuación (5.15).

$$\varepsilon_n|_j \cdot \cos^2 \theta = \varepsilon_h|_j \quad (5.15)$$

donde

$$\varepsilon_n|_j = \sum_{k=1}^j (\Delta \varepsilon)_{hk} \quad (5.16)$$

Finalmente, la deformación del cable es igual a la deformación del sub-cable del núcleo, es decir,

$$\varepsilon_{cuerda}|_j = \varepsilon_n|_j \quad (5.17)$$

5.2. Método de iteraciones

La respuesta de un cable se puede determinar a partir de una ley constitutiva de los componentes del cable mediante un método iterativo, cuyo primer paso es suponer arbitrariamente el número de datos o pasos (j) con los que se quiere trabajar. Cabe notar que mientras mayor sea el paso que se designe se obtienen resultados más precisos.

La segunda etapa consiste en definir un campo de tensiones, donde se debe definir el esfuerzo que se aplica en el núcleo y en los elementos exteriores de forma separada. Como principio base, se supone que ambos son iguales y conocidos, en este caso se considera arbitrariamente lo siguiente:

$$\Delta\sigma_n = \Delta\sigma_h = 0.1 [GPa] \quad (5.18)$$

Luego, se determina el parámetro g_0 y $\Delta\varepsilon_j$ de cada componente del cable a partir de la Tabla 4.1 y la expresión (5.11) de la ley constitutiva, respectivamente.

Una vez que se tiene $\Delta\varepsilon_j$ se verifica la relación (5.15) de compatibilidad de deformaciones, si el error es menor que un cierto valor de tolerancia, se pasa a los siguientes datos de carga, de lo contrario se debe seguir iterando, es decir:

$$\text{si } \begin{cases} \text{error} < \text{tolerancia} & \rightarrow \text{termina iteración, se pasa al siguiente estado de tensiones} \\ \text{error} \geq \text{tolerancia} & \rightarrow \text{nuevamente se itera} \end{cases}$$

donde

$$\text{error}|_j = |\varepsilon_h|_j - \varepsilon_n|_j \cdot \cos^2 \theta^2 \quad (5.19)$$

En este caso, el valor de tolerancia del error de deformaciones se considera 1% (0,01[-]). Si las iteraciones finalizan para cada paso significa que se cumplió la compatibilidad de deformaciones por lo que se puede proceder a calcular la fuerza aplicada en cada componente del cable y en el cable completo.

5.3. Respuesta de cable de nueve elementos

Con la implementación numérica explicada anteriormente, es posible obtener la respuesta simulada de un cable de nueve elementos a partir de la ley constitutiva presentada en el capítulo 3 para sus componentes. La Figura 5.5 es un gráfico comparativo entre dicha simulación de cables y las curvas experimentales de cuatro ensayos (A, B, C y D) realizados a cables como los presentados en la Figura 2.2 (a). Cabe notar que la curva simulada tiene un comportamiento similar al obtenido para las curvas experimentales de cables, por lo que resulta ser una buena modelación de los resultados.

Además, en este caso, el parámetro de flexibilidad instantánea D_0 toma un valor de 0,2034.

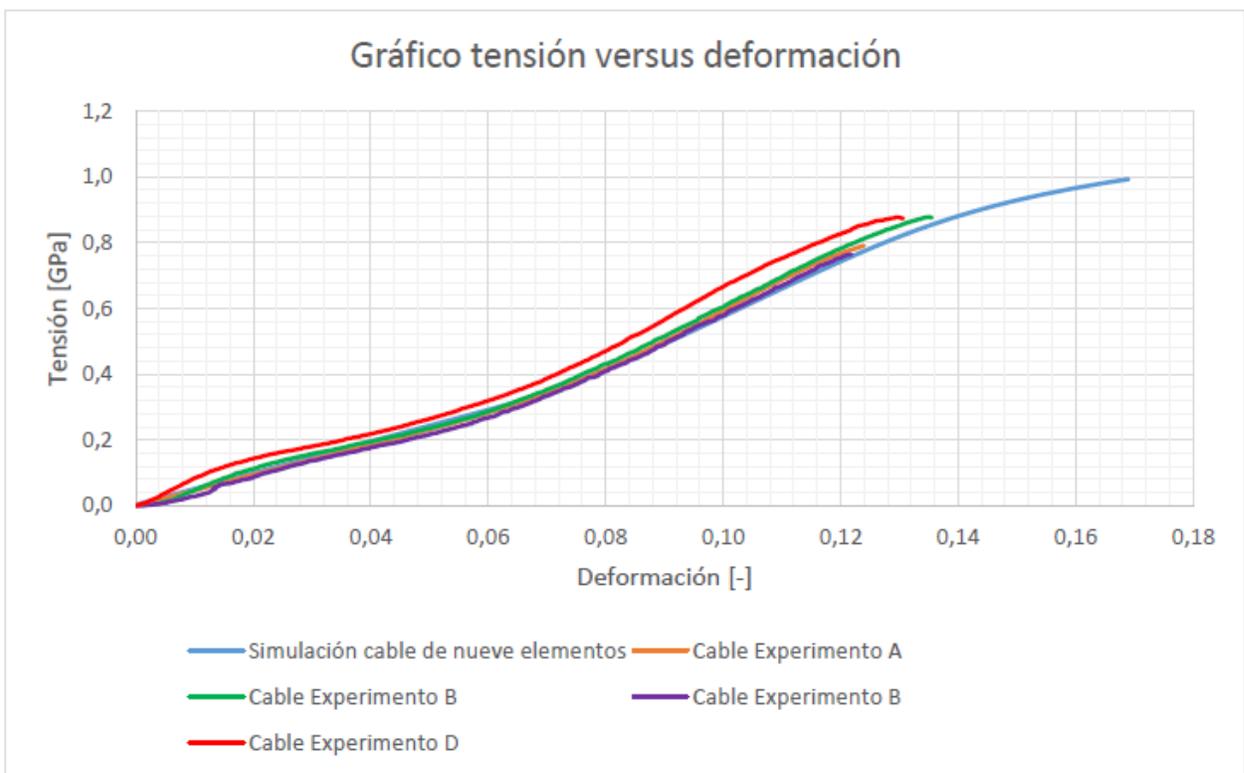


Figura 5.5: Gráfico comparativo de Cables experimento A, B, C y D, con respecto a la simulación realizada para el cable de 9 elementos.

5.4. Respuesta de cables de diámetro mayor

Anteriormente, se ha definido la respuesta para cables a partir de sus componentes y se ha reproducido el comportamiento de cables de $6.1[mm]$ de diámetro con nueve sub-cables, un elemento central y ocho distribuidos de forma helicoidal en torno a él, sin embargo, es importante conocer si el modelo es capaz de reproducir el comportamiento de cables de mayor diámetro, lo que se traduce en un mayor número de componentes en su estructura. Para ello se analizan 3 tipos de cables (R_1 , R_2 y R_3) los cuales tienen las características mostradas en la Tabla 2.3, en donde R_1 resiste en teoría

35 [tonf] a diferencia de los cables R_2 y R_3 que según su configuración resisten 35[tonf] y 700[tonf] cada uno de ellos.

Las hebras de R_1, R_2 y R_3 se modelan según la expresión (5.20) , donde σ es la tensión aplicada en cada hebra, ε es la deformación que presenta, σ_b y ε_b corresponden a la tensión y deformación de ruptura de la hebra, respectivamente, y los parámetros a_1, \dots, a_5 son valores que varían para cada cable y están dados por la Tabla 5.1. Cabe nota que se entiende por hebra al componente básico de los elementos que constituyen el sub-cable (ver Figura 2.2 (b)).

$$\frac{\sigma}{\sigma_b} = a_1 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right) + a_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right)^3 + a_4 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right)^4 + a_5 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right)^5 \quad (5.20)$$

Tabla 5.1: Parámetros de la modelación de hebras.

	R_1 35[tonf]	R_2 35[tonf]	R_2 700[tonf]	R_3 35[tonf]	R_3 700[tonf]
a_1	1.33	1.80	1.43	1.33	1.31
a_2	-3.13	-6.63	-3.91	-3.13	-3.59
a_3	7.98	17.47	9.41	7.98	9.30
a_4	-7.90	-18.74	-8.95	-7.90	-9.25
a_5	2.72	7.10	3.02	2.72	3.23
σ_b [GPa]	0.8110	0.8335	0.9869	0.8110	0.7766
ε_b [-]	0.0865	0.0690	0.0760	0.0865	0.0790

A partir de valores de deformación que van desde cero a la deformación máxima, se obtiene la tensión que percibe cada una de las hebras de los sub-cables al reemplazarla en la expresión (5.20). Luego, se determina el valor de D_0 para cada uno de los sub-cables según la expresión (4.5) cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.2. Al introducir este valor en la ecuación (4.4) se obtiene g_0 para cada carga aplicada a la hebra, con lo cual se extrapola una línea de tendencia cuyos polinomios son los que se presentan en la Tabla 5.3 y son el que se utiliza para modelar el comportamiento del sub-cable.

Tabla 5.2: Valores de D_0 calculados para cada cable.

Cable	D_0[1/GPa]
R_1 35[tonf]	0.1160
R_2 35[tonf]	0.1164
R_2 700[tonf]	0.0841
R_3 35[tonf]	0.1163
R_3 700[tonf]	0.0917

Tabla 5.3: Expresiones de g_0 obtenidos para cada tipo de hebra.

Cable	g_0
R_1 35[tonf]	$63.24\sigma^6 - 166.32\sigma^5 + 162.42\sigma^4 - 67.99\sigma^3 + 8.13\sigma^2 + 1.55\sigma + 0.69$ (5.21)
R_2 35[tonf]	$62.64\sigma^6 - 164.82\sigma^5 + 160.98\sigma^4 - 67.36\sigma^3 + 8.01\sigma^2 + 1.56\sigma + 0.68$ (5.22)
R_2 700[tonf]	$19.19\sigma^6 - 61.47\sigma^5 + 73.07\sigma^4 - 37.19\sigma^3 + 5.36\sigma^2 + 1.28\sigma + 0.68$ (5.23)
R_3 35[tonf]	$64.90\sigma^6 - 169.07\sigma^5 + 163.38\sigma^4 - 67.57\sigma^3 + 7.92\sigma^2 + 1.52\sigma + 0.70$ (5.24)
R_3 700[tonf]	$-0.03\sigma^6 + 0.31\sigma^5 - 1.39\sigma^4 + 3.09\sigma^3 - 3.60\sigma^2 + 1.70\sigma + 0.92$ (5.25)

Finalmente, con el método de iteraciones descrito en la sección 5.2 se pueden obtener como resultado la deformación que experimenta cada sub-cable a partir de la fuerza aplicada. Dichos sub-cables se disponen paralelos entre sí y paralelos a la dirección del cable, por lo que la fuerza que percibe el cable es:

$$F_{cable} = F_{sub-cable} \cdot N^{\circ}subcables \quad (5.26)$$

Por compatibilidad de deformaciones, tanto el cable como los sub-cables tienen la misma deformación. Así, los resultados de la fuerza aplicada al cable con respecto a la deformación se pueden ver en la Figura 5.6 y Figura 5.7.

