



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTIMACIÓN NUMÉRICA DE LA INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN
ASIMÉTRICA DE DAÑO EN LA RESPUESTA ESTÁTICA DE CABLES
CON GEOMETRÍA MULTICAPA-MULTINIVEL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS ANTONIO RAMÍREZ GUZMÁN

PROFESOR GUÍA:

JUAN FELIPE BELTRAN MORALES.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO ANTONIO HERRERA.

ENZO DE VICO.

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: NICOLÁS RAMÍREZ G.
FECHA: 28/10/2015
PROF. GUÍA: Sr. JUAN FELIPE BELTRÁN M.

“ESTIMACIÓN NÚMERICA DE LA INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN ASIMÉTRICA DE DAÑO
EN LA RESPUESTA ESTÁTICA DE CABLES CON GEOMETRÍA MULTICAPA-MULTINIVEL”

El objetivo principal del presente trabajo de título es extender un modelo mecánico no lineal propuesto por De Vico (2013) para estimar la capacidad residual y capacidad de deformación de cables de geometría multicapa-multinivel dañados superficialmente de forma asimétrica. El modelo mecánico propuesto se basa en que el cable dañado se modela como una viga plana no lineal con pequeñas deformaciones considerando hipótesis de Bernoulli. Se asume que el cable está sometido a una carga axial y a una fuerza de corte uniforme por unidad de longitud en las direcciones principales de la sección dañada generando una flexión biaxial en éste. Esta fuerza de corte es inducida por la distribución asimétrica del daño considerando la geometría helicoidal inicial de los componentes que forman el cable. El grado de asimetría de la distribución de daño se cuantifica mediante un ente escalar denominado índice de asimetría (IA). Un algoritmo incremental-iterativo seccional controlado por desplazamiento es implementado en base a las soluciones de las ecuaciones diferenciales que gobiernan la deformada del cable dañado en ambos planos principales. Este algoritmo permite estimar la configuración deformada, distribuciones de tensiones y deformaciones, la resistencia residual y capacidad de deformación axial del cable dañado considerando la no linealidad geométrica y del material de los componentes que lo conforman.

Los análisis realizados en este trabajo de título se basan en dos tipos de configuraciones de cables: (1) geometría multicapa (i.e., se identifica solo una estructura helicoidal en la composición geométrica de la sección del cable); (2) geometría multinivel, en que los cables están formados por cables de menor diámetro (sub-cables) dispuestos en forma paralela. En el primer caso se realiza un estudio numérico del tipo paramétrico para cables comerciales de acero cuyos diámetros varían desde 2 mm a 32 mm. En el segundo caso, las simulaciones de las curvas de capacidad se comparan con curvas experimentales reportadas en la literatura (Ward et al., 2006) para cables de poliéster cuyos diámetros varían de 32 mm a 166 mm con porcentaje de área dañada en un rango de 5% a 15%. En este segundo análisis, se incorpora el estudio del efecto de localización de deformación en torno a la sección dañada mediante el uso de un modelo numérico propuesto por Beltrán y Williamson (2011).

De los resultados obtenidos se concluye que para el caso de geometría multicapa, considerando los rangos de valores del parámetro IA (0-0.5) y diámetro de los cables (2 mm -32 mm), el efecto de la asimetría del daño tiene un mayor impacto en cables de mayor diámetro para iguales valores de IA. En el caso particular de este estudio, no hay un efecto significativo en la rigidez del cable relativo al efecto de área neta (ignorar contribución de componentes fracturados), se reduce la capacidad de deformación de los componentes no fracturados hasta un 25% y se disminuye la resistencia residual del cable hasta un 3% relativo al área neta. Para el caso de geometría multinivel con sub-cables dispuestos en forma paralela, las curvas de capacidad considerando los efectos de localización de deformaciones y de asimetría del daño (en forma independiente) son cota superior e inferior respectivamente de las curvas experimentales. El efecto de localización de deformación induce una reducción porcentual en resistencia residual y capacidad de deformación cercana al porcentaje de área dañada con respecto a los valores de cable intacto. Por otro lado, el efecto de distribución asimétrica del daño induce una reducción de la capacidad de deformación del cable menor que el efecto de localización de deformación (máximo reducción de un 6% relativa al cable intacto para todos los casos estudiados). La distribución asimétrica tiene un mayor impacto en la reducción de la capacidad residual del cable dañado: esta reducción es mayor porcentualmente que el área dañada llegando hasta un 25% para el caso de una sección dañada en un 15%. El efecto de la asimetría en la distribución del daño depende de la construcción de la sección del cable, y para un mismo tipo de cable, este efecto aumenta con el incremento del diámetro y del valor de IA. Los algoritmos asociados a los modelos de localización de deformación y daño asimétrico resultan ser computacionalmente eficientes y robustos.

Agradezco a todos aquellos que me han acompañado durante este proceso en el cual se le pone fin a otra etapa importante de mi vida. Quisiera agradecer de manera particular a mis padres, hermanos, amigos, polola e integrantes de la comisión los cuales fueron una fuente de apoyo constante durante todo este tiempo. Finalmente agradezco a FONDECYT (proyecto N°1150409) por el apoyo económico a la presente investigación.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <i>Objetivos generales</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.3 METODOLOGÍA.....	3
1.4 ALCANCES DE LOS CAPÍTULOS	4
CAPÍTULO 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
CAPÍTULO 3 : EXTENSIÓN DEL MODELO MECÁNICO DE VIGA NO LINEAL	11
3.1 MODELO DE VIGA NO LINEAL	11
3.2 EXTENSIÓN DEL MODELO DE VIGA NO LINEAL	17
3.2.1 <i>Determinación F_{des} para caso multicapa</i>	17
3.2.2 <i>Determinación F_{des} para caso multinivel con subcables en paralelo</i>	20
3.2.3 <i>Algoritmo utilizado en la obtención de capacidad residual</i>	22
CAPÍTULO 4 : APLICACIÓN DEL MODELO MECÁNICO EXTENDIDO A CABLES DE GEOMETRÍA HELICOIDAL MULTICAPA Y MULTINIVEL CON SUBCABLES EN PARALELO	27
4.1 CABLES CON CONFIGURACIÓN MULTICAPA	27
4.2 CABLES CON CONFIGURACIÓN MULTINIVEL	33
CAPÍTULO 5 : ANÁLISIS Y RESULTADOS	41
5.1 ANÁLISIS CORRESPONDIENTE A LA INFLUENCIA DEL DAÑO ASIMÉTRICO EN CABLES CON CONFIGURACIÓN MULTICAPA.....	41
5.1.1 <i>Robustez del modelo multicapa</i>	56
5.2 ANÁLISIS CORRESPONDIENTE A LA INFLUENCIA DEL DAÑO ASIMÉTRICO EN CABLES DE CONFIGURACIÓN MULTINIVEL CON SUBCABLES EN PARALELO	65
5.2.1 <i>Análisis de deformaciones de componentes en cables multinivel con subcables en paralelo</i>	65
5.2.2 <i>Resultados obtenidos con modelo de viga no lineal extendido en cables multinivel con subcables en paralelo</i>	70
5.2.3 <i>Análisis complementarios para configuraciones multinivel</i>	98
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6.1 RECOMENDACIONES FUTURAS	106
BIBLIOGRAFÍA	107
ANEXO A: CURVAS DE CAPACIDAD PARA CONFIGURACIONES MULTICAPA.....	109
ANEXO B: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE COMPONENTES PARA CASO MULTINIVEL	122
ANEXO C: CURVAS DE CAPACIDAD-DEFORMACIÓN OBTENIDAS DE ENSAYOS REALIZADOS EN LA LITERATURA.....	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 3-1: CASO PARTICULAR DE LA APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO POR DE VICO [10].....	11
FIGURA 3-2: CASOS PARTICULARES DE LA APLICACIÓN DEL MODELO EXTENDIDO (MULTICAPA Y MULTINIVEL).....	11
FIGURA 3.1-1: DIAGRAMA CUERPO LIBRE DE UNA SECCIÓN LONGITUDINAL DEL CABLE (E.DE VICO, 2013)	12
FIGURA 3.1-2: GRADOS DE LIBERTAD ASOCIADOS AL CABLE EN ESTUDIO (E.DE VICO, 2013)	14
FIGURA 3.1-3: F_{DES} PARA CASO PARTICULAR DE DAÑO ASIMÉTRICO (E.DE VICO, 2013)	15
FIGURA 3.2.1-1: TRASPASO DE FUERZA RADIAL CAPA A CAPA PARA CASO MULTICAPA.....	19
FIGURA 3.2.2-1: A) SECCIÓN TRANSVERSAL DE CABLE DAÑADO ASIMÉTRICAMENTE; B) SUBCABLE FORMADO POR TRES COMPONENTES HELICOIDALES.....	22
FIGURA 3.2.3-1: ALGORITMO CONSIDERADO PARA LA MODELACIÓN.....	26
FIGURA 4.1-1: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS CONSIDERADOS EN CABLES MULTICAPA	28
FIGURA 4.1-2: LEY CONSTITUTIVA DEL MATERIAL PARA ANÁLISIS MULTICAPA	30
FIGURA 4.2-1: LEY CONSTITUTIVA PARA CABLES MULTINIVEL CON SUBCABLES EN PARALELO SEGÚN REFERENCIA [6]	36
FIGURA 5.1-1: DIAGRAMA DEFORMACIONES EN SECCIÓN DE UN CABLE MULTICAPA DAÑADO	47
FIGURA 5.1-2: INFLUENCIA DEL EFECTO ESCALA EN RELACIÓN IA VS RD EN CABLES CON CONFIGURACIÓN MULTICAPA.....	55
FIGURA 5.1-3: INFLUENCIA DEL EFECTO ESCALA EN RELACIÓN IA VS RC EN CABLES CON CONFIGURACIÓN MULTICAPA.....	55
FIGURA 5.1.1-1: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=10 DEFORMACIONES. CABLE R7_A.....	56
FIGURA 5.1.1-2: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=30 DEFORMACIONES. CABLE R7_A.....	57
FIGURA 5.1.1-3: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=60 DEFORMACIONES. CABLE R7_A.....	57
FIGURA 5.1.1-4: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=10 DEFORMACIONES. CABLE R7_C.....	58
FIGURA 5.1.1-5: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=30 DEFORMACIONES. CABLE R7_C.....	58
FIGURA 5.1.1-6: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=60 DEFORMACIONES. CABLE R7_C.....	59
FIGURA 5.1.1-7: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=10 DEFORMACIONES. CABLE R37_A.....	59
FIGURA 5.1.1-8: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=30 DEFORMACIONES. CABLE R37_A.....	60
FIGURA 5.1.1-9: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=60 DEFORMACIONES. CABLE R37_A.....	60
FIGURA 5.1.1-10: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=10 DEFORMACIONES. CABLE R37_C.....	61
FIGURA 5.1.1-11: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=30 DEFORMACIONES. CABLE R37_C.....	61
FIGURA 5.1.1-12: ITERACIONES NECESARIAS PARA DI=60 DEFORMACIONES. CABLE R37_C.....	62
FIGURA 5.1.1-13: COMPARACIÓN DE CONVERGENCIA ENTRE CASOS R7_A Y R37_C PARA $\epsilon_0=2\%$ Y DI=60.....	63
FIGURA 5.1.1-14: COMPARACIÓN DE CONVERGENCIA ENTRE CASOS R7_A Y R37_C PARA $\epsilon_0=0.5\%$ Y DI=60.....	63
FIGURA 5.1.1-15: COMPARACIÓN DE CONVERGENCIA ENTRE CASOS R7_A Y R37_C PARA $\epsilon_0=0.01\%$ Y DI=60.....	64
FIGURA 5.2.1-1: DIAGRAMA DEFORMACIONES EN SECCIÓN DAÑADA DE UN CABLE MULTINIVEL CON SUBCABLES EN PARALELO (WARD ET AL, 2006)	66
FIGURA 5.2.1-2: DEFORMADA GLOBAL CABLE BEXCO 35 TON 10% DAÑO PARA UN 30% DE $E_{FRACTURA}$	68
FIGURA 5.2.1-3: DEFORMADA SEGÚN EJE "Y" CABLE BEXCO 35 TON 10% DAÑO PARA UN 30% DE $E_{FRACTURA}$	68
FIGURA 5.2.1-4: DEFORMADA SEGÚN EJE "Z" CABLE BEXCO 35 TON 10% DAÑO PARA UN 30% DE $E_{FRACTURA}$	69
FIGURA 5.2.2-1: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE MARLOW 35 TON 10% DAÑO	72
FIGURA 5.2.2-2: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE MARLOW 700 TON 5% DAÑO	73
FIGURA 5.2.2-3: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE MARLOW 700 TON 10% DAÑO	74
FIGURA 5.2.2-4: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE WHITEHILL 35 TON 10% DAÑO	80
FIGURA 5.2.2-5: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE WHITEHILL 700 TON 10% DAÑO	81
FIGURA 5.2.2-6: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE WHITEHILL 700 TON 15% DAÑO	82
FIGURA 5.2.2-7: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE BEXCO 35 TON 10% DAÑO	87
FIGURA 5.2.2-8: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE BEXCO 700 TON 10% DAÑO	88
FIGURA 5.2.2-9: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE BEXCO 700 TON 5% DAÑO	89