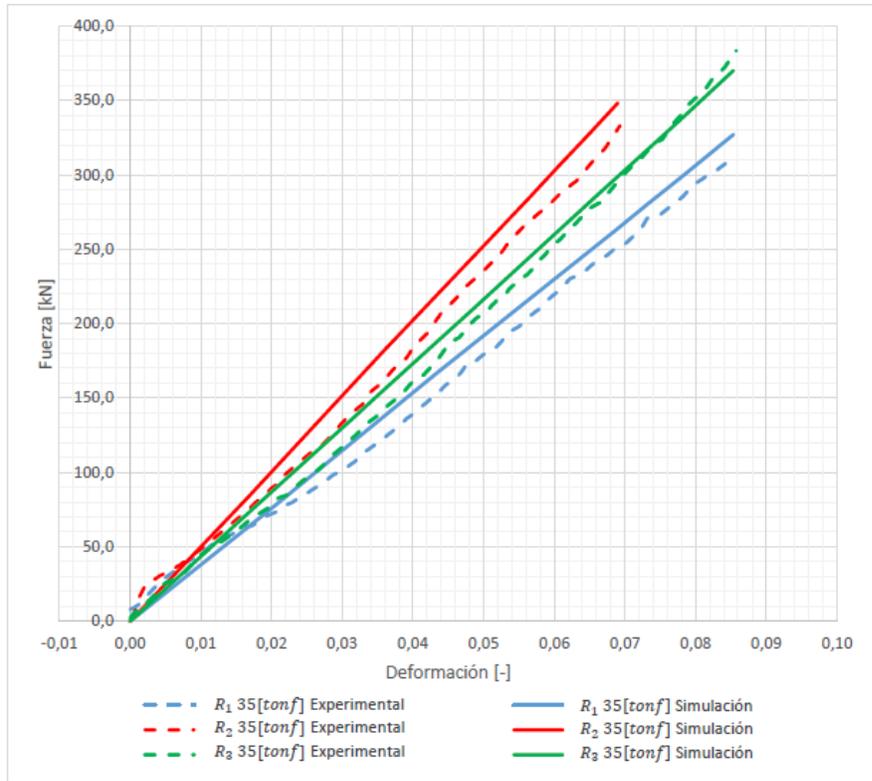


Figura 5.6: Gráfico Fuerza versus deformación de cables R_1 , R_2 y R_3 de 35[tonf].

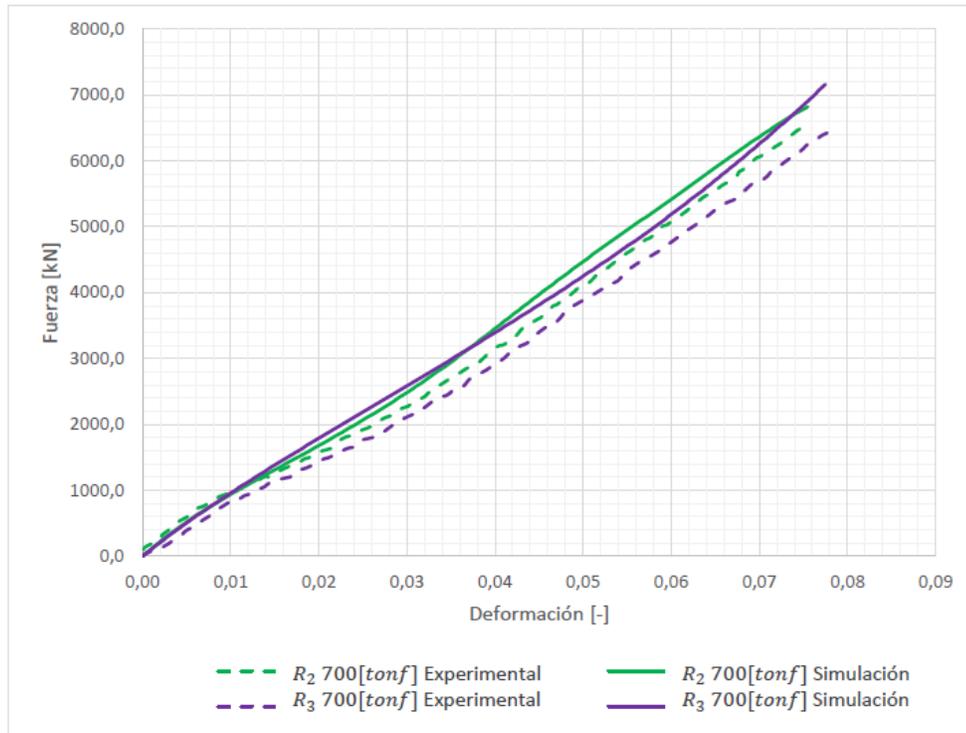


Figura 5.7: Gráfico fuerza versus deformación de cables R_2 y R_3 , de 700 [tonf].

Cabe notar que, tanto la respuesta de cables de 35 [tonf] como de 700 [tonf] tienen un comportamiento similar a la respuesta de los componentes del cable. La implementación numérica es capaz de reproducir el comportamiento hasta la ruptura de cables de diámetro mayor a partir de leyes constitutivas de sus elementos.

En resumen, del análisis realizado para el ensayo de tracción hasta la ruptura se obtienen los datos de D_0 mostrados en la Tabla 5.4. En ella se presenta una disminución de rigidez a medida que se tiene un mayor diámetro, excepto para los cables R_1 , R_2 y R_3 , donde se aprecian elementos con una menor flexibilidad aparente. Esto puede tener su explicación en que los cables R_1 , R_2 y R_3 tienen un ciclado previo, por lo que su fase amorfa ha disminuido en relación a cables vírgenes haciendo que disminuya su flexibilidad aparente, tal como se mostró en el análisis de la Figura 4.23. Notar que los cables R_i , con $i = 2,3$, de 700[tonf] tiene una menor flexibilidad instantánea en comparación con los cables de 35 [tonf]. Estos valores están dentro de la variabilidad que muestra Lechat et al., 2011, donde sus curvas presentan variaciones de pendientes de hasta 40%.

Tabla 5.4: Resumen de los valores calculados de D_0 .

Elemento	Diámetro [mm]	D_0 [1/GPa]
Fibra 1 Experimental	$(22,9 \pm 0,9)10^{-6}$	0,129
Fibra 2 Experimental	$(22,9 \pm 0,9)10^{-6}$	0,166
Fibra 3 Experimental	$(22,9 \pm 0,9)10^{-6}$	0,118
Sub-cable 1	2,8	0,158
Sub-cable 2	2,8	0,187
Sub-cable 3	2,8	0,188
Cable 9 elementos (Simulación)	6,1	0,203
Cable Experimento A	6,1	0,215
Cable Experimento B	6,1	0,215
Cable Experimento C	6,1	0,215
Cable Experimento D	6,1	0,215
Cable R_1 35[tonf]	32	0,116
Cable R_2 35[tonf]	32	0,116
Cable R_2 700[tonf]	147	0,084
Cable R_3 35[tonf]	36	0,116
Cable R_3 700[tonf]	166	0,092

De igual forma, el gráfico resumen de g_0 con respecto a la tensión se puede ver en el Apéndice 4, sin embargo, no se pueden ver claramente todas las curvas por lo que la Figura 5.8 muestra un acercamiento de las curvas. La Figura 5.9 presenta el resumen de las curvas tensión- deformación de las sub-cuerdas experimentales y modeladas, de

las fibras, de los cables. En ambos gráficos, el comportamiento de todas las curvas sigue una tendencia similar, excepto la curva modelada con g_0 definido por Huang et al., 2015, ya que éste reproduce el comportamiento de cables que han adquirido rigidez producto del tratamiento cíclico previo al que han sido sometidos.

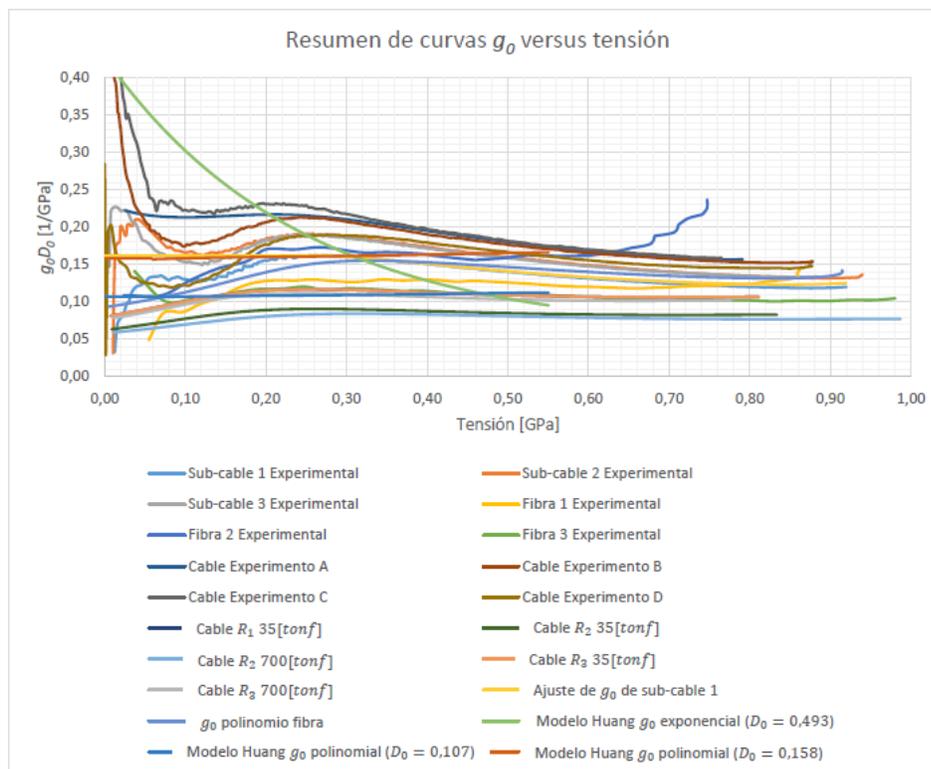


Figura 5.8: Gráfico resumen de las curvas $g_0 D_0$ versus tensión.

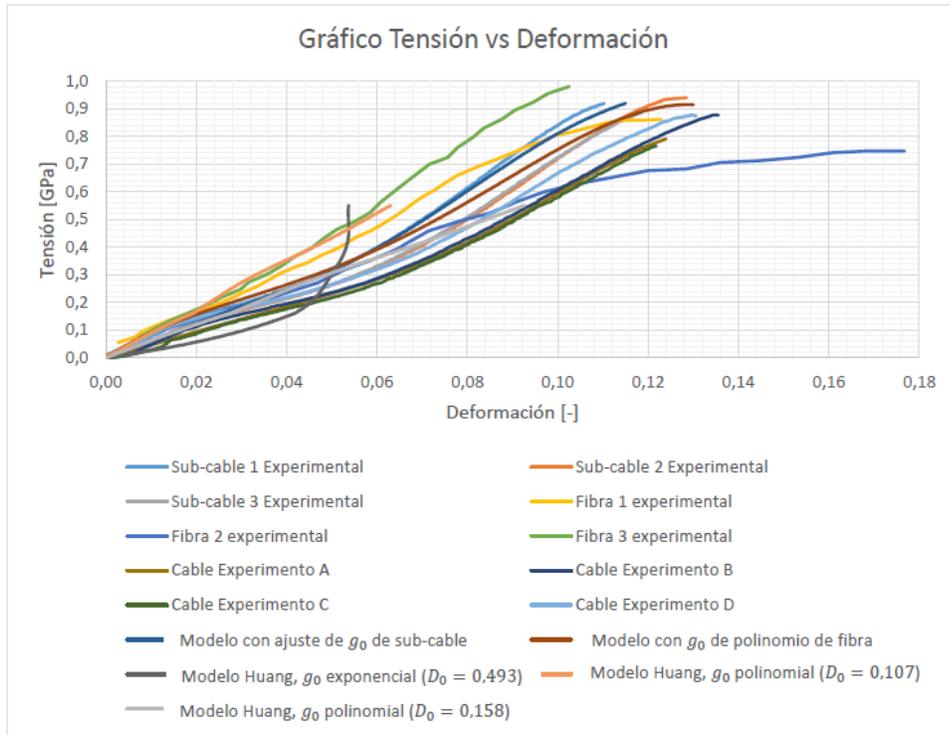


Figura 5.9: Gráfico resumen de las curvas tensión versus deformación, experimental y modelada.

6. Comentarios y Conclusiones

En este trabajo de título se implementó un modelo numérico propuesto por Huang et al., 2014. Para ello, se estudiaron en detalle los componentes involucrados en la ley constitutiva: deformación viscoelástica instantánea, deformación viscoelástica no lineal y deformación viscoplástica.

Entre los resultados obtenidos de las simulaciones se determinó que el término viscoelástico instantáneo es el que controla el comportamiento estático monotónico de un cable, mientras que los demás términos tienen un mínimo aporte. Sin embargo, estas cepas toman relevancia cuando el material se ve sometido a ciclos de carga. Por otro lado, cabe notar que el modelo propuesto no logra reproducir el cambio de rigidez producto de los ciclos de carga observados en los ensayos experimentales.

Además, se utilizaron diferentes datos experimentales reportados en la literatura para estudiar el comportamiento estático monotónico de un elemento (fibras, sub-cables y cables) formados por este material. Existe una variabilidad de los valores que se encontraron en la literatura con los reportados por Huang et al., 2014, tanto para la deformación como para los parámetros no lineales.

Finalmente, se incorpora en el trabajo de título un algoritmo que permite determinar la respuesta de los cables, de grandes o pequeños diámetros, en función de sus componentes.

A modo de comentario, la velocidad con que se realiza un ensayo de ruptura tiene impacto en los resultados de deformación. Cuando se disminuye la velocidad de ensayo (tiempo mayor de ensayo), aumenta relativamente la deformación del material, lo cual es acorde al comportamiento de los materiales viscoelásticos y viscoplásticos.

Además, para realizar la identificación de parámetros es importante tener acceso a ensayos de creep, que permitan obtener gráficos de interés en el proceso de obtención de los parámetros, de lo contrario, su identificación se dificulta de sobre manera. Además, el análisis de sensibilidad del modelo ante la variación de los parámetros g_0 , g_1 , g_2 , D_p y m permite tomar decisiones como es el caso de la modelación de la carga sinusoidal en donde se hacen simplificaciones en las variables que tienen menor impacto en el comportamiento de los cables de poliéster.

Restricciones del modelo

El modelo presentado en este trabajo de título cuenta con algunas restricciones, entre las que se encuentran:

- Conocer la tensión de ruptura del elemento, ya que los parámetros no lineales de la ley constitutiva dada por Huang et al., 2014, se clasifican según esta variable.

- Conocer la geometría de los componentes del cable para determinar la respuesta del cable, es decir, el número de elementos del cable, su diámetro y el ángulo con el que se distribuyen en torno al núcleo son requerimientos básicos de la simulación.

Futuras Investigaciones

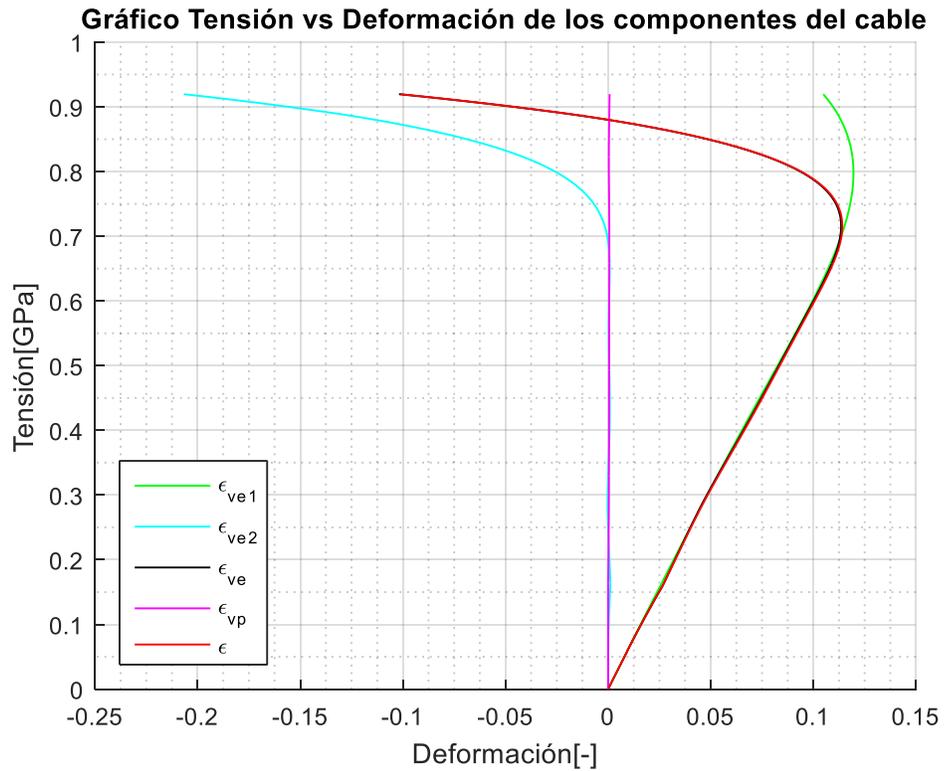
Se deja propuesto como futuros estudios complementarios a este trabajo de título los siguientes temas:

- Incorporar investigación acerca de la variación de rigidez producto del aumento del número de ciclos de carga.
- Aplicar metodología de guías de diseño.
- En base a los resultados reportados en la literatura, incorporar variabilidad de las propiedades mecánicas en la formulación de la ley constitutiva.

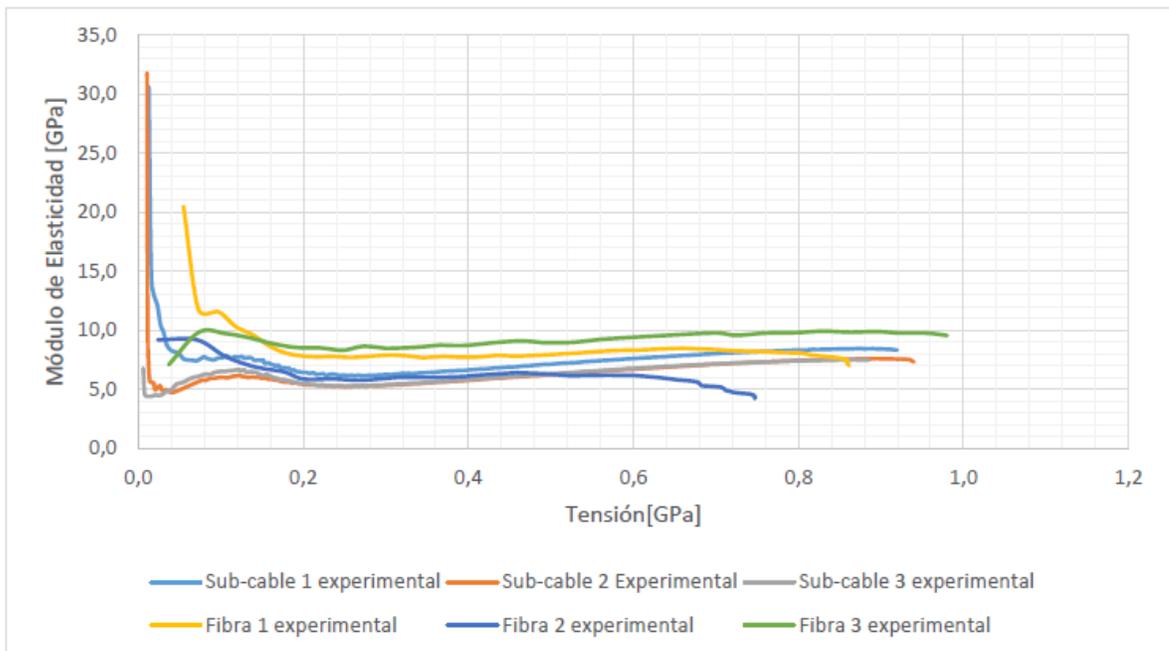
Bibliografía

- [1] Beltran J.F., 2006, "Computational Modeling of Synthetic-Fiber Ropes," PhD Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
- [2] Brinson H. F. & Brinson L. C., 2008. *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*. New York: Springer.
- [3] Flory J., Banfield S. & Petruska D., 2004. "Defining, Measuring, and Calculating the Properties of Fiber Rope Deepwater Mooring Lines", *Offshore Technology Conference*. OTC 16151. Texas U.S.A., 3-6 May 2004.
- [4] Foster G. P., 2002. "Advantages of Fiber Rope Over Wire Rope", *Coordage Institute*, Hockley Drive Hingham, MA 02043, USA.
- [5] Huang W., Liu H. & Hu C., 2014. "Modeling the Stress-Strain of Synthetic Fiber Mooring Lines under Cyclic Loading", *International Society of Offshore and Polar Engineers*, Vol 978, pp 126-133.
- [6] Huang W., Liu H., Lian Y. & Li L., 2015. "Modeling nonlinear time-dependent behaviors of synthetic fiber ropes under cyclic loading", *Ocean Engineering*, Vol 109, pp 207-216.
- [7] Lechat C., Bunsell A. R. & Davies P., 2011. "Tensile and creep behavior polyethylene terephthalate and polyethylene naphthalate fibres", *Journal of Materials Science*, Vol 46, pp 528-533.
- [8] Liu H., Huang W., Lian Y. & Li L., 2014. "An experimental investigation on nonlinear behaviors of synthetic fiber ropes for deepwater moorings under cyclic loading", *Applied Ocean Research*, Vol 45, pp 22-32.
- [9] Schapey R.A., 1969. "On the characterization of nonlinear viscoelastic materials", *Polymer Engineering and Scienc*, Vol 9, N°4, pp 295-310.
- [10] Wibner C., Versavel t. & Masetti I., 2003. "Specifying and testing polyester mooring rope for the Barracuda and Caratinga FPSO deepwater mooring systems", *Proc Annual Offshore Tech Conf*, OTC 15139, Houston, USA.
- [11] Zapas L. J. & Crissman J. M., 1984. "Crrep and recovery behavior of ultra-high molecular weight polyethylene in the regin of small uniaxial deformations", *Polymer*, Vol 25, N°1, pp 57-62.