FIGURA 5.2.2-10: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE CSL 700 TON 10% DAÑO.....	94
FIGURA 5.2.2-11: CURVAS CAPACIDAD-DEFORMACIÓN CASO MULTINIVEL CABLE CSL 700 TON 5% DAÑO.....	95
FIGURA 5.2.3-1: RELACIÓN DAÑO [%] VS PÉRDIDA CAPACIDAD [%] PARA MODELOS Y ENSAYOS DE CONFIGURACIÓN MULTINIVEL	99
FIGURA 5.2.3-2: ZONA ESPERABLE DE RESULTADOS EN FUNCIÓN DE CURVA CON CONCENTRACIÓN DE DEFORMACIONES Y CURVA CON EFECTO DE ASIMETRÍA.....	100
FIGURA 5.2.3-3: PÉRDIDA DE DEFORMACIÓN Y CAPACIDAD VS IA PARA CABLE MULTINIVEL CON 5% DE DAÑO.....	101
FIGURA 5.2.3-4: PÉRDIDA DE DEFORMACIÓN Y CAPACIDAD VS IA PARA CABLE MULTINIVEL CON 10% DE DAÑO.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1-1: CONFIGURACIONES PARA CABLE GALGO DE FABRICANTE PRODINSA.....	28
TABLA 4.1-2: CONFIGURACIONES PARA CABLE RETENIDAS DE FABRICANTE PRODINSA	29
TABLA 4.1-3: SECCIONES DAÑADAS E IA PARA CONFIGURACIÓN GALGO 1x12	31
TABLA 4.1-4: SECCIONES DAÑADAS E IA PARA CONFIGURACIÓN GALGO 1x19	31
TABLA 4.1-5: SECCIONES DAÑADAS E IA PARA CONFIGURACIÓN RETENIDAS 1x7.....	32
TABLA 4.1-6: SECCIONES DAÑADAS E IA PARA CONFIGURACIÓN RETENIDAS 1x19.....	32
TABLA 4.1-7: SECCIONES DAÑADAS E IA PARA CONFIGURACIÓN RETENIDAS 1x37	33
TABLA 4.2-1: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PARA CABLES TIPO MARLOW Y BEXCO (WARD ET AL, 2006)	34
TABLA 4.2-2: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PARA CABLES TIPO WHITEHILL Y CSL (WARD ET AL, 2006)	35
TABLA 4.2-3: DEFORMACIONES ÚLTIMAS DE CABLES NO DAÑADOS ENSAYADOS.....	37
TABLA 4.2-4: CONFIGURACIÓN DAÑADA PARA CABLE MARLOW ENSAYO 35 TON (WARD ET AL, 2006)	38
TABLA 4.2-5: CONFIGURACIÓN DAÑADA PARA CABLE WHITEHILL ENSAYO 35 TON (WARD ET AL, 2006)	38
TABLA 4.2-6: CONFIGURACIÓN DAÑADA PARA CABLE BEXCO ENSAYO 35 TON (WARD ET AL, 2006)	38
TABLA 4.2-7: CONFIGURACIONES DAÑADA PARA CABLE MARLOW ENSAYO 700 TON (WARD ET AL, 2006)	39
TABLA 4.2-8: CONFIGURACIONES DAÑADA PARA CABLE BEXCO ENSAYO 700 TON (WARD ET AL, 2006)	39
TABLA 4.2-9: CONFIGURACIONES DAÑADA PARA CABLE CSL ENSAYO 700 TON (WARD ET AL, 2006)	40
TABLA 4.2-10: CONFIGURACIONES DAÑADA PARA CABLE WHITEHILL ENSAYO 700 TON (WARD ET AL, 2006)	40
TABLA 5.1-1: RESULTADOS DE CAPACIDAD Y DEFORMACIÓN SEGÚN MODELO EXTENDIDO Y ÁREA NETA PARA CABLE GALGO 1x12	42
TABLA 5.1-2: RESULTADOS DE CAPACIDAD Y DEFORMACIÓN SEGÚN MODELO EXTENDIDO Y ÁREA NETA PARA CABLE GALGO 1x19	43
TABLA 5.1-3: RESULTADOS DE CAPACIDAD Y DEFORMACIÓN SEGÚN MODELO EXTENDIDO Y ÁREA NETA PARA CABLE RETENIDAS 1x7.....	44
TABLA 5.1-4: RESULTADOS DE CAPACIDAD Y DEFORMACIÓN SEGÚN MODELO EXTENDIDO Y ÁREA NETA PARA CABLE RETENIDAS 1x19.....	45
TABLA 5.1-5: RESULTADOS DE CAPACIDAD Y DEFORMACIÓN SEGÚN MODELO EXTENDIDO Y ÁREA NETA PARA CABLE RETENIDAS 1x37.....	46
TABLA 5.1-6: RC Y RD PARA CABLE GALGO 1x12	48
TABLA 5.1-7: RC Y RD PARA CABLE GALGO 1x19	49
TABLA 5.1-8: RC Y RD PARA CABLE RETENIDAS 1x7.....	50
TABLA 5.1-9: RC Y RD PARA CABLE RETENIDAS 1x19.....	51
TABLA 5.1-10: RC Y RD PARA CABLE RETENIDAS 1x37.....	52
TABLA 5.2.1-1: DEFORMACIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA DE COMPONENTES EN CABLE DE ENSAYO 35 TON A 30% E_{FRACTURA}	66
TABLA 5.2.1-2: DEFORMACIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA DE COMPONENTES EN CABLE DE ENSAYO 35 TON A 80% E_{FRACTURA}	66

TABLA 5.2.1-3: DEFORMACIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA DE COMPONENTES EN CABLE DE ENSAYO 700 TON A 30% E_{FRACTURA}	66
TABLA 5.2.1-4: DEFORMACIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA DE COMPONENTES EN CABLE DE ENSAYO 700 TON A 80% E_{FRACTURA}	66
TABLA 5.2.2-1: CAPACIDADES Y DEFORMACIONES PARA CABLE MARLOW	75
TABLA 5.2.2-2: CAPACIDADES Y DEFORMACIONES PARA CABLE WHITEHILL.....	83
TABLA 5.2.2-3: CAPACIDADES Y DEFORMACIONES PARA CABLE BEXCO	90
TABLA 5.2.2-4: CAPACIDADES Y DEFORMACIONES PARA CABLE CSL.....	96

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los cables, como elementos estructurales, son empleados en muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo grúas, ascensores, sistema de soporte en minas, puentes, conductores eléctricos, atraque de naves marinas en puertos, sistema de anclaje, entre otros. Esta diversidad de usos motiva a los fabricantes a proveer una gama de configuraciones de cables adecuados para diferentes propósitos, teniendo éstos diferente número y distribución de componentes que los conforman, en donde los componentes pueden estar hechos de distintos materiales, tales como acero, fibra natural y sintética [1,2].

La demanda mecánica (reflejado en la distribución de tensiones y deformaciones, entre otros), abrasión, interacción con el medio ambiente (corrosión, luz ultra-violeta, químicos, exposición a altas temperaturas, etc), degrada continuamente las propiedades de cada componente del cable durante su operación. El proceso de degradación, que representa los efectos de daño en el cable, podría resultar en la ruptura de uno o más componentes del cable, lo que eventualmente se traduciría en la falla de éste. Los daños en cables, los cuales podrían empezar con el transporte y proceso de instalación de éstos, son diversos dependiendo de la aplicación que se les otorgue, por lo que resulta indispensable conocer las condiciones ambientales, solicitaciones y características mecánicas del cable en uso para determinar la continuidad o retiro éste.