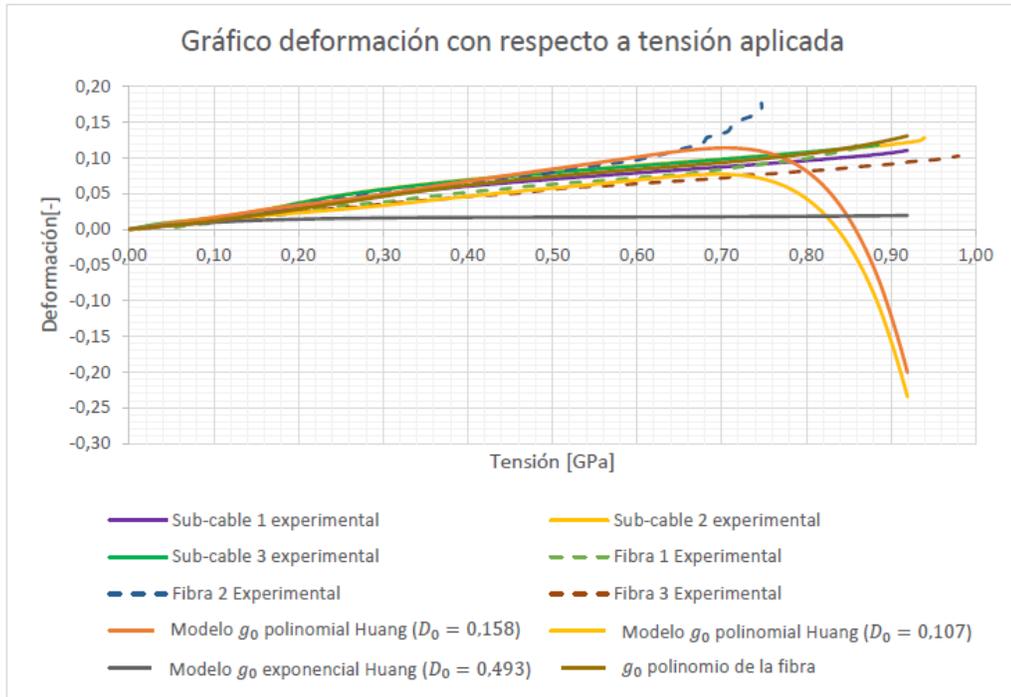
Apéndice



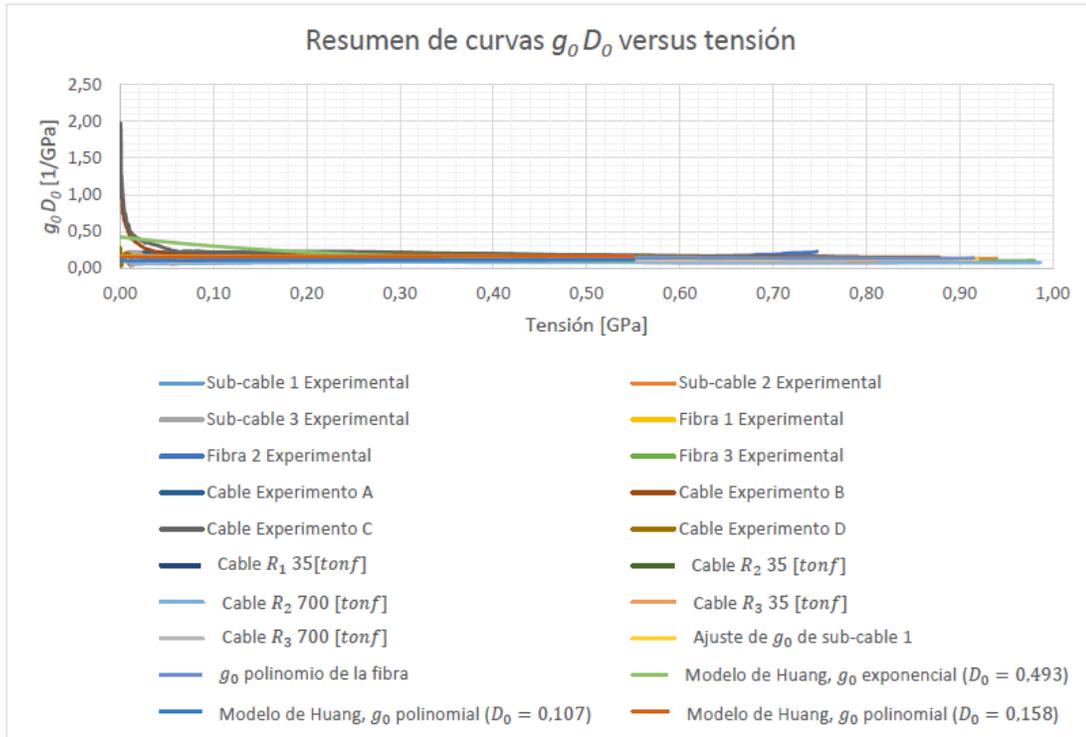
Apéndice 1: Gráfico tensión-deformación de los componentes del cable, hasta el 100%.



Apéndice 2: Gráfico módulo-deformación de sub-cables y fibras.



Apéndice 3: Gráfico comparativo tensión-deformación del modelo de Huang con g_0 polinomial, exponencial y de la fibra hasta un 100%MBL, con respecto a las curvas experimentales.



Apéndice 4: Gráfico resumen de las curvas $g_0 D_0$ versus tensión.

Anexos

Anexo 1: Tabla de datos experimentales promedio del abanico de curvas de fibra de la Figura 2.1.

ε [%]	σ [GPa]	ε [%]	σ [GPa]
0,2660	0,0545	6,3689	0,5081
0,6166	0,0726	6,5890	0,5323
0,8367	0,0968	6,8093	0,5596
1,1440	0,1180	7,0294	0,5838
1,4512	0,1392	7,2932	0,6080
1,8018	0,1573	7,5133	0,6322
2,1525	0,1754	7,7773	0,6594
2,4595	0,1936	8,0845	0,6806
2,7667	0,2147	8,3917	0,7018
3,0303	0,2359	8,6987	0,7199
3,3375	0,2571	9,0059	0,7411
3,6013	0,2813	9,3131	0,7622
3,8650	0,3055	9,6201	0,7804
4,1722	0,3266	9,9273	0,8015
4,4792	0,3448	10,3214	0,8166
4,7430	0,3690	10,6719	0,8317
5,0502	0,3901	11,0223	0,8468
5,3138	0,4113	11,4162	0,8589
5,5339	0,4355	11,8529	0,8588
5,8411	0,4567	12,2898	0,8618
6,1049	0,4809		

Anexo 2: Tabla de datos experimentales de curva flexible del abanico de curvas de fibra de la Figura 2.1.

ε [%]	σ [GPa]
0,2559	0,0235
0,7677	0,0706
1,3634	0,1059
2,0439	0,1412
2,7243	0,1765
3,4040	0,2000
3,9997	0,2353
4,6801	0,2706
5,2767	0,3176
5,8724	0,3529
6,4685	0,3941
6,6393	0,4118
7,1511	0,4588
7,1511	0,4588
7,8315	0,4941
8,5116	0,5235
8,5116	0,5235
9,1077	0,5647
9,7034	0,6000
9,7034	0,6000
10,4682	0,6294
11,2326	0,6529
11,2326	0,6529
11,9969	0,6765
12,8448	0,6824
12,8448	0,6824
13,6092	0,7059
14,4570	0,7118
14,4570	0,7118
15,3053	0,7235
16,0693	0,7412
16,0693	0,7412
16,8324	0,7471
17,6799	0,7471
17,6799	0,7471

Anexo 3: Tabla de datos experimentales de curva rígida de abanico de curvas de la Figura 2.1.

ε [%]	σ [GPa]
0,51670	0,03661
0,74439	0,07322
1,08808	0,10576
1,43215	0,13424
1,83404	0,16271
2,23592	0,19119
2,57999	0,21966
2,98188	0,24814
3,15293	0,27254
3,55482	0,30102
3,55482	0,30102
3,89850	0,33356
4,18438	0,36610
4,18438	0,36610
4,52846	0,39458
4,81395	0,43119
4,81395	0,43119
5,09983	0,46373
5,50171	0,49220
5,50171	0,49220
5,84540	0,52475
6,07309	0,56136
6,07309	0,56136
6,35858	0,59797
6,64407	0,63458
6,64407	0,63458
7,15803	0,69966
7,56030	0,72407
7,78799	0,76068
8,13128	0,79729
8,35936	0,82983
8,76085	0,86237
9,04673	0,89492
9,44861	0,92339
9,79230	0,95593
10,25240	0,98034

Anexo 4: Tabla de datos experimentales de sub-cable 1.

ϵ [%]	σ [GPa]														
0,00	0,01	2,13	0,15	3,95	0,24	5,47	0,35	6,72	0,47	7,84	0,59	8,93	0,72	10,04	0,84
0,04	0,01	2,17	0,16	3,99	0,25	5,51	0,36	6,75	0,47	7,88	0,60	8,96	0,73	10,07	0,85
0,11	0,02	2,22	0,16	4,04	0,25	5,55	0,36	6,79	0,48	7,90	0,60	8,99	0,73	10,11	0,85
0,19	0,02	2,27	0,16	4,08	0,25	5,58	0,36	6,81	0,48	7,93	0,61	9,02	0,74	10,13	0,85
0,25	0,03	2,31	0,16	4,12	0,25	5,62	0,37	6,85	0,48	7,96	0,61	9,05	0,74	10,16	0,86
0,31	0,03	2,36	0,17	4,16	0,26	5,67	0,37	6,88	0,49	8,00	0,61	9,08	0,74	10,20	0,86
0,38	0,03	2,42	0,17	4,21	0,26	5,71	0,37	6,91	0,49	8,02	0,62	9,12	0,75	10,23	0,86
0,47	0,04	2,46	0,17	4,26	0,26	5,74	0,38	6,95	0,49	8,06	0,62	9,15	0,75	10,27	0,87
0,55	0,04	2,56	0,17	4,30	0,27	5,78	0,38	6,98	0,50	8,08	0,62	9,18	0,75	10,30	0,87
0,64	0,05	2,60	0,18	4,34	0,27	5,82	0,38	7,01	0,50	8,12	0,63	9,21	0,76	10,33	0,87
0,72	0,05	2,65	0,18	4,39	0,27	5,86	0,39	7,05	0,50	8,15	0,63	9,24	0,76	10,37	0,88
0,81	0,06	2,70	0,18	4,43	0,27	5,89	0,39	7,08	0,51	8,18	0,63	9,27	0,76	10,41	0,88
0,89	0,07	2,75	0,18	4,48	0,28	5,93	0,39	7,12	0,51	8,21	0,64	9,31	0,77	10,43	0,88
0,95	0,07	2,80	0,19	4,52	0,28	5,96	0,39	7,15	0,52	8,24	0,64	9,34	0,77	10,48	0,88
1,03	0,08	2,84	0,19	4,57	0,28	6,00	0,40	7,18	0,52	8,27	0,65	9,37	0,77	10,50	0,89
1,09	0,08	2,89	0,19	4,61	0,29	6,04	0,40	7,21	0,52	8,30	0,65	9,40	0,78	10,53	0,89
1,16	0,09	2,94	0,19	4,65	0,29	6,07	0,40	7,25	0,53	8,33	0,65	9,43	0,78	10,57	0,89
1,22	0,09	2,99	0,19	4,70	0,29	6,10	0,41	7,27	0,53	8,36	0,66	9,46	0,78	10,60	0,89
1,26	0,10	3,03	0,20	4,73	0,29	6,14	0,41	7,30	0,53	8,39	0,66	9,50	0,79	10,65	0,90
1,32	0,10	3,08	0,20	4,78	0,30	6,17	0,41	7,34	0,54	8,42	0,66	9,52	0,79	10,67	0,90
1,36	0,11	3,12	0,20	4,82	0,30	6,21	0,42	7,36	0,54	8,46	0,67	9,56	0,79	10,71	0,90
1,41	0,11	3,17	0,20	4,86	0,30	6,24	0,42	7,40	0,54	8,49	0,67	9,59	0,80	10,74	0,90
1,47	0,11	3,22	0,21	4,90	0,31	6,27	0,42	7,43	0,55	8,52	0,68	9,63	0,80	10,77	0,91
1,52	0,12	3,27	0,21	4,95	0,31	6,31	0,43	7,46	0,55	8,56	0,68	9,65	0,80	10,81	0,91
1,57	0,12	3,31	0,21	4,99	0,31	6,34	0,43	7,50	0,56	8,58	0,68	9,69	0,81	10,85	0,91
1,61	0,13	3,36	0,21	5,03	0,32	6,38	0,43	7,52	0,56	8,62	0,69	9,72	0,81	10,88	0,91
1,66	0,13	3,41	0,21	5,11	0,32	6,41	0,44	7,56	0,56	8,65	0,69	9,75	0,82	10,91	0,91
1,71	0,13	3,46	0,22	5,15	0,33	6,44	0,44	7,59	0,57	8,68	0,69	9,79	0,82	10,97	0,92
1,75	0,14	3,50	0,22	5,19	0,33	6,48	0,45	7,62	0,57	8,71	0,70	9,82	0,82	11,00	0,92
1,80	0,14	3,54	0,22	5,23	0,33	6,52	0,45	7,66	0,57	8,74	0,70	9,84	0,82	11,02	0,92
1,85	0,14	3,63	0,23	5,28	0,34	6,54	0,45	7,69	0,58	8,77	0,71	9,88	0,83		
1,89	0,14	3,69	0,23	5,32	0,34	6,58	0,45	7,71	0,58	8,80	0,71	9,91	0,83		
1,94	0,15	3,72	0,23	5,35	0,34	6,62	0,46	7,74	0,58	8,83	0,71	9,95	0,84		
1,99	0,15	3,80	0,24	5,40	0,34	6,65	0,46	7,77	0,59	8,86	0,72	9,97	0,84		
2,03	0,15	3,91	0,24	5,43	0,35	6,68	0,47	7,80	0,59	8,90	0,72	10,01	0,84		

Anexo 5: Tabla de datos experimentales de sub-cable 2.

ϵ [%]	σ [GPa]												
0,00	0,01	2,96	0,17	4,95	0,26	6,75	0,38	8,31	0,53	9,72	0,69	11,14	0,84
0,03	0,01	3,01	0,17	5,05	0,27	6,78	0,39	8,34	0,54	9,76	0,69	11,19	0,84
0,12	0,01	3,05	0,17	5,11	0,27	6,83	0,39	8,39	0,54	9,80	0,70	11,23	0,85
0,24	0,01	3,12	0,18	5,15	0,27	6,87	0,39	8,43	0,54	9,84	0,70	11,26	0,85
0,33	0,02	3,16	0,18	5,20	0,27	6,91	0,40	8,44	0,55	9,87	0,70	11,28	0,85
0,40	0,02	3,20	0,18	5,26	0,28	6,96	0,40	8,49	0,55	9,91	0,71	11,33	0,86
0,49	0,03	3,26	0,18	5,29	0,28	7,02	0,41	8,54	0,55	9,95	0,71	11,36	0,86
0,58	0,03	3,37	0,19	5,35	0,28	7,04	0,41	8,56	0,56	9,98	0,72	11,39	0,86
0,69	0,03	3,41	0,19	5,40	0,29	7,09	0,41	8,61	0,56	10,02	0,72	11,44	0,87
0,81	0,04	3,47	0,19	5,44	0,29	7,12	0,42	8,66	0,57	10,08	0,73	11,47	0,87
0,93	0,04	3,53	0,19	5,49	0,29	7,16	0,42	8,67	0,57	10,14	0,73	11,52	0,87
1,33	0,08	3,57	0,20	5,53	0,29	7,21	0,43	8,72	0,58	10,16	0,74	11,54	0,88
1,40	0,08	3,63	0,20	5,59	0,30	7,24	0,43	8,75	0,58	10,20	0,74	11,58	0,88
1,47	0,09	3,69	0,20	5,62	0,30	7,29	0,43	8,79	0,59	10,25	0,75	11,62	0,88
1,54	0,09	3,74	0,20	5,68	0,30	7,33	0,44	8,83	0,59	10,29	0,75	11,67	0,89
1,63	0,10	3,78	0,20	5,71	0,31	7,39	0,44	8,87	0,59	10,31	0,75	11,70	0,89
1,68	0,10	3,83	0,21	5,78	0,31	7,41	0,44	8,91	0,60	10,35	0,76	11,73	0,89
1,75	0,10	3,88	0,21	5,81	0,31	7,46	0,45	8,96	0,60	10,38	0,76	11,77	0,90
1,82	0,11	3,93	0,21	5,86	0,32	7,50	0,45	8,98	0,61	10,43	0,76	11,80	0,90
1,88	0,12	3,99	0,21	5,91	0,32	7,54	0,46	9,04	0,61	10,45	0,77	11,85	0,90
1,94	0,12	4,04	0,22	5,94	0,32	7,58	0,46	9,06	0,61	10,50	0,77	11,89	0,90
1,99	0,12	4,08	0,22	6,00	0,33	7,62	0,46	9,12	0,62	10,52	0,78	11,92	0,91
2,05	0,13	4,14	0,22	6,03	0,33	7,66	0,47	9,15	0,62	10,57	0,78	11,97	0,91
2,12	0,13	4,18	0,22	6,10	0,33	7,72	0,47	9,17	0,63	10,59	0,78	12,01	0,91
2,18	0,13	4,24	0,23	6,12	0,34	7,74	0,48	9,23	0,63	10,64	0,79	12,04	0,91
2,24	0,14	4,28	0,23	6,18	0,34	7,78	0,48	9,25	0,63	10,67	0,79	12,08	0,92
2,29	0,14	4,33	0,23	6,21	0,34	7,83	0,48	9,29	0,64	10,70	0,80	12,13	0,92
2,35	0,14	4,38	0,23	6,27	0,35	7,87	0,49	9,31	0,64	10,74	0,80	12,16	0,92
2,41	0,15	4,43	0,23	6,31	0,35	7,90	0,49	9,35	0,64	10,79	0,80	12,21	0,92
2,46	0,15	4,49	0,24	6,35	0,35	7,92	0,49	9,40	0,65	10,81	0,81	12,24	0,93
2,52	0,15	4,53	0,24	6,40	0,36	7,98	0,50	9,44	0,66	10,86	0,81	12,28	0,93
2,57	0,15	4,59	0,24	6,44	0,36	8,02	0,50	9,48	0,66	10,89	0,82	12,31	0,93
2,63	0,16	4,67	0,25	6,48	0,36	8,06	0,51	9,50	0,66	10,93	0,82	12,36	0,93
2,69	0,16	4,74	0,25	6,52	0,37	8,10	0,51	9,54	0,67	10,96	0,82	12,38	0,93
2,74	0,16	4,77	0,25	6,57	0,37	8,15	0,51	9,59	0,67	11,01	0,82	12,45	0,94
2,80	0,16	4,82	0,25	6,62	0,37	8,20	0,52	9,61	0,68	11,04	0,83	12,85	0,94
2,85	0,17	4,88	0,26	6,66	0,38	8,23	0,52	9,65	0,68	11,07	0,83		
2,91	0,17	4,93	0,26	6,70	0,38	8,26	0,53	9,69	0,68	11,11	0,83		

Anexo 6: Tabla de datos experimentales de sub-cable 3.