El entendimiento de la interacción de los factores que inducen daño al cable y su dependencia con las condiciones de operación, son esenciales para estimar tanto la vida útil del cable en la etapa de diseño, como para establecer los métodos y criterios apropiados para la inspección y retiro de cables respectivamente. De esta forma, la vida útil de un cable puede ser prolongada siguiendo un programa de planificación de instalación, operación, mantención e

inspección [3]. En este contexto, la evaluación de sensibilidad de un cable asociado a cierto daño resulta esencial para el diseño de éste.

La serviciabilidad y posterior reemplazo de un cable dañado, queda determinado por la capacidad residual de los componentes que lo conforman en sus diferentes niveles de construcción. Esta decisión se sustenta en criterios basados en la capacidad residual [4,5,6,7,8,9], tanto del cable como de sus componentes, obtenidos de manera experimental. De esta forma, los valores experimentales deben considerar diferentes grados de daño (número de componentes fracturados) y diferentes distribuciones (simétrica y asimétrica) del mismo en la sección transversal del cable. La disponibilidad de un modelo mecánico que entregue una buena estimación de la capacidad residual de un cable y de sus respectivos componentes significaría en no realizar programas experimentales extensos y costosos para la obtención de los parámetros necesarios para la evaluación de un cable dañado de acuerdo a un criterio en particular.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

- Extender el rango de aplicabilidad del modelo mecánico de viga no lineal propuesto por De Vico [10] para estimar la capacidad residual de cables dañados en forma asimétrica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Extender la formulación del modelo mecánico de viga no lineal para secciones transversales de cables de órdenes superiores.

- Aplicación del modelo mecánico extendido en cables con diferente geometría y distribución de daño.
- Comparar los resultados obtenidos con el modelo mecánico extendido con datos experimentales recopilados en la literatura.
- Analizar la robustez y eficiencia computacional del modelo propuesto.

1.3 Metodología

- **Revisión de literatura**

Seleccionar material referido a la estimación de capacidad residual en cables con geometría variada, aplicados en diversas especialidades.

- **Recopilación de datos de ensayos experimentales de capacidad residual de cables en la literatura**

Recopilar datos de ensayos experimentales que contemplen principalmente capacidad residual y capacidad de deformaciones en cables con distinta configuración geométrica y distinta distribución del daño.

- **Extender el modelo mecánico de viga no lineal**

El modelo mecánico de viga no lineal propuesto por De Vico [10], se desarrolla para estimar la capacidad residual de cables asociados a hélices de grado igual a 1. Este modelo se extenderá mediante nuevos algoritmos

para estimar capacidad residual de cables de grado superior. Ampliando, de esta forma, el rango de aplicabilidad de éste en la práctica.

- **Especificar características geométricas y mecánicas de cables**

Especificar la sección transversal de cables utilizados en la práctica, junto con su material de construcción y la distribución de daño para cada caso, las cuales serán utilizadas posteriormente con el modelo de viga no lineal extendido.

- **Conclusiones**

Discutir los resultados obtenidos y comparaciones realizadas, en relación a los objetivos propuestos.

1.4 Alcances de los capítulos

Los capítulos a tratar en la presente memoria se señalan a continuación:

- **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Se señalan aspectos generales a tratar durante el desarrollo de la presente memoria. Entre estos se señalan:

- Motivación
- Objetivos
- Metodología
- Alcances de capítulos

➤ **CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se presenta un resumen de cada referencia bibliográfica seleccionada, haciendo referencia a las hipótesis, consideraciones, criterios, factores, entre otros, para la estimación de carga residual de cables dañados que cada una asume. En general se rescatarán datos experimentales, modelos numéricos y analíticos para la estimación de capacidad residual presentes en dichas referencias.

➤ **CAPÍTULO 3: EXTENSIÓN DEL MODELO MECÁNICO DE VIGA NO LINEAL**

Este capítulo pretende explicar la importancia de extender el modelo mecánico de viga no lineal descrito por De Vico [10] para estimar la capacidad residual de cables de grado mayor a 1, junto con describir en detalle las hipótesis y algoritmos del modelo ya mencionado y las limitaciones que éste presenta. Para esto, se desarrollarán las hipótesis necesarias para la extensión del modelo mecánico, las cuales se incluirán dentro de éste.

➤ **CAPÍTULO 4: APLICACIÓN DEL MODELO MECÁNICO EXTENDIDO A CABLES DE GEOMETRÍA HELICOIDAL MULTICAPA Y MULTINIVEL CON SUBCABLES EN PARALELO**

El objetivo de este capítulo es aplicar el modelo mecánico propuesto desarrollado en el capítulo anterior, para estimar la capacidad residual de cables con geometría helicoidal de orden mayor a 1 para diversas configuraciones geométricas, los cuales son utilizados en diferentes rubros.

➤ **CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y RESULTADOS**

Se analizan los resultados de las configuraciones adoptadas en el capítulo anterior al aplicar el modelo mecánico propuesto, y se comparan con datos experimentales y/o modelos propuestos por autores citados en el capítulo 2.

➤ **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este último capítulo se presentan las conclusiones que engloban los resultados obtenidos con el modelo mecánico propuesto y su comparación respectiva con datos experimentales y/o modelos propuestos en la literatura para la estimación de capacidad residual de cables.

Finalmente se incluyen recomendaciones de futuros estudios potenciales que se pudieron desprender de las conclusiones realizadas en este trabajo.

CAPÍTULO 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Desde hace décadas, los cables han sido la solución para diversos problemas presentados en la historia del hombre. Si bien satisfacía ciertos problemas tales como levantar o sostener objetos de pequeña envergadura mediante fuerza humana, surgió solamente como un elemento secundario. Hoy en día, la tecnología ha inventado equipos que pueden llevar a un cable a su máxima capacidad pudiendo formar parte de los elementos estructurales principales de ciertas estructuras, en los que destacan proyectos mineros, amarre de flota marina en mar adentro, puentes colgantes, ascensores, sistema de anclaje, entre otros.

Al ser considerados como elementos principales en una estructura nace la necesidad de entender y comprender la mecánica y comportamiento que éstos poseen, con el fin de poder modelar dichas características y así diseñar correctamente sin incurrir en errores, los cuales podrían ser catastróficos.

Es así que distinguir los parámetros que controlan el comportamiento de un cable resulta fundamental para su respectivo estudio. Dentro de éstos, el nivel de daño y su distribución en la sección transversal de un cable resulta un parámetro primordial a estudiar para determinar la capacidad residual y capacidad de deformación que posee dicho cable dañado según resultados y conclusiones discutidas en [10], [13].

Un cable, al formar parte del elemento principal de una estructura, está sometido a fuerzas considerablemente altas y muchas veces en extremas condiciones ambientales (corrosión, altas y bajas temperaturas, etc). Por lo cual se espera que en algún momento éste tienda a la rotura de algunos de sus componentes y con ello un cierto daño porcentual de su sección. Como resultado de este daño se verá una reducción en capacidad y deformación [10], [13], la cual es necesaria cuantificar para poder determinar si el cable puede soportar los esfuerzos solicitantes o si será necesario reemplazarlo de forma inmediata.

Lograr un modelo que estime con buena exactitud (i.e con una baja desviación) la capacidad residual del cable dañado en relación a un ensayo, podría tener una significancia tanto en el costo de realizar el ensayo como en tiempo de reacción de que decisión adoptar, siendo así una herramienta de pre-diseño antes de realizar ensayos.

Con el fin de complementar y/o representar la información proveniente de ensayos, diversos autores han propuesto modelos mecánicos para estimar la capacidad de un cable con cierto grado y distribución de daño.

MacDougall y Bartlett [12] considera el efecto de la asimetría en un modelo mecánico aplicado a un cable de nivel 1 cuya sección transversal está constituida por seis componentes helicoidales que rodean a un séptimo componente recto el cual representa el eje longitudinal del cable. El efecto de la asimetría en el cable está representado por una fuerza resultante en desequilibrio en dirección radial y perpendicular al eje longitudinal del cable. Esta fuerza se genera producto de la rotura de uno o más componentes helicoidales del cable. Esto se traduce en una concentración de tensiones en los componentes adyacentes al daño, que repercute en una disminución de la capacidad residual y capacidad de deformación del cable.

Beltrán y Vargas [13], [19] a su vez, mediante la utilización de modelos de elementos finitos en 3D, estudió el efecto de la asimetría sobre la capacidad residual, capacidad de deformación y rigidez (entre otros) en cables de nivel 1 (núcleo formado por un componente recto seguido por una capa de elementos helicoidales a éste) con ley constitutiva tanto lineal como no lineal. Propuso para esto un factor que cuantificara el grado de asimetría de un cable dañado, el cual denominó como IA (Índice de asimetría), de lo que se concluye que mientras mayor es el factor IA mayor es la reducción tanto en capacidad residual como en capacidad de deformación del cable.

Beltrán y De Vico [10], [20] por su parte, utilizó las hipótesis consideradas por MacDougall y Barlett [12] y propuso un modelo mecánico de viga no lineal para llegar a expresiones que pudieran determinar la tensión y deformación de cada uno de los componentes del cable y por consiguiente la capacidad misma de éste. De este estudio se pudo desprender que con el modelo propuesto en su trabajo entregaba una buena aproximación de la respuesta del cable dañado de forma asimétrica respecto a los resultados entregados por los modelos de elementos finitos y datos experimentales, teniendo la ventaja que el tiempo necesario para la convergencia de los resultados era significativamente menor.

Ward (et al., 2006), presentaron un estudio relacionado a cables de poliéster multinivel con subcables en paralelo utilizados como sistema de anclaje de plataformas [6]. Este estudio contempla tres diferentes ensayos para cables de 4 grandes fabricantes en el mundo (Bexco, CSL, Whitehill y Marlow), todos con un daño aproximado del 10% del área seccional transversal del cable a ensayar. El primero de éstos trata de examinar cualitativamente la influencia de la relación largo/diámetro del cable (L/D) en la pérdida de capacidad de cables con una resistencia de magnitud específica de *35 ton*. El daño fue infligido a mitad y cuarto de la luz del cable. El segundo se enfoca en realizar ensayos en cables con una resistencia de magnitud específica de *700 ton* para una relación largo/diámetro (L/D) igual a 40. El daño para este caso varía entre 5% y 15% y fue infligido a mitad de la luz del cable. El último busca validar los resultados del segundo ensayo mediante ensayos seleccionados con distribución de daño similar y para una misma resistencia específica (*700 ton*) pero para una relación largo/diámetro (L/D) de 290. El daño asociado y su ubicación corresponden al mismo patrón del segundo ensayo.

Cada uno de los tres ensayos considera ciclos de carga previos y/o posteriores al daño infligido para el ensayo. Luego se examina el cable para observar si existe o no algún daño progresivo producto del ciclado. Posteriormente se lleva el cable a rotura.

Las conclusiones principales que se pudo desprender de este estudio son las siguientes:

- *El comportamiento y capacidad residual del cable dañado depende tanto del tipo de fabricación del cable como de las condiciones de apoyo que se le den al cable durante el ensayo.*
- *Un daño de 10% de área transversal resulta en una reducción de más del 10% de pérdida de capacidad del cable para la mayoría de los ensayos.*
- *Existe cierta dependencia del factor L/D sobre la capacidad última y deformación de fractura del cable.*
- *Se necesitan una mayor cantidad de ensayos en cables con el mismo daño y distribución de daño éste para poder precisar las técnicas de inspección en este campo.*

CAPÍTULO 3 : EXTENSIÓN DEL MODELO MECÁNICO DE VIGA NO LINEAL

Como se mencionó en un principio, uno de los propósitos principales de este trabajo es poder extender el modelo de viga no lineal adoptado por De Vico [10], el cual solo puede ser aplicado a cables de un nivel y una sola capa (ver caso particular en *Figura 3-1*), a cables con mayor número de capas (multicapa) y/o niveles (multinivel), como por ejemplo se muestran en la *Figura 3-2*:

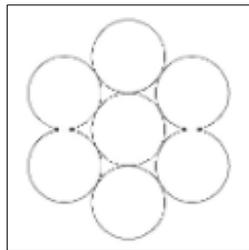


Figura 3-1: Caso particular de la aplicación del modelo propuesto por De Vico [10]

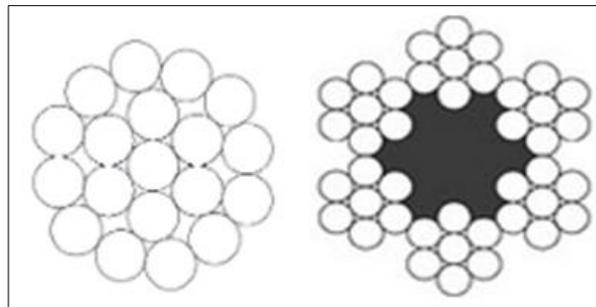


Figura 3-2: Casos particulares de la aplicación del modelo extendido (multicapa y multinivel)

3.1 Modelo de viga no lineal

Si bien el rango de aplicabilidad que se quiere lograr con el modelo extendido es superior, la mecánica e hipótesis que existen detrás del modelo de viga no lineal presentado por De Vico (modelo base) seguirán siendo válidas para el modelo extendido. Por esta razón resulta fundamental describir dicha bases que rigen el modelo descrito por De Vico [10]. Estas se señalan a continuación.

La hipótesis de Bernoulli es válida para este modelo, la cual hace referencia a que dada una cierta deformación de la sección transversal del cuerpo en estudio, esta permanece plana y perpendicular al eje longitudinal de deformación del cuerpo. Por lo que para pequeñas rotaciones de la sección transversal ($\theta \approx 0$) se tiene que:

$$\tan[\theta(x)] \cong \theta(x) = \frac{\partial v(x)}{\partial x} \quad \text{Ec. 3.1-1}$$

Donde $v(x)$ es la deformación vertical de la sección.

Los esfuerzos internos y esfuerzos distribuidos que se tienen en una determinada sección longitudinal de la viga no lineal (cable en estudio) se muestran a continuación:

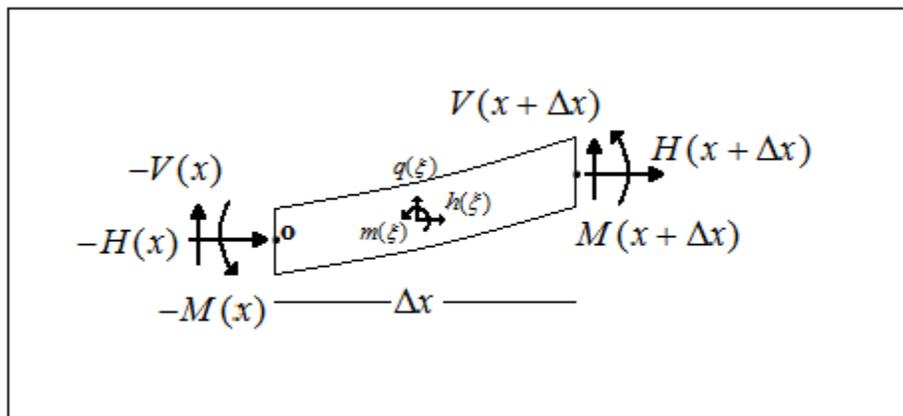


Figura 3.1-1: Diagrama cuerpo libre de una sección longitudinal del cable (E.De Vico, 2013)

En donde $V(x)$, $M(x)$ y $H(x)$ son los esfuerzos internos de corte, momento y axial respectivamente, y $q(\xi)$, $m(\xi)$ y $h(\xi)$ los esfuerzos distribuidos correspondientes.

Realizando el equilibrio de fuerzas en el eje longitudinal, eje vertical, momento respecto al punto "o" y haciendo tender $\Delta X \rightarrow 0$ se obtiene:

$$H' + h = 0 \quad \text{Ec. 3.1-2}$$

$$V' + q = 0 \quad \text{Ec. 3.1-3}$$

$$H' + V(1 + u') - Hv' + m = 0 \quad \text{Ec. 3.1-4}$$

Se considera además, que al tener deformaciones pequeñas, la ley constitutiva para la flexión está determinada por la siguiente expresión:

$$M(x) = EI^{sec} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad \text{Ec. 3.1-5}$$

Diferenciando la ecuación 3.1-4 se tiene que:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial V}{\partial x} \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) + V \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) - H \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial H}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial m}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 3.1-6}$$

Reemplazando las ecuaciones 3.1-2, 3.1-3 y 3.1-5 en la ecuación 3.1-6, y considerando que el esfuerzo y deformación axial no varían a lo largo del cable ($\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$ y $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$) y que no existe un momento distribuido a lo largo del cable ($m(x) = 0$), la ecuación diferencial que determina el desplazamiento vertical del cable queda descrita como:

$$EI^{sec}_{zz} \frac{\partial^4 v(x)}{\partial x^4} - q_y(x) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) - H \frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} = 0 \quad \text{Ec. 3.1-7}$$

Análogamente se obtiene la ecuación diferencial que rige para el desplazamiento horizontal del cable ($w(x)$):

$$EI^{sec}_{yy} \frac{\partial^4 w(x)}{\partial x^4} - q_z(x) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) - H \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = 0 \quad \text{Ec. 3.1-8}$$

En donde EI^{sec}_{yy} e EI^{sec}_{zz} corresponde la rigidez secante a los ejes horizontal y vertical respectivamente para la sección dañada del cable.

En cuanto a las condiciones de borde, en la siguiente figura se muestra los grados de libertad posibles del cable y por ende las restricciones correspondientes.

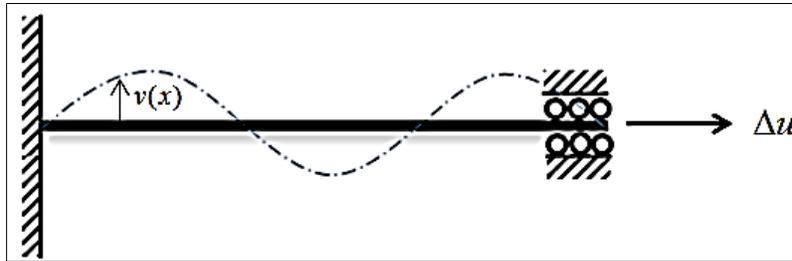


Figura 3.1-2: Grados de libertad asociados al cable en estudio (E.De Vico, 2013)

De acuerdo a lo anterior, las condiciones de bordes para ambas direcciones de análisis ($v(x)$ y $w(x)$) quedan determinadas por:

$$v(x)|_{x=0} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 9}$$

$$v'(x)|_{x=0} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 10}$$

$$v(x)|_{x=L} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 11}$$

$$v'(x)|_{x=L} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 12}$$

$$w(x)|_{x=0} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 13}$$

$$w'(x)|_{x=0} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 14}$$

$$w(x)|_{x=L} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 15}$$

$$w'(x)|_{x=L} = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 16}$$

Para resolver las ecuaciones diferenciales de los desplazamientos perpendiculares del cable (Ec.3.1-7 y Ec.3.1-8) solo hace falta determinar los esfuerzos de corte asociados a cada eje ($q_y(x)$ y $q_z(x)$).

Dichos esfuerzo de cortes se obtienen por medio del equilibrio de fuerzas radiales de cada componente del cable producto de una deformación axial de este, obteniendo una fuerza desbalanceada (F_{des}) que se proyecta en cada eje de análisis. Lo anterior se resume a que:

$$q_y(x) = -F_{des}\cos[\theta(x)] \quad \text{Ec. 3.1 – 17}$$

$$q_z(x) = -F_{des}\sin[\theta(x)] \quad \text{Ec. 3.1 – 18}$$

Para un caso particular propuesto por De Vico (Ver Figura 3.1-3), la fuerza desbalanceada (F_{des}) queda determinada por la fuerza radial del componente opuesto al componente dañado del cable.

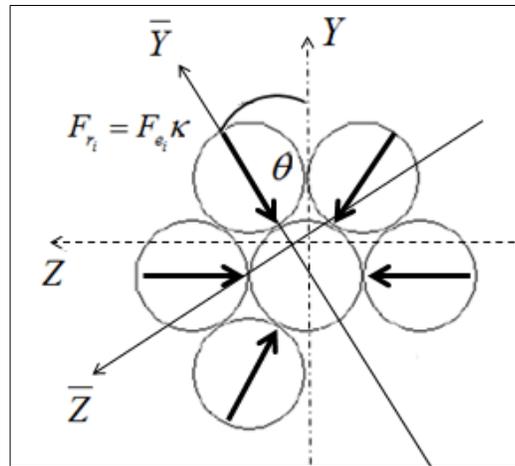


Figura 3.1-3: F_{des} para caso particular de daño asimétrico (E.De Vico, 2013)

En donde F_{ri} es la fuerza radial por unidad de largo del componente “i” [10], (F_{ri}) la fuerza axial asociada al componente “i” y “K” corresponde a la curvatura del mismo e igual a $K = \frac{\sin(\alpha)^2}{R}$ (con R: Radio de hélice del componente “i” y α : Ángulo de hélice del componente “i”), y θ el ángulo de aplicación de la fuerza desbalanceada respecto al eje “y”, la cual se interpreta como la rotación de la sección dañada a una cierta distancia “x” ($\theta(x) = \frac{2\pi x}{p}$, p: paso del cable).