ε [%]	σ [GPa]												
0,00	0,00	2,59	0,16	4,75	0,25	6,57	0,37	8,14	0,52	9,6	0,68	10,9	0,82
0,08	0,01	2,65	0,16	4,80	0,25	6,61	0,38	8,18	0,53	9,7	0,69	11,0	0,82
0,17	0,01	2,75	0,16	4,84	0,26	6,65	0,38	8,22	0,53	9,7	0,69	11,0	0,82
0,27	0,01	2,80	0,17	4,89	0,26	6,70	0,39	8,26	0,53	9,7	0,70	11,0	0,82
0,36	0,02	2,85	0,17	4,94	0,26	6,74	0,39	8,29	0,54	9,8	0,70	11,1	0,83
0,45	0,02	2,91	0,17	4,98	0,26	6,78	0,39	8,33	0,54	9,8	0,70	11,1	0,83
0,54	0,02	2,96	0,17	5,03	0,27	6,81	0,40	8,37	0,55	9,8	0,71	11,1	0,83
0,62	0,03	3,01	0,18	5,08	0,27	6,86	0,40	8,41	0,55	9,9	0,71	11,2	0,83
0,71	0,03	3,06	0,18	5,13	0,27	6,90	0,40	8,45	0,55	9,9	0,71	11,2	0,84
0,79	0,04	3,12	0,18	5,17	0,27	6,94	0,41	8,49	0,56	10,0	0,72	11,2	0,84
0,85	0,05	3,16	0,18	5,22	0,28	6,99	0,41	8,53	0,56	10,0	0,72	11,3	0,84
0,92	0,05	3,21	0,18	5,26	0,28	7,02	0,41	8,56	0,57	10,0	0,73	11,3	0,85
0,99	0,06	3,27	0,19	5,31	0,28	7,07	0,42	8,61	0,57	10,1	0,73	11,3	0,85
1,06	0,06	3,32	0,19	5,36	0,29	7,11	0,42	8,65	0,58	10,1	0,73	11,3	0,85
1,13	0,07	3,36	0,19	5,41	0,29	7,15	0,43	8,68	0,58	10,1	0,73	11,4	0,85
1,19	0,07	3,42	0,19	5,46	0,29	7,19	0,43	8,72	0,58	10,2	0,74	11,4	0,85
1,27	0,08	3,47	0,19	5,50	0,29	7,23	0,43	8,76	0,59	10,2	0,74	11,4	0,86
1,33	0,08	3,52	0,20	5,55	0,30	7,27	0,44	8,79	0,59	10,2	0,75	11,5	0,86
1,39	0,09	3,56	0,20	5,59	0,30	7,32	0,44	8,83	0,60	10,3	0,75	11,5	0,86
1,44	0,09	3,62	0,20	5,64	0,30	7,35	0,44	8,87	0,60	10,3	0,75	11,5	0,86
1,49	0,10	3,67	0,20	5,69	0,31	7,39	0,45	8,91	0,61	10,3	0,75	11,6	0,87
1,55	0,10	3,72	0,20	5,73	0,31	7,43	0,45	8,95	0,61	10,4	0,76	11,6	0,87
1,60	0,10	3,77	0,21	5,77	0,31	7,47	0,46	8,98	0,61	10,4	0,76	11,6	0,87
1,66	0,11	3,82	0,21	5,82	0,32	7,52	0,46	9,02	0,62	10,4	0,76	11,6	0,87
1,71	0,11	3,87	0,21	5,87	0,32	7,56	0,46	9,06	0,62	10,5	0,77	11,7	0,87
1,77	0,12	3,97	0,21	5,91	0,32	7,59	0,47	9,09	0,62	10,5	0,77	11,7	0,88
1,82	0,12	4,02	0,22	5,96	0,33	7,63	0,47	9,13	0,63	10,5	0,77	11,7	0,88
1,88	0,12	4,07	0,22	6,05	0,33	7,67	0,48	9,17	0,64	10,6	0,78	11,8	0,88
1,93	0,13	4,12	0,22	6,09	0,34	7,70	0,48	9,21	0,64	10,6	0,78	11,8	0,88
2,03	0,13	4,21	0,23	6,13	0,34	7,75	0,48	9,24	0,64	10,6	0,78	11,8	0,88
2,08	0,14	4,26	0,23	6,17	0,34	7,79	0,49	9,28	0,64	10,7	0,79	11,8	0,89
2,18	0,14	4,31	0,23	6,22	0,35	7,83	0,49	9,32	0,65	10,7	0,79		
2,24	0,14	4,36	0,23	6,26	0,35	7,87	0,50	9,36	0,66	10,7	0,79		
2,29	0,14	4,45	0,24	6,29	0,35	7,91	0,50	9,40	0,66	10,7	0,80		
2,34	0,15	4,51	0,24	6,33	0,36	7,95	0,50	9,43	0,66	10,8	0,80		
2,40	0,15	4,55	0,24	6,36	0,36	7,99	0,51	9,47	0,67	10,8	0,80		
2,44	0,15	4,60	0,24	6,41	0,36	8,02	0,51	9,51	0,67	10,8	0,81		
2,49	0,16	4,66	0,25	6,45	0,36	8,06	0,51	9,54	0,67	10,9	0,81		
2,54	0,16	4,70	0,25	6,49	0,37	8,10	0,52	9,58	0,68	10,9	0,81		

Anexo 7: Tabla de datos experimentales de cable de 9 elementos, experimento A.

ε [%]	F [kN]
0,0000	0,0000
0,5590	0,7349
0,9990	1,3433
1,5880	2,1681
2,3040	3,1562
3,1560	4,2932
4,0060	5,4043
4,8830	6,5813
5,7960	7,9220
6,6070	9,2832
7,4510	10,9266
8,2850	12,8047
9,1480	14,9976
10,0400	17,4448
10,9140	19,8482
11,7830	21,9694
12,3960	23,0979

Anexo 8: Tabla de datos experimentales de cable de 9 elementos, experimento B.

ε [%]	F [kN]												
0,00	0,00	1,36	2,14	3,26	4,86	5,47	7,51	7,52	11,48	9,68	16,88	11,86	22,53
0,08	0,01	1,38	2,20	3,35	4,94	5,50	7,57	7,57	11,61	9,74	17,03	11,92	22,67
0,09	0,03	1,43	2,28	3,37	4,96	5,56	7,65	7,62	11,73	9,79	17,18	11,99	22,81
0,16	0,05	1,47	2,37	3,41	5,03	5,62	7,74	7,67	11,86	9,85	17,33	12,05	22,94
0,18	0,07	1,50	2,45	3,48	5,09	5,68	7,82	7,73	11,98	9,92	17,48	12,10	23,08
0,23	0,09	1,54	2,49	3,54	5,16	5,75	7,91	7,80	12,11	10,00	17,63	12,17	23,21
0,26	0,12	1,59	2,58	3,59	5,22	5,80	7,99	7,86	12,24	10,04	17,78	12,23	23,34
0,31	0,15	1,62	2,65	3,62	5,28	5,82	8,06	7,90	12,37	10,09	17,93	12,28	23,46
0,35	0,18	1,66	2,74	3,66	5,34	5,88	8,16	7,95	12,50	10,13	18,08	12,33	23,59
0,40	0,21	1,68	2,81	3,72	5,40	5,94	8,26	8,03	12,63	10,20	18,23	12,40	23,71
0,42	0,25	1,72	2,89	3,76	5,46	5,99	8,35	8,09	12,76	10,26	18,38	12,45	23,83
0,45	0,30	1,80	2,97	3,83	5,52	6,05	8,44	8,16	12,89	10,30	18,53	12,52	23,95
0,47	0,34	1,84	3,05	3,91	5,59	6,11	8,54	8,21	12,99	10,38	18,68	12,57	24,07
0,53	0,39	1,90	3,13	3,95	5,65	6,14	8,60	8,25	13,14	10,44	18,83	12,63	24,19
0,56	0,43	1,93	3,18	4,01	5,69	6,20	8,73	8,29	13,23	10,48	18,93	12,67	24,27
0,57	0,47	1,99	3,25	4,05	5,75	6,23	8,80	8,34	13,37	10,52	19,08	12,73	24,38
0,61	0,51	2,04	3,33	4,11	5,82	6,28	8,90	8,38	13,51	10,58	19,23	12,77	24,49
0,64	0,56	2,08	3,40	4,17	5,88	6,35	9,00	8,46	13,64	10,65	19,34	12,84	24,58
0,65	0,57	2,12	3,48	4,22	5,95	6,40	9,09	8,52	13,78	10,70	19,50	12,88	24,67
0,66	0,63	2,17	3,55	4,29	6,01	6,45	9,20	8,56	13,92	10,76	19,66	12,94	24,77
0,69	0,69	2,21	3,61	4,35	6,08	6,50	9,30	8,60	14,06	10,81	19,81	13,00	24,87
0,70	0,74	2,26	3,69	4,40	6,14	6,54	9,40	8,67	14,20	10,86	19,96	13,05	24,97
0,73	0,81	2,30	3,76	4,47	6,21	6,61	9,51	8,72	14,34	10,91	20,11	13,08	25,04
0,78	0,88	2,36	3,82	4,53	6,28	6,65	9,61	8,79	14,49	10,99	20,26	13,14	25,15
0,81	0,95	2,42	3,89	4,58	6,31	6,72	9,72	8,82	14,63	11,03	20,40	13,20	25,24
0,82	0,97	2,47	3,96	4,63	6,40	6,77	9,83	8,88	14,77	11,08	20,55	13,27	25,33
0,84	1,04	2,51	4,03	4,68	6,47	6,82	9,94	8,92	14,87	11,12	20,69	13,32	25,42
0,86	1,10	2,56	4,09	4,72	6,52	6,85	10,01	9,02	15,06	11,15	20,79	13,34	25,43
0,92	1,21	2,60	4,13	4,77	6,59	6,93	10,12	9,04	15,16	11,23	20,93	13,38	25,50
0,95	1,27	2,66	4,20	4,83	6,67	6,97	10,23	9,10	15,31	11,28	21,08	13,42	25,57
1,00	1,36	2,72	4,26	4,88	6,74	7,01	10,32	9,15	15,45	11,34	21,22	13,47	25,61
1,03	1,45	2,76	4,33	4,95	6,82	7,07	10,44	9,21	15,60	11,41	21,36	13,51	25,62
1,07	1,54	2,82	4,39	5,01	6,89	7,12	10,56	9,26	15,75	11,45	21,51	13,55	25,58
1,12	1,62	2,89	4,45	5,07	6,97	7,18	10,68	9,32	15,90	11,51	21,65		
1,11	1,64	2,93	4,51	5,14	7,04	7,25	10,79	9,37	16,00	11,56	21,78		
1,15	1,72	2,97	4,58	5,19	7,12	7,29	10,92	9,43	16,17	11,61	21,92		
1,20	1,80	3,02	4,64	5,24	7,19	7,34	11,03	9,50	16,32	11,67	22,06		
1,23	1,87	3,10	4,70	5,31	7,28	7,38	11,15	9,57	16,48	11,73	22,20		
1,28	1,96	3,16	4,76	5,35	7,35	7,45	11,28	9,57	16,63	11,78	22,34		
1,30	2,05	3,22	4,82	5,40	7,43	7,50	11,40	9,64	16,78	11,84	22,43		

Anexo 9: Tabla de datos experimentales de cable de 9 elementos, experimento C.