Reemplazando las ecuaciones Ec.3.1-17 y Ec.3.1-18 en las ecuaciones Ec.3.1-7 y Ec.3.1-8 respectivamente, se obtienen las siguientes expresiones:

$$v''''(x) - b_z v''(x) = a_z \cos(dx) \quad \text{Ec. 3.1 - 19}$$

$$w''''(x) - b_y w''(x) = a_y \sin(dx) \quad \text{Ec. 3.1 - 20}$$

En donde:

$$a_z = -\frac{F_{des}}{EI^{sec}_{zz}} \left(1 + \frac{\Delta u}{L}\right) \quad \text{Ec. 3.1 - 21}$$

$$a_y = -\frac{F_{des}}{EI^{sec}_{yy}} \left(1 + \frac{\Delta u}{L}\right) \quad \text{Ec. 3.1 - 22}$$

$$b_z = \frac{H}{EI^{sec}_{zz}} \quad \text{Ec. 3.1 - 23}$$

$$b_y = \frac{H}{EI^{sec}_{yy}} \quad \text{Ec. 3.1 - 24}$$

$$d = \frac{2\pi}{p} \quad \text{Ec. 3.1 - 25}$$

Resolviendo las ecuaciones diferenciales se llega a que:

$$v(x) = \frac{a_z}{b_z d^2 + d^4} \cos(dx) + C_1 \frac{e^{\sqrt{b_z}x}}{b_z} + C_2 \frac{e^{-\sqrt{b_z}x}}{b_z} + C_4 x + C_3 \quad \text{Ec. 3.1 - 26}$$

$$w(x) = \frac{a_y}{b_y d^2 + d^4} \sin(dx) + \bar{C}_1 \frac{e^{\sqrt{b_y}x}}{b_y} + \bar{C}_2 \frac{e^{-\sqrt{b_y}x}}{b_y} + \bar{C}_4 x + \bar{C}_3 \quad \text{Ec. 3.1 - 27}$$

En donde las constantes quedan determinadas según las condiciones de borde anteriormente establecidas:

$$C_1 = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 28}$$

$$C_2 = 0 \quad \text{Ec. 3.1 - 29}$$

$$C_3 = -\frac{a_z}{b_z d^2 + d^4} \quad \text{Ec. 3.1 – 30}$$

$$C_4 = 0 \quad \text{Ec. 3.1 – 31}$$

$$\bar{C}_1 = -\frac{La_y b_y e^{-L\sqrt{b_y}}}{d(b_y + d^2)(2e^{-L\sqrt{b_y}} + L\sqrt{b_y} + L\sqrt{b_y}e^{-L\sqrt{b_y}} - 2)} \quad \text{Ec. 3.1 – 32}$$

$$\bar{C}_2 = \frac{La_y b_y}{d(b_y + d^2)(2e^{-L\sqrt{b_y}} + L\sqrt{b_y} + L\sqrt{b_y}e^{-L\sqrt{b_y}} - 2)} \quad \text{Ec. 3.1 – 33}$$

$$\bar{C}_3 = \frac{La_y(e^{-L\sqrt{b_y}} - 1)}{d(b_y + d^2)(2e^{-L\sqrt{b_y}} + L\sqrt{b_y} + L\sqrt{b_y}e^{-L\sqrt{b_y}} - 2)} \quad \text{Ec. 3.1 – 34}$$

$$\bar{C}_4 = -\frac{2a_y(e^{-L\sqrt{b_y}} - 1)}{d(b_y + d^2)(2e^{-L\sqrt{b_y}} + L\sqrt{b_y} + L\sqrt{b_y}e^{-L\sqrt{b_y}} - 2)} \quad \text{Ec. 3.1 – 35}$$

3.2 Extensión del modelo de viga no lineal

El modelo extendido se sustenta en las bases descritas anteriormente. La diferencia recalca básicamente en la determinación de la fuerza en desequilibrio resultante (F_{des}). Dependiendo si se trata de un caso multicapa o multinivel (subcables en paralelo) las hipótesis y/o ecuaciones para su obtención difieren y por ello resulta necesario describir cada caso.

3.2.1 Determinación F_{des} para caso multicapa

Como se mencionó anteriormente, al estar cada componente del cable en tracción se genera una fuerza radial de cada componente producto de la geometría helicoidal inicial que se tiene. Si no se tienen componentes dañados la fuerza radial de cada componente se anulara con la fuerza radial del componente opuesto correspondiente, por lo que no se generaría ningún esfuerzo de corte.

Por el contrario, en una configuración con daño asimétrico, al tener al menos un componente dañado, la fuerza radial del componente opuesto a dicho componente dañado no se anulará generando así una fuerza en desequilibrio F_{des} según lo descrito por McDougall y Bartlett, 2006 [12].

Para el análisis multicapa ocurre el mismo fenómeno, en donde las fuerzas radiales producidas en las capas externas deben traspasarse a los componentes localizados en la siguiente capa inferior y así sucesivamente. Finalmente, en caso de tener una configuración de daño asimétrico, habrá fuerzas radiales que no serán contrarrestadas obteniendo una fuerza en desequilibrio neta F_{des} . En la Figura 3.2.1-1 se muestra una secuencia que describe lo recién mencionado para un caso de 3 capas.

Se ha descrito como se traspasa esta fuerza radial de los componentes de las capas más externas a las más internas, pero no se ha mencionado como cuantificar cada una de estas fuerzas.

La fuerza radial asociada a componentes de una misma capa difiere en magnitud en relación a componentes ubicados en capas más internas. Para su obtención se basó en el estudio realizado por LeClair [11], quien desarrollo este traspaso de fuerza radial capa a capa considerando que solo existe contacto radial entre componentes del cable. De esta manera, la ecuación que representa la fuerza radial para elementos que se encuentran desde la 3 capa hacia arriba de un cable está determinada como sigue:

$$g_{j,q} = \frac{p_2 \cos(\bar{\alpha}_2)}{p_j \cos(\underline{\alpha}_j)} \left(\prod_{k=3}^{j-1} \frac{\cos(\bar{\alpha}_k)}{\cos(\underline{\alpha}_k)} \right) X_{j,q} \quad \text{Ec. 3.2 - 1}$$

En donde:

- $g_{j,q}$: Fuerza radial del componente "q" en capa "j"
- p_j : Paso correspondiente a la capa "j"
- $\bar{\alpha}_j = \tan^{-1}\left(\frac{p_j}{2\pi(R_j+r_j)}\right)$
- $\underline{\alpha}_j = \tan^{-1}\left(\frac{p_j}{2\pi(R_j-r_j)}\right)$
- R_j : Radio de helice correspondiente a la capa "j"
- r_j : Radio de los componentes de la capa "j"
- $X_{j,q} = K_q * F_{eq}$: Fuerza radial según MacDougall y Bartlett, 2006
- K_q : Curvatura componente "q" de la capa "j"
- F_{eq} : Fuerza axial componente "q" de la capa "j"

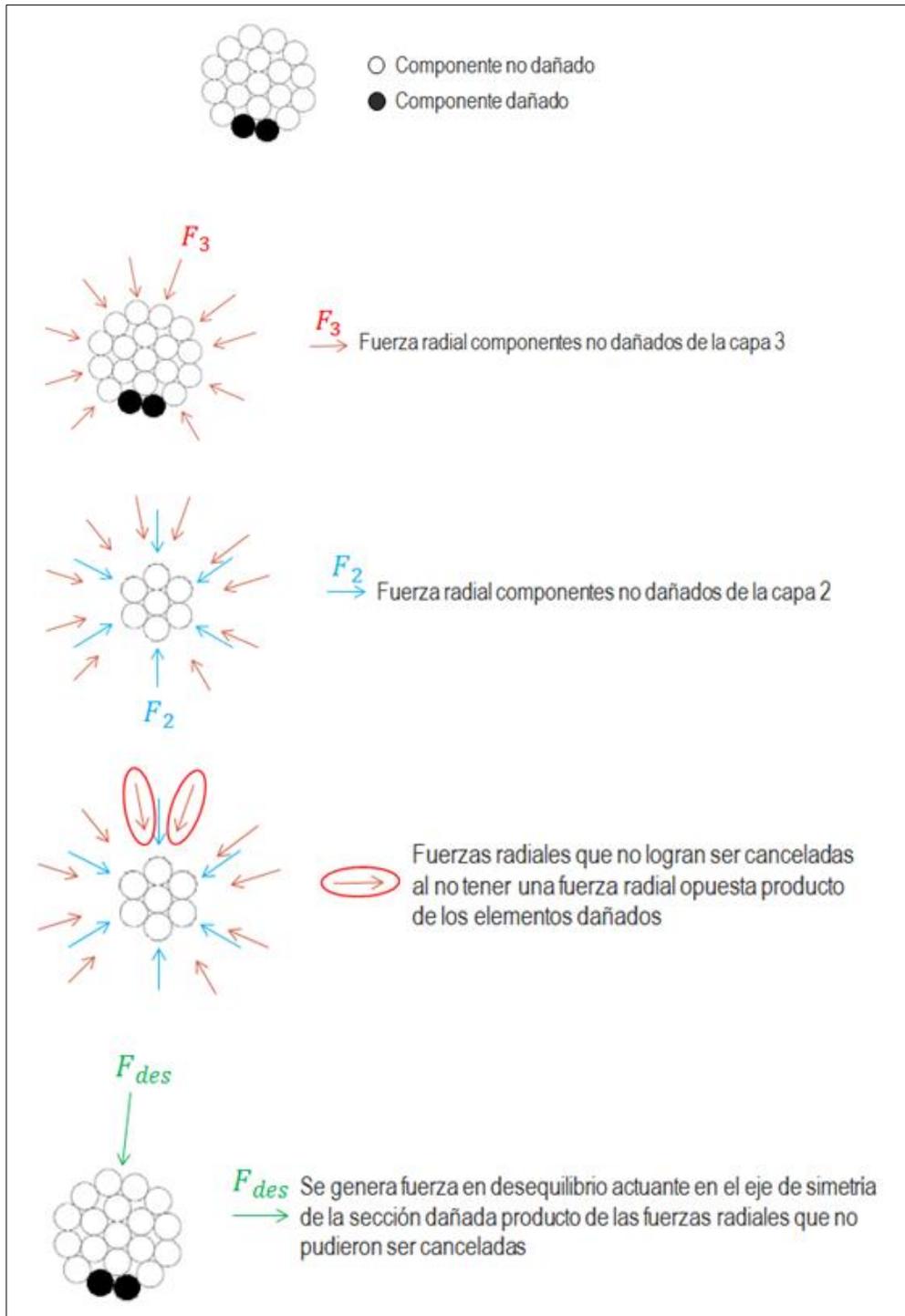


Figura 3.2.1-1: Traspaso de fuerza radial capa a capa para caso multicapa

3.2.2 Determinación F_{des} para caso multinivel con subcables en paralelo

En este estudio, se extiende el procedimiento propuesto en [10] para determinar las expresiones de $q_y(x)$ y $q_z(x)$ debido a que los cables reportados en [6] poseen una geometría con dos niveles: cables (primera estructura helicoidal) formados por cables de menor diámetro (subcables; segunda estructura helicoidal), que en este caso particular están dispuestos en forma paralela. La extensión del procedimiento se ilustra con la sección transversal mostrada en la Figura 3.2.2-1 a): cable formado por 10 subcables dispuestos en forma paralela de dos capas, en que cada subcable está formado por tres componentes con geometría helicoidal (se asume un núcleo ficticio (primera capa) y los tres componentes dispuestos en una segunda capa en la sección del subcable). Se consideran los siguientes pasos y suposiciones:

- Los componentes fracturados de la sección transversal son de color negro. Cada subcable dañado se analiza en forma individual de manera de determinar la fuerza desbalanceada local relativa al sistema de coordenadas $\zeta_0 \zeta_1 \zeta_2$. Por simplicidad se asume que los parámetros geométricos de cada subcable son iguales (paso y ángulo de la hélice y curvatura).
- Los valores de las fuerzas desbalanceadas q_1 y q_2 a lo largo del eje longitudinal del cable dañado ζ_2 están dados por (Figura 3.2.2-1 b))

$$q_1 = \frac{k_2^2 T_{2,[2]}^2}{\cos \theta_{2,[2]}^2} \quad \text{Ec. 3.2 - 2}$$

$$q_2 = \frac{2k_2^2 T_{2,[2]}^2 \sin \Psi_2^2}{\cos \theta_{2,[2]}^2} \quad \text{Ec. 3.2 - 3}$$

donde k_2^2 es la curvatura de un componente del subcable perteneciente a la segunda capa de éste (subíndice) y al segundo nivel del cable (superíndice); $T_{2,[2]}^2$ y $\theta_{2,[2]}^2$ son la fuerza axial y ángulo de la hélice de un componente del subcable perteneciente a la segunda capa de éste (subíndice) y al segundo nivel del cable que forma parte de un componente del nivel 1 del cable (superíndice) perteneciente a la segunda capa de la sección del cable (segundo subíndice en paréntesis cuadrado)

respectivamente; y Ψ_2^2 es el ángulo que forma la dirección de la fuerza radial de contacto de un componente del subcable perteneciente a la segunda capa de éste (subíndice) y al segundo nivel del cable (superíndice), que apunta al centroide del triángulo equilátero que forman los tres componentes que forman un subcable, relativo a la base de este triángulo (30° en este ejemplo). En este ejemplo, las direcciones de las fuerzas desbalanceadas q_1 y q_2 coinciden con las direcciones principales λ_i, η_i ($i = 1,2$) de las secciones de los subcables dañados. De manera de capturar la dependencia del plano λ_i, η_i con respecto a la naturaleza helicoidal de los componentes del subcable en su geometría inicial (antes de la deformación), los ángulos ω_i ($i = 1,2$) (Figura 3.2.2-1 b)) son relacionados con la posición a lo largo del eje longitudinal ζ_2 de los subcables dañados mediante la relación $\omega_i = (2\pi\zeta_2/p_{2,[2]}^2)$, donde $p_{2,[2]}^2$ es el paso de hélice de un componente del subcable perteneciente a la segunda capa de éste (subíndice) y al segundo nivel del cable que forma parte de un componente del nivel 1 del cable (superíndice) perteneciente a la segunda capa de la sección del cable (segundo subíndice en paréntesis cuadrado). Es importante señalar que se asume que los ejes locales $\zeta_0 \zeta_1$ son paralelos a los ejes globales $y_0 y_1$.

- Se asume que la dirección de las fuerzas desbalanceadas q_0 y q_1 apuntan al centroide del cable dañado y en dirección desde el centroide hacia las afueras del cable, suponiendo que el daño de componentes de cada subcable se localiza la capa externa éste y del cable a su vez. La fuerza resultante q_R también apunta centroide del cable dañado formando un ángulo φ con el eje principal y (Figura 3.2.2-1 a)). Por lo tanto, las fuerzas transversales desbalanceadas por unidad de longitud en los planos principales del cable y y z están dadas por

$$q_z = q_R \sin \varphi \quad \text{Ec. 3.2 - 4}$$

$$q_y = q_R \cos \varphi \quad \text{Ec. 3.2 - 5}$$

- Las expresiones anteriores consideran el hecho que los subcables están dispuestos en forma paralela en dos capas, manteniendo su integridad mediante una “chaqueta” (Figura 3.2.2-1 a)). De esta forma, el eje local longitudinal de cada subcable dañado ζ_2 es paralelo al eje longitudinal del cable x (i.e., $\cos \theta_1^1 = \cos \theta_1^2 = 1$). Por lo tanto, el cable dañado es analizado como una viga no lineal de sección transversal constante en que la naturaleza helicoidal de los componentes de los subcables dañados asimétricamente es capturado por las fuerzas transversales q_z y q_y .

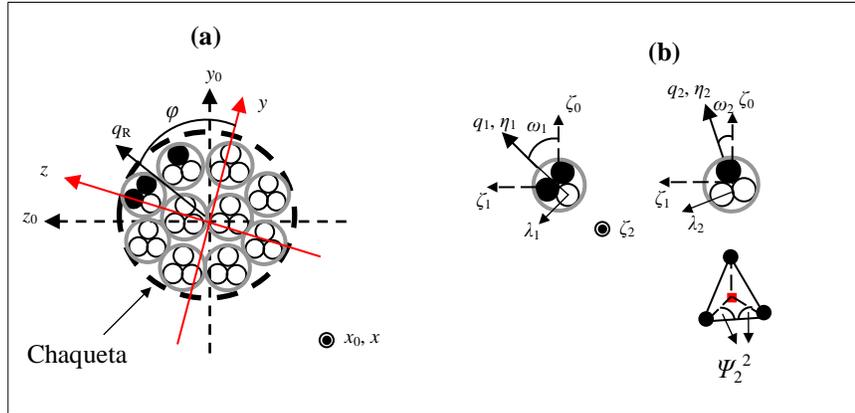


Figura 3.2.2-1: a) Sección transversal de cable dañado asimétricamente; b) Subcable formado por tres componentes helicoidales.

3.2.3 Algoritmo utilizado en la obtención de capacidad residual

De las ecuaciones desarrolladas en los puntos anteriores es posible calcular las deformaciones en ambas direcciones principales en cualquier posición “ x ” del cable ($v(x)$ y $w(x)$). Sin embargo es importante mencionar que el análisis principal de esta memoria es obtener la capacidad residual de un cable dañado, la cual resulta independiente de la posición “ x ” del cable en la que se calcule debido a que la sección transversal dañada del cable no varía a lo largo del cable. De esta forma el análisis que se efectúa es seccional y los cálculos realizados serán obtenidos considerando la luz media del cable ($x = L/2$) para evitar la influencia de las condiciones de borde en los extremos del cable y así tener una convergencia de los resultados más rápida.

En base lo anterior se describe a continuación el algoritmo utilizado para la obtención de la capacidad residual del cable.

- **Paso N°1:**

Para cierto desplazamiento axial correspondiente al análisis “ i ” (ΔL_i), se calcula la carga inicial en el cable para la primera iteración de convergencia ($H_i^{g=0}$) considerando que todos los componentes se deforman en igual magnitud (ϵ_{xx}).

$$H_i^{g=0} = \sum_j^{n^\circ \text{componentes}} A_j \sigma(\varepsilon_{xx_i}) \cos(\alpha_j^i)^3 \quad \text{Ec. 3.2 - 6}$$

$$\varepsilon_{xx_i} = \frac{\Delta L_i}{L} \quad \text{Ec. 3.2 - 7}$$

En donde A_j es el área transversal de cada componente, σ la tensión en cada componente (para el caso inicial es igual para cada uno de los componentes) de acuerdo a la ley constitutiva correspondiente al material del cable en cuestión, y L el largo inicial del cable.

○ **Paso N°2:**

Se calcula la fuerza en desequilibrio (F_{des}) dependiendo del caso que corresponda (multicapa o multinivel) según lo estipulado en el punto 3.2. Se procede a calcular las constantes que gobiernan las ecuaciones diferenciales (Ec.3.1-21 a Ec.3.1-35): $a_z, a_y, b_z, b_y, d, C_1, C_2, C_3, C_4, \bar{C}_1, \bar{C}_2, \bar{C}_3, \bar{C}_4$. Con las constantes ya calculadas es posible obtener los desplazamientos en ambas direcciones principales ($v(x)_i^{g=0}$ y $w(x)_i^{g=0}$) del cable, asociados a la primera iteración “ $g = 0$ ” correspondiente al análisis “ i ” del cable.