ε [%]	F [kN]												
0,00	0,00	1,13	1,01	2,92	3,90	4,92	6,20	6,72	9,14	8,61	13,31	10,54	18,36
0,02	0,00	1,19	1,10	2,96	3,97	4,95	6,26	6,76	9,24	8,66	13,45	10,60	18,51
0,07	0,01	1,23	1,15	3,08	4,04	5,01	6,34	6,82	9,34	8,72	13,54	10,66	18,65
0,06	0,02	1,27	1,22	3,13	4,11	5,05	6,41	6,87	9,45	8,74	13,67	10,70	18,80
0,08	0,02	1,28	1,29	3,15	4,18	5,14	6,48	6,90	9,55	8,80	13,81	10,78	18,95
0,13	0,03	1,30	1,36	3,22	4,23	5,16	6,55	6,94	9,66	8,85	13,96	10,80	19,05
0,16	0,04	1,32	1,45	3,26	4,29	5,22	6,63	7,01	9,77	8,86	14,10	10,85	19,17
0,20	0,05	1,36	1,53	3,33	4,36	5,29	6,70	7,06	9,87	8,97	14,24	10,87	19,32
0,23	0,06	1,33	1,61	3,37	4,43	5,31	6,75	7,11	9,98	9,01	14,37	10,97	19,47
0,26	0,07	1,39	1,70	3,42	4,49	5,38	6,83	7,16	10,09	9,04	14,52	11,02	19,61
0,27	0,08	1,43	1,79	3,51	4,56	5,43	6,91	7,20	10,18	9,09	14,66	11,08	19,75
0,30	0,10	1,42	1,87	3,55	4,62	5,48	6,98	7,27	10,30	9,16	14,81	11,14	19,90
0,32	0,11	1,57	1,96	3,60	4,69	5,53	7,06	7,28	10,38	9,21	14,95	11,18	20,04
0,32	0,13	1,65	2,05	3,66	4,75	5,61	7,14	7,36	10,50	9,27	15,09	11,23	20,18
0,38	0,15	1,68	2,11	3,71	4,79	5,65	7,22	7,43	10,62	9,33	15,23	11,28	20,32
0,41	0,17	1,76	2,20	3,79	4,87	5,73	7,30	7,48	10,73	9,33	15,33	11,35	20,47
0,43	0,19	1,81	2,29	3,82	4,93	5,72	7,38	7,53	10,84	9,37	15,47	11,40	20,60
0,44	0,21	1,92	2,38	3,84	4,98	5,79	7,47	7,56	10,96	9,45	15,62	11,46	20,74
0,47	0,24	1,98	2,47	3,91	5,04	5,83	7,55	7,62	11,08	9,49	15,76	11,51	20,89
0,53	0,26	2,01	2,56	3,99	5,10	5,87	7,63	7,67	11,20	9,53	15,88	11,56	20,97
0,52	0,29	2,06	2,65	4,00	5,17	5,90	7,69	7,69	11,32	9,60	16,03	11,59	21,11
0,53	0,31	2,11	2,73	4,07	5,23	6,00	7,81	7,81	11,44	9,67	16,18	11,61	21,23
0,56	0,33	2,15	2,82	4,13	5,30	6,03	7,87	7,88	11,56	9,74	16,33	11,68	21,35
0,60	0,38	2,22	2,91	4,16	5,36	6,09	7,92	7,89	11,69	9,85	16,48	11,74	21,48
0,62	0,40	2,28	2,99	4,25	5,42	6,14	8,02	7,95	11,82	9,88	16,63	11,81	21,61
0,67	0,44	2,34	3,08	4,30	5,49	6,18	8,12	7,98	11,90	9,92	16,78	11,87	21,73
0,70	0,48	2,42	3,16	4,39	5,55	6,21	8,21	8,05	12,02	10,02	16,93	11,90	21,84
0,73	0,52	2,45	3,22	4,45	5,62	6,24	8,30	8,05	12,15	10,05	17,08	11,94	21,94
0,79	0,57	2,49	3,28	4,51	5,68	6,34	8,39	8,15	12,28	10,09	17,23	12,00	22,01
0,82	0,61	2,55	3,37	4,56	5,75	6,37	8,49	8,19	12,40	10,11	17,32	12,03	22,13
0,85	0,67	2,60	3,45	4,60	5,82	6,41	8,59	8,25	12,53	10,19	17,47	12,09	22,22
0,90	0,72	2,65	3,53	4,63	5,86	6,49	8,68	8,33	12,66	10,24	17,61	12,12	22,27
0,92	0,78	2,71	3,60	4,69	5,93	6,53	8,78	8,37	12,75	10,31	17,77	12,15	22,30
1,01	0,84	2,77	3,68	4,73	6,00	6,59	8,88	8,40	12,91	10,36	17,92	12,18	22,32
1,06	0,90	2,84	3,75	4,79	6,06	6,62	8,94	8,49	13,04	10,43	18,07		
1,10	0,96	2,89	3,83	4,84	6,13	6,67	9,04	8,56	13,17	10,46	18,21		

Anexo 10: Tabla de datos experimentales de cable de 9 elementos, experimento D.

ε [%]	F [kN]												
0,00	0,00	1,96	4,13	3,89	6,25	5,86	9,06	7,72	12,99	9,47	17,89	11,35	22,74
0,00	0,00	2,01	4,21	3,96	6,32	5,91	9,16	7,75	13,12	9,51	18,05	11,38	22,83
0,00	0,03	2,08	4,28	4,02	6,39	5,95	9,23	7,81	13,26	9,57	18,20	11,45	22,97
0,08	0,12	2,12	4,33	4,07	6,46	6,01	9,34	7,88	13,40	9,61	18,31	11,50	23,11
0,16	0,23	2,17	4,39	4,14	6,54	6,08	9,44	7,91	13,51	9,66	18,46	11,56	23,24
0,22	0,37	2,21	4,46	4,19	6,61	6,12	9,55	7,96	13,66	9,72	18,62	11,62	23,37
0,28	0,52	2,27	4,53	4,23	6,64	6,20	9,66	8,03	13,80	9,76	18,77	11,69	23,46
0,33	0,63	2,33	4,59	4,28	6,72	6,26	9,77	8,06	13,89	9,82	18,93	11,73	23,58
0,40	0,80	2,40	4,66	4,35	6,79	6,32	9,88	8,10	14,04	9,86	19,08	11,78	23,70
0,44	0,95	2,44	4,70	4,39	6,87	6,35	9,95	8,17	14,18	9,90	19,19	11,84	23,82
0,51	1,14	2,48	4,76	4,47	6,95	6,40	10,06	8,23	14,33	9,97	19,34	11,89	23,94
0,57	1,31	2,55	4,82	4,53	7,03	6,46	10,18	8,28	14,47	10,01	19,50	11,96	24,06
0,64	1,49	2,62	4,89	4,55	7,08	6,52	10,29	8,33	14,62	10,06	19,65	12,00	24,14
0,69	1,60	2,70	4,95	4,62	7,16	6,59	10,40	8,35	14,71	10,12	19,80	12,06	24,25
0,76	1,78	2,77	5,01	4,66	7,24	6,64	10,52	8,39	14,86	10,19	19,92	12,12	24,37
0,81	1,95	2,82	5,07	4,71	7,32	6,68	10,60	8,44	15,01	10,24	20,09	12,18	24,48
0,88	2,11	2,83	5,11	4,77	7,40	6,73	10,68	8,52	15,15	10,28	20,19	12,20	24,59
0,94	2,27	2,90	5,17	4,83	7,49	6,78	10,82	8,59	15,30	10,34	20,35	12,25	24,70
0,99	2,43	2,96	5,23	4,91	7,57	6,86	10,94	8,64	15,45	10,41	20,50	12,27	24,77
1,04	2,53	3,02	5,28	4,94	7,63	6,92	11,06	8,68	15,55	10,47	20,65	12,33	24,88
1,12	2,67	3,07	5,35	5,01	7,71	6,95	11,19	8,73	15,70	10,52	20,80	12,44	24,98
1,18	2,81	3,15	5,41	5,06	7,80	7,00	11,31	8,78	15,86	10,57	20,94	12,49	25,08
1,23	2,94	3,19	5,45	5,12	7,89	7,05	11,39	8,83	16,01	10,62	21,04	12,54	25,18
1,28	3,06	3,26	5,52	5,17	7,98	7,08	11,52	8,88	16,16	10,67	21,19	12,59	25,27
1,36	3,18	3,31	5,58	5,24	8,07	7,16	11,65	8,94	16,31	10,71	21,33	12,66	25,32
1,43	3,30	3,36	5,62	5,27	8,13	7,21	11,77	8,97	16,41	10,77	21,47	12,72	25,35
1,45	3,34	3,42	5,69	5,35	8,22	7,25	11,90	9,00	16,52	10,83	21,61	12,80	25,44
1,51	3,46	3,47	5,76	5,40	8,32	7,30	12,03	9,05	16,69	10,89	21,75	12,85	25,51
1,56	3,56	3,52	5,81	5,45	8,41	7,36	12,15	9,11	16,85	10,94	21,85	12,91	25,54
1,64	3,66	3,55	5,87	5,50	8,48	7,38	12,24	9,16	17,01	11,01	21,98	12,93	25,60
1,68	3,75	3,59	5,94	5,54	8,59	7,45	12,37	9,21	17,16	11,07	22,11	12,99	25,60
1,75	3,82	3,67	6,00	5,58	8,65	7,50	12,50	9,27	17,32	11,12	22,25	13,06	25,50
1,80	3,89	3,74	6,07	5,65	8,76	7,57	12,63	9,31	17,42	11,19	22,38		
1,86	3,97	3,80	6,14	5,72	8,86	7,61	12,77	9,36	17,58	11,25	22,52		
1,90	4,05	3,85	6,21	5,78	8,96	7,68	12,90	9,41	17,74	11,29	22,65		

Anexo 11: Tabla de datos experimentales del cable R_1 35[tonf].

ε [%]	F [kN]						
0,000	7,848	1,667	63,569	3,802	131,127	6,406	234,132
0,026	8,502	1,719	64,092	3,828	132,108	6,458	236,312
0,052	9,156	1,745	64,877	3,880	134,724	6,563	240,672
0,078	9,810	1,823	67,231	3,906	136,032	6,667	243,662
0,104	10,464	1,849	68,016	3,984	138,648	6,745	245,904
0,130	11,772	1,927	70,632	4,063	141,787	6,797	247,997
0,182	14,388	2,031	72,725	4,115	143,880	6,849	250,090
0,234	17,004	2,057	73,248	4,193	147,019	6,875	251,136
0,286	19,620	2,109	75,210	4,245	149,112	6,979	253,229
0,313	20,928	2,161	77,172	4,323	152,055	7,005	253,752
0,339	22,236	2,266	79,265	4,349	153,036	7,083	257,185
0,365	23,544	2,292	79,788	4,401	155,652	7,188	261,764
0,391	24,852	2,344	81,532	4,453	158,268	7,214	262,908
0,417	26,160	2,370	82,404	4,479	159,249	7,266	266,832
0,443	27,468	2,448	84,366	4,557	162,192	7,318	270,756
0,495	29,212	2,474	85,020	4,661	166,116	7,370	271,504
0,521	30,084	2,552	87,636	4,766	172,656	7,448	272,624
0,547	30,956	2,630	89,991	4,818	172,656	7,500	273,372
0,599	32,700	2,682	91,560	4,896	175,272	7,552	275,334
0,651	34,008	2,708	92,432	5,000	179,196	7,656	279,258
0,703	35,316	2,760	94,176	5,104	181,812	7,708	281,220
0,755	37,932	2,839	97,119	5,130	182,684	7,760	283,182
0,781	39,240	2,865	98,100	5,182	184,428	7,813	285,144
0,859	41,202	2,891	98,754	5,234	187,044	7,839	286,452
0,885	41,856	2,995	101,370	5,260	188,352	7,969	292,992
0,938	44,472	3,021	102,024	5,339	193,584	8,099	297,352
1,042	47,088	3,125	105,512	5,417	195,826	8,125	298,224
1,146	51,012	3,177	107,256	5,521	198,816	8,255	301,961
1,172	52,320	3,229	109,872	5,599	202,740	8,307	303,456
1,198	53,628	3,281	112,488	5,625	204,048	8,359	305,325
1,224	54,151	3,333	114,232	5,729	207,785	8,490	309,996
1,302	55,721	3,411	116,848	5,807	210,588	8,516	310,487
1,328	56,244	3,438	117,720	5,833	211,896	8,672	313,429
1,380	57,290	3,490	119,464	5,938	217,128	8,698	313,920
1,458	58,860	3,516	120,336	6,068	222,360	8,724	314,705
1,484	59,645	3,620	124,260	6,198	228,900	8,828	317,844
1,536	61,215	3,698	127,203	6,224	230,208	8,880	318,891
1,589	62,784	3,724	128,184	6,276	231,329	8,958	320,460

Anexo 12: Tabla de datos experimentales de Cable R_2 35[tonf].