○ **Paso N°3:**

Se obtiene el campo de desplazamiento para cada componente del cable asociado a la primera iteración “ $g = 0$ ” correspondiente al análisis “ i ” del cable:

$$u_{x_{i,j}}^{g=0} = \Delta L_i - y_j v'(x)_i^{g=0} - z_j w'(x)_i^{g=0} \quad \text{Ec. 3.2 - 8}$$

$$u_{y_{i,j}}^{g=0} = v(x)_i^{g=0} \quad \text{Ec. 3.2 - 9}$$

$$u_{z_{i,j}}^{g=0} = w(x)_i^{g=0} \quad \text{Ec. 3.2 - 10}$$

○ **Paso N°4:**

Calcular la deformación axial de cada componente del cable asociado a la primera iteración “ $g = 0$ ” correspondiente al análisis “ i ” del cable:

$$\varepsilon_{x_{i,j}}^{g=0} = \varepsilon_{xx_i} - y_j v''(x)_i^{g=0} - z_j w''(x)_i^{g=0} \quad \text{Ec. 3.2 – 11}$$

○ **Paso N°5:**

Se calcula la curvatura para cada componente del cable en la iteración “i” (K_j^i) por definición. Luego se actualiza el radio de hélice, ángulo de hélice y paso para cada componente (R_j^i, α_j^i, p_j^i) considerando una geometría helicoidal del cable:

$$K_j^i = \frac{|\dot{u}_l \times \ddot{u}_l|}{|\dot{u}_l|^3} \quad \text{Ec. 3.2 – 12}$$

$$K_j^i = \frac{\sin(\alpha_j^i)^2}{R_j^i} \quad \text{Ec. 3.2 – 13}$$

$$\tan(\alpha_j^i) = \frac{2\pi R_j^i}{p_j^i} \quad \text{Ec. 3.2 – 14}$$

$$p_j^i = (1 + \varepsilon_{xx_i}) * p_j^0 \quad \text{Ec. 3.2 – 15}$$

Con los parámetros de cada componente del cable actualizados es posible recalculer una carga axial del cable asociado a la siguiente iteración “g = 1” correspondiente al análisis “i” del cable:

$$H_i^{g=1} = \sum_j^{n^\circ \text{componentes}} A_j \sigma(\varepsilon_{x_{i,j}}^{g=0}) \cos(\alpha_j^i)^3 \quad \text{Ec. 3.2 – 16}$$

○ **Paso N°6:**

Finalmente se calcula el error asociado entre la carga del cable obtenida en la última iteración realizada ($g = 1$) y la iteración anterior ($g = 0$) para el análisis “i”:

$$error_i^{g=1} = \frac{H_i^{g=1} - H_i^{g=0}}{H_i^{g=0}} \quad \text{Ec. 3.2 - 17}$$

Si dicho error es menor a un cierto error admisible, $error_{adm}$ (el cual es definido previamente por el usuario), entonces se guarda la última carga axial obtenida en el análisis “ i ” (la cual representa la capacidad residual del cable para la deformación dada ΔL_i) y se procede a iterar para el siguiente análisis “ $i + 1$ ” partiendo de la iteración “ $g = 0$ ”.

En caso contrario, si $error_i^{g=1} > error_{adm}$, se vuelve a iterar para el mismo análisis “ i ” para la siguiente iteración (“ $g = 2$ ”), considerando los parámetros actualizados en la iteración anterior (“ $g = 1$ ”) y desarrollando el “Paso N°1” a partir de la última carga axial del cable obtenida ($H_i^{g=1}$) para luego seguir con los pasos siguientes.

Cabe aclarar que también se debe actualizar el módulo de elasticidad promedio secante ($E_{sec,prom}^{g+1}$) al final de cada iteración “ g ”, para así actualizar las constantes provenientes del desarrollo de las ecuaciones diferenciales:

$$E_{sec,prom}^{g=1} = \frac{\sum_j^{n^\circ \text{componentes}} A_j \sigma(\varepsilon_{x_{i,j}}^{g=0}) / \varepsilon_{x_{i,j}}^{g=0}}{\sum_j^{n^\circ \text{componentes}} A_j} \quad \text{Ec. 3.2 - 18}$$

Se debe recordar que la cantidad de análisis “ i ” queda determinado por el interés del usuario, y que la cantidad de iteraciones “ g ” pueden variar para cada análisis “ i ” dependiendo de cuantas veces sea necesario iterar para que se cumpla la condición del error admisible, $error_{adm}$, la cual está determinada por el usuario.

A continuación se muestra un diagrama resumiendo los pasos del modelo mencionado anteriormente para un análisis cualquiera “ i ”.

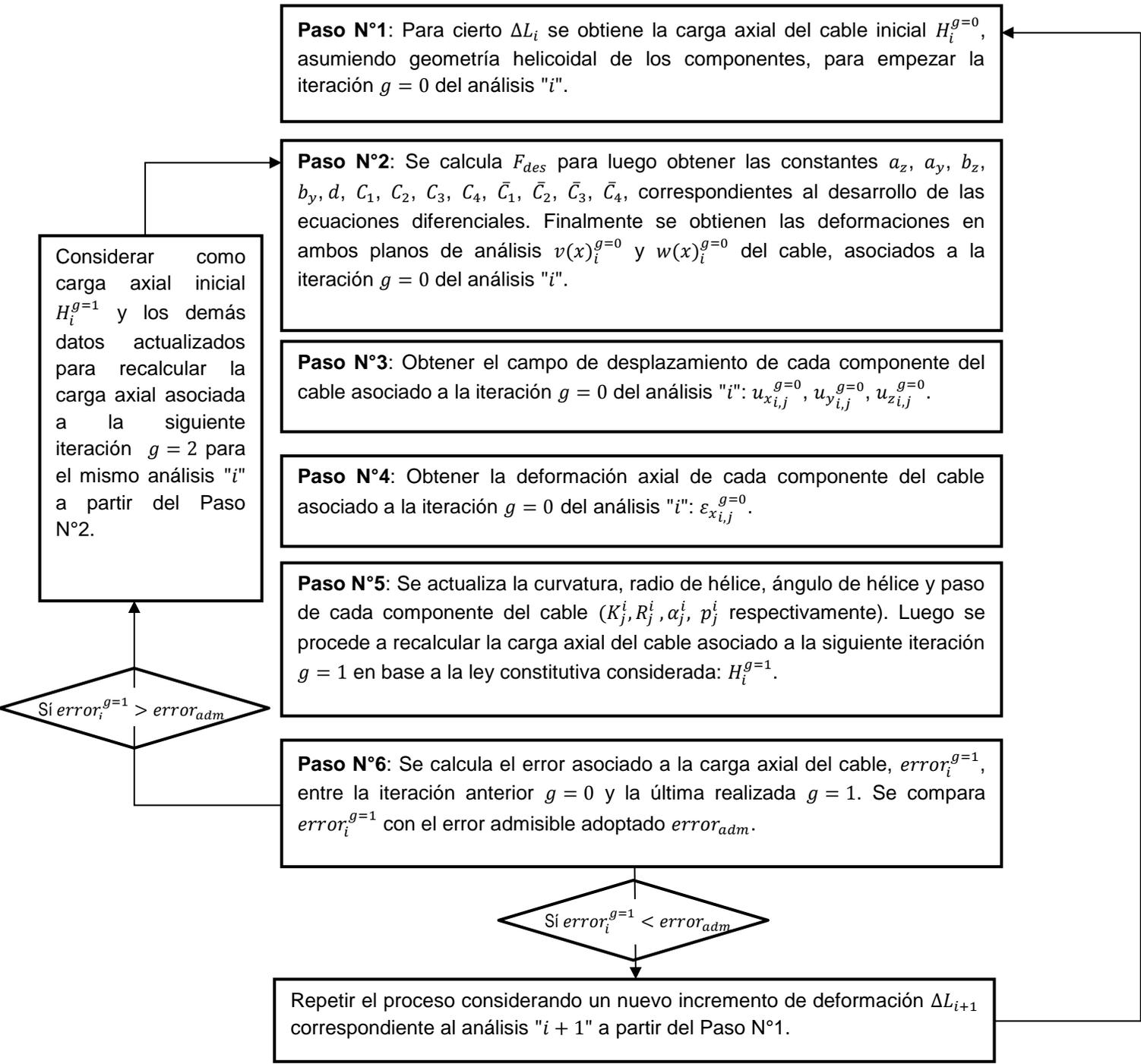


Figura 3.2.3-1: Algoritmo considerado para la modelación

CAPÍTULO 4 : APLICACIÓN DEL MODELO MECÁNICO EXTENDIDO A CABLES DE GEOMETRÍA HELICOIDAL MULTICAPA Y MULTINIVEL CON SUBCABLES EN PARALELO

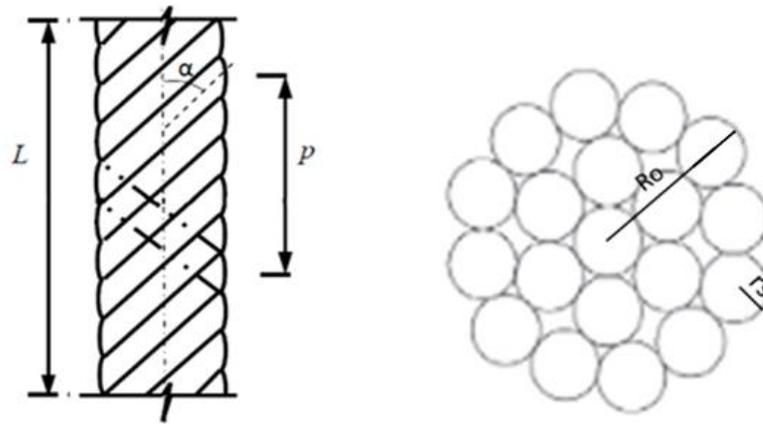
La aplicación de este modelo extendido de viga no lineal se aplica, como se mencionó capítulos anteriores, a cables de mayor diámetro: multicapa y multinivel con subcables en paralelo. A continuación se presentan los casos a analizar para cada configuración.

4.1 Cables con configuración multicapa

Uno de los objetivos principales de este trabajo es poder analizar la influencia de la asimetría del daño de un cable en la capacidad residual y capacidad de deformación de éste. Con este propósito, se realizarán análisis utilizando el modelo extendido propuesto anteriormente a diferentes secciones de cables, cada una con distinto porcentaje de daño (área dañada de la sección transversal del cable) y distribución de daño (relacionado directamente con la asimetría), de manera de poder hacer comparaciones correspondientes posteriormente.

Para este análisis multicapa fueron seleccionados dos tipos de cables presentes en el mercado. Cada uno con distintas configuraciones cuyos resultados se compararán más adelante.

A continuación se presentan las configuraciones que fueron consideradas en el modelo extendido junto con la notación de los parámetros incluidos en cada caso tales como radio del cable (R_0), radio de cada componente del cable (r_s), ángulo de hélice de cada capa del cable (α_i) y paso de cada capa del cable (p_i). La nomenclatura de cada cable está señalada como $1xN(x+y+z+...)$, en donde $1xN$ está referido a un cable de un nivel con "N" componentes en total. Estos "N" componentes están distribuidos en distintas capas empezando desde el interior con "x" componentes, luego la segunda capa con "y" componentes, la tercera capa con "z" componentes y así sucesivamente. Si consideramos un ejemplo en particular, $1x12(3+9)$, se entiende como un cable de un solo nivel con 12 componentes en total distribuidos en dos capas, la primera con 3 componentes seguida de una segunda capa con 9 componentes.



(a) (Beltrán, 2006)

(b)

Figura 4.1-1: Parámetros geométricos considerados en cables multicapa

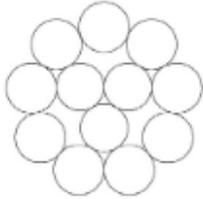
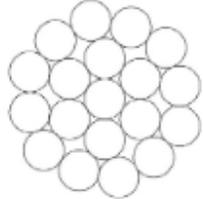
CABLE GALGO					
Construcción	Símbolo	Descripción	Valor	Unidad	Sección
1x12 (3+9)	R_0	Radio del cable	1	mm	 <p>1x12</p>
	r_s	Radio de cada componente	0.25	mm	
	α_1	Ángulo de hélice 1 ^{ra} capa	2.7	°	
	α_2	Ángulo de hélice 2 ^{da} capa	4.94	°	
	p_1	Paso de hélice 1 ^{ra} capa	80	mm	
	p_2	Paso de hélice 2 ^{da} capa	80	mm	
1x19 (1+6+12)	R_0	Radio del cable	1.75	mm	 <p>1x19</p>
	r_s	Radio de cada componente	0.35	mm	
	α_1	Ángulo de hélice 1 ^{ra} capa	3.77	°	
	α_2	Ángulo de hélice 2 ^{da} capa	6.27	°	
	p_1	Paso de hélice 1 ^{ra} capa	100	mm	
	p_2	Paso de hélice 2 ^{da} capa	100	mm	

Tabla 4.1-1: Configuraciones para cable GALGO de fabricante PRODINSA

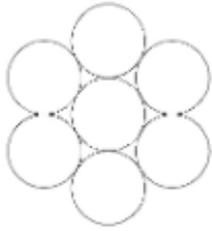
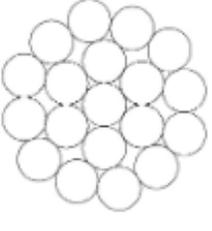
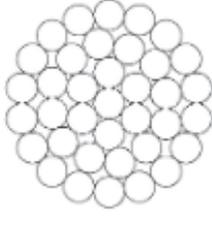
CABLE RETENIDAS					
Construcción	Símbolo	Descripción	Valor	Unidad	Sección
1x7 (1+6)	R_0	Radio del cable	6.35	mm	 1x7
	r_s	Radio de cada componente	2.12	mm	
	α_1	Ángulo de hélice 1 ^{ra} capa	12.5	°	
	p_1	Paso de hélice 1 ^{ra} capa	180	mm	
1x19 (1+6+12)	R_0	Radio del cable	11.113	mm	 1x19
	r_s	Radio de cada componente	2.223	mm	
	α_1	Ángulo de hélice 1 ^{ra} capa	9.5	°	
	α_2	Ángulo de hélice 2 ^{da} capa	15.6	°	
	p_1	Paso de hélice 1 ^{ra} capa	250	mm	
	p_2	Paso de hélice 2 ^{da} capa	250	mm	
1x37 (1+6+12+18)	R_0	Radio del cable	15.875	mm	 1x37
	r_s	Radio de cada componente	2.27	mm	
	α_1	Ángulo de hélice 1 ^{ra} capa	9.5	°	
	α_2	Ángulo de hélice 2 ^{da} capa	15.6	°	
	α_3	Ángulo de hélice 3 ^{ra} capa	21.77	°	
	p_1	Paso de hélice 1 ^{ra} capa	250	mm	
	p_2	Paso de hélice 2 ^{da} capa	250	mm	
	p_3	Paso de hélice 3 ^{ra} capa	250	mm	

Tabla 4.1-2: Configuraciones para cable RETENIDAS de fabricante PRODINSA

Para el análisis de las configuraciones anteriores con el modelo extendido se consideró una ley constitutiva no lineal de un acero ensayado en la referencia [15]. Esta se muestra a continuación:

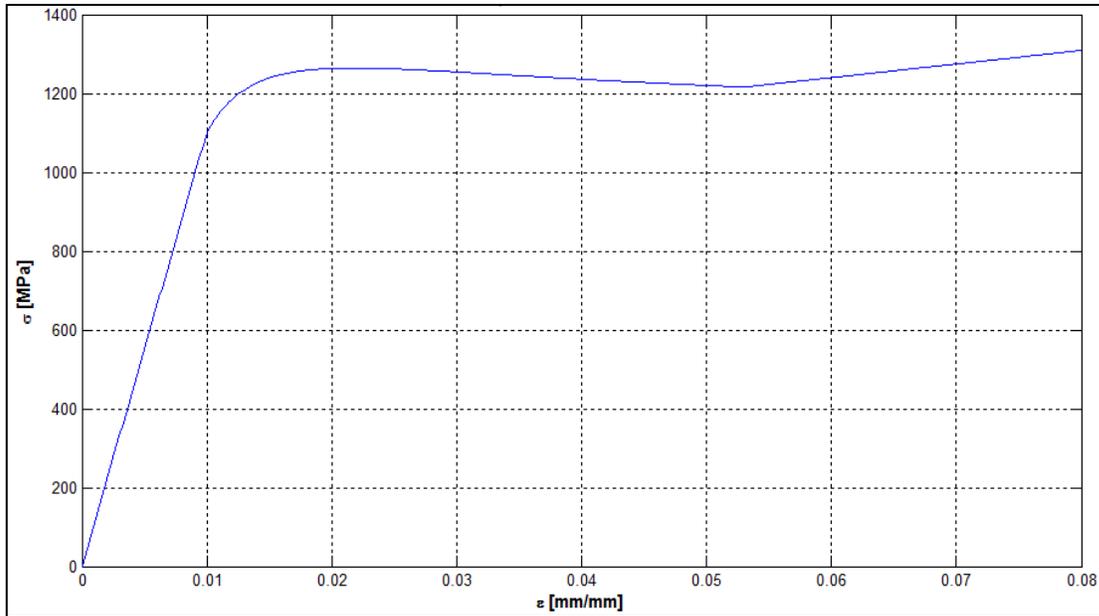


Figura 4.1-2: Ley constitutiva del material para análisis multicapa

Cabe notar de la figura anterior que el material considera una deformación de fractura del 8%. Por este motivo, para efectos de modelación, al alcanzar uno de los componentes del cable este valor se dejara de iterar al suponer que el componente en cuestión se habrá fracturado.

Como se mencionó que en esta etapa nos interesa analizar qué tan influyente es el daño asimétrico en la capacidad residual y capacidad de deformación del cable. Es por esta razón que se necesita un parámetro que permita vincular los resultados obtenidos con el modelo de viga no lineal extendido con el grado de asimetría que se tiene en el cable. Vargas [13], propuso el *Índice de Asimetría* (IA) como un indicador que refleja el grado de daño asimétrico que se tiene en el cable, el cual servirá para comparar entre resultados de una misma configuración con diferente daño. El cálculo del índice de asimetría se obtiene de la siguiente manera:

$$IA = 1 - \frac{R_0 - d}{R_0 + d} \quad \text{Ec. 4.1 - 1}$$

En donde:

- IA: Índice de asimetría del cable dañado
- R_0 : Radio del cable
- d: Distancia entre el CG de la sección no dañada y el CG de la sección dañada

Los daños asimétricos para cada configuración con su respectivo índice de asimetría se muestran en las tablas adjuntas a continuación considerando la nomenclatura siguiente:

- Componente no dañado
- Componente dañado

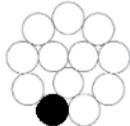
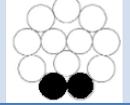
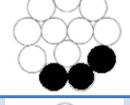
CABLE GALGO		
Construcción	IA	Sección dañada
1x12 (3+9)	0.130	
	0.253	
	0.356	
	0.278	

Tabla 4.1-3: Secciones dañadas e IA para configuración GALGO 1x12

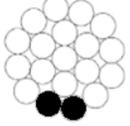
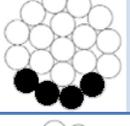
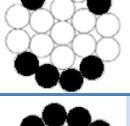
CABLE GALGO		
Construcción	IA	Sección dañada
1x19 (1+6+12)	0.167	
	0.303	
	0.213	
	0.00	

Tabla 4.1-4: Secciones dañadas e IA para configuración GALGO 1x19

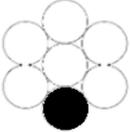
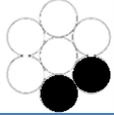
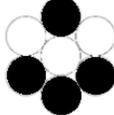
CABLE RETENIDAS		
Construcción	IA	Sección dañada
1x7 (1+6)	0.20	
	0.375	
	0.50	
	0.363	

Tabla 4.1-5: Secciones dañadas e IA para configuración RETENIDAS 1x7

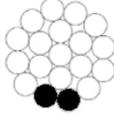
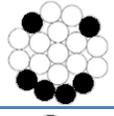
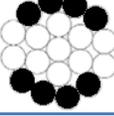
CABLE RETENIDAS		
Construcción	IA	Sección dañada
1x19 (1+6+12)	0.167	
	0.303	
	0.213	
	0.00	

Tabla 4.1-6: Secciones dañadas e IA para configuración RETENIDAS 1x19

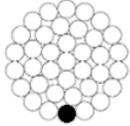
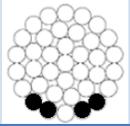
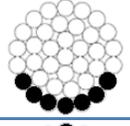
CABLE RETENIDAS		
Construcción	IA	Sección dañada
1x37 (1+6+12+18)	0.047	
	0.163	
	0.268	
	0.056	

Tabla 4.1-7: Secciones dañadas e IA para configuración RETENIDAS 1x37

4.2 Cables con configuración multinivel

Además de un estudio teórico aplicando el modelo extendido (Capítulo 4.1), resulta fundamental poder realizar comparaciones con muestras que han sido ensayadas en laboratorios con el fin de verificar si el modelo extendido propuesto simula el comportamiento real de un cable dañado en forma asimétrica.

Por esta razón se utilizará el modelo propuesto aplicado a cables de poliéster con configuración multinivel con subcables dispuestos de forma paralela con daño asimétrico mencionados en la referencia [6]. Se pondrá