ε [%]	F [kN]						
0,0268	1,281	1,5518	70,143	3,5585	160,145	5,1906	244,701
0,0535	3,843	1,6054	72,065	3,6120	163,134	5,2442	247,263
0,0803	8,968	1,6321	73,026	3,6388	164,629	5,3244	252,644
0,1070	14,093	1,6856	75,588	3,7191	169,113	5,3512	254,438
0,1338	16,655	1,7659	79,432	3,7726	171,309	5,3779	256,231
0,1605	19,217	1,8729	83,532	3,8796	175,701	5,4314	258,794
0,1873	21,780	1,8997	84,556	3,9064	176,799	5,5117	262,637
0,2140	23,701	1,9799	88,400	3,9331	178,721	5,5920	266,480
0,2408	25,623	2,0067	89,681	3,9866	182,565	5,6187	267,579
0,3211	27,545	2,1137	93,524	4,0134	184,486	5,6455	268,677
0,3478	28,185	2,1940	98,649	4,0669	187,049	5,7525	273,069
0,4281	30,748	2,2475	100,845	4,1204	189,611	5,7793	274,167
0,4816	32,029	2,3278	104,140	4,1739	192,173	5,8060	275,235
0,5084	32,670	2,3813	106,336	4,2007	193,455	5,8595	277,370
0,5886	34,591	2,4883	110,606	4,2542	197,115	5,9398	280,573
0,6154	35,360	2,5418	112,742	4,3077	200,776	5,9666	281,855
0,6421	36,129	2,5953	114,572	4,3612	204,436	5,9933	283,136
0,7224	38,435	2,6221	115,487	4,3880	206,266	6,0736	286,979
0,8027	41,510	2,7023	118,233	4,4147	207,548	6,1003	288,260
0,8294	42,535	2,7291	119,148	4,4682	210,110	6,1539	290,182
0,8562	43,559	2,7559	120,429	4,5485	213,953	6,2341	293,065
0,9097	45,389	2,8629	125,553	4,6020	216,515	6,2876	294,986
0,9365	46,305	2,9431	130,165	4,6288	218,010	6,3144	295,947
1,0435	49,965	2,9967	133,240	4,6555	219,505	6,4482	303,634
1,0702	51,033	3,1037	138,365	4,7625	225,483	6,5284	308,246
1,2040	56,371	3,1304	139,646	4,7893	226,604	6,5819	311,321
1,2575	58,506	3,2375	143,917	4,8161	227,726	6,6087	312,602
1,3378	61,709	3,2910	146,052	4,9231	232,210	6,7157	317,727
1,3646	62,777	3,3445	151,177	4,9766	234,452	6,8227	325,414
1,4181	64,912	3,4248	155,020	5,0569	238,295	6,9298	333,101
1,4983	68,115	3,5050	158,095	5,0836	239,576	7,0100	339,507
1,5251	69,183	3,5318	159,120	5,1639	243,420	7,0903	347,192

Anexo 13: Tabla de datos experimentales del cable R_2 700[tonf].

ε [%]	F [kN]						
0,011	100,615	1,912	1509,229	3,956	3119,080	6,022	5097,845
0,022	134,154	1,989	1576,310	4,033	3186,151	6,099	5164,926
0,066	167,692	2,066	1609,850	4,111	3219,691	6,166	5231,997
0,122	201,231	2,144	1643,381	4,177	3320,312	6,265	5332,618
0,177	268,307	2,221	1744,002	4,243	3353,843	6,320	5399,689
0,232	335,384	2,309	1811,073	4,309	3454,464	6,387	5466,770
0,298	402,461	2,409	1844,614	4,376	3488,004	6,453	5500,310
0,343	469,538	2,486	1911,694	4,431	3555,075	6,519	5567,381
0,420	536,616	2,552	1945,235	4,519	3622,156	6,586	5634,462
0,508	603,693	2,608	1978,765	4,586	3689,227	6,630	5668,002
0,586	704,308	2,663	2012,306	4,652	3789,848	6,685	5735,073
0,641	737,846	2,718	2079,386	4,707	3823,389	6,740	5768,614
0,707	771,385	2,773	2112,927	4,762	3890,460	6,773	5835,694
0,762	838,462	2,840	2146,457	4,818	3924,000	6,818	5869,235
0,818	872,000	2,895	2213,538	4,906	4024,611	6,862	5936,306
0,873	905,539	2,950	2247,079	4,994	4125,233	6,906	5969,846
0,939	939,077	3,017	2280,619	5,072	4158,773	6,961	6036,927
1,006	972,615	3,083	2347,690	5,149	4259,384	7,017	6070,457
1,083	1039,693	3,127	2381,230	5,227	4326,465	7,083	6137,538
1,171	1073,234	3,193	2414,771	5,326	4427,076	7,171	6204,619
1,238	1106,774	3,249	2481,842	5,414	4527,688	7,249	6271,690
1,304	1140,305	3,304	2515,382	5,492	4594,769	7,326	6338,771
1,381	1207,385	3,359	2582,463	5,569	4661,849	7,381	6405,842
1,448	1207,385	3,436	2649,534	5,635	4728,920	7,448	6472,922
1,525	1274,466	3,514	2716,615	5,702	4796,001	7,514	6506,463
1,624	1341,537	3,602	2783,695	5,757	4829,541	7,569	6573,534
1,691	1375,078	3,680	2850,766	5,823	4896,612	7,613	6607,074
1,757	1408,618	3,790	2917,847	5,890	4997,234	7,669	6674,155
1,834	1475,689	3,878	3018,459	5,956	5030,774		

Anexo 14: Tabla de datos experimentales del cable R_3 35[tonf].

ε [%]	F [kN]						
0,000	1,927	2,271	87,356	4,656	190,769	6,757	287,503
0,028	3,854	2,300	88,640	4,770	197,193	6,785	289,045
0,057	5,781	2,385	92,109	4,827	200,404	6,842	292,256
0,085	6,744	2,442	94,421	4,912	204,258	6,927	297,074
0,114	7,708	2,470	95,385	4,940	204,900	6,956	298,679
0,142	8,992	2,555	98,275	4,997	206,185	7,013	301,570
0,199	11,562	2,584	99,239	5,054	208,112	7,069	304,460
0,256	13,489	2,669	102,129	5,082	210,039	7,155	307,929
0,341	17,343	2,697	103,414	5,110	211,966	7,211	310,241
0,426	21,197	2,754	105,983	5,167	214,535	7,297	314,866
0,483	25,051	2,811	108,873	5,196	215,820	7,353	317,949
0,568	26,978	2,868	111,764	5,281	217,747	7,410	320,519
0,653	29,868	2,896	112,865	5,309	219,674	7,438	321,803
0,681	30,831	3,009	117,270	5,366	223,528	7,467	322,445
0,767	32,758	3,066	119,472	5,394	224,684	7,524	323,730
0,823	35,649	3,151	123,326	5,480	228,152	7,580	327,584
0,880	38,539	3,237	127,180	5,508	229,309	7,666	333,365
0,909	39,984	3,293	131,033	5,565	231,236	7,751	337,990
0,994	44,320	3,322	131,997	5,621	233,163	7,808	341,073
1,079	47,211	3,435	135,851	5,650	234,608	7,864	344,927
1,164	50,101	3,464	136,814	5,707	237,498	7,893	346,853
1,278	53,184	3,549	140,668	5,735	238,943	7,950	349,423
1,306	53,955	3,634	144,522	5,763	240,871	8,035	353,277
1,363	55,882	3,691	146,724	5,792	242,798	8,063	354,562
1,420	57,809	3,833	152,230	5,820	244,082	8,120	357,131
1,476	59,736	3,946	158,396	5,877	246,652	8,148	358,415
1,533	61,663	3,975	159,938	5,934	250,505	8,205	362,269
1,590	63,975	4,032	161,480	5,962	252,432	8,233	364,196
1,675	67,444	4,117	163,792	5,991	253,396	8,262	365,481
1,703	68,407	4,145	165,237	6,076	256,286	8,290	366,765
1,789	71,298	4,230	169,573	6,104	257,731	8,319	368,050
1,845	72,949	4,259	171,018	6,189	262,067	8,404	371,904
1,959	76,253	4,344	175,354	6,274	265,921	8,461	375,758
1,987	77,078	4,372	177,281	6,388	271,702	8,517	379,612
2,073	81,414	4,429	181,135	6,473	276,038	8,574	383,466
2,101	82,859	4,486	184,988	6,502	277,483		
2,158	83,823	4,514	186,916	6,615	280,566		
2,215	84,787	4,628	189,999	6,644	281,337		

Anexo 15: Tabla de datos experimentales del cable R_3 700[tonf].

ε [%]	F [kN]	ε [%]	F [kN]	ε [%]	F [kN]
0,000	0,000	2,324	1635,003	5,488	4316,400
0,022	32,700	2,412	1667,700	5,621	4447,197
0,077	65,400	2,501	1765,800	5,754	4545,297
0,133	98,100	2,600	1798,497	5,876	4643,397
0,210	130,800	2,711	1863,900	5,975	4741,497
0,299	196,200	2,811	1962,000	6,075	4839,597
0,365	261,600	2,921	2060,100	6,174	4937,697
0,443	327,000	3,021	2125,503	6,285	5035,797
0,498	392,400	3,131	2190,897	6,418	5166,603
0,586	457,800	3,231	2288,997	6,539	5297,400
0,653	523,200	3,331	2387,097	6,628	5362,803
0,730	588,600	3,463	2452,500	6,739	5428,197
0,808	654,000	3,552	2550,600	6,816	5526,297
0,863	719,400	3,640	2583,297	6,927	5657,103
0,941	784,800	3,707	2681,397	7,004	5689,800
1,018	850,200	3,784	2746,800	7,082	5755,203
1,073	850,200	3,884	2812,203	7,148	5853,303
1,151	915,597	3,994	2910,303	7,225	5918,697
1,217	948,303	4,105	3008,403	7,292	5984,100
1,295	1013,697	4,205	3139,200	7,391	6082,200
1,372	1046,403	4,315	3204,603	7,469	6147,603
1,438	1111,797	4,404	3269,997	7,546	6245,703
1,516	1144,503	4,470	3368,097	7,602	6278,400
1,582	1177,200	4,603	3498,903	7,701	6376,500
1,682	1209,897	4,703	3564,297	7,801	6441,903
1,781	1307,997	4,813	3727,800	7,878	6540,003
1,859	1340,703	4,924	3825,900	7,967	6638,103
1,959	1406,097	5,057	3924,000	8,055	6703,497
2,047	1471,500	5,178	4022,100	8,166	6834,303
2,124	1504,197	5,300	4120,200		
2,213	1569,600	5,400	4185,603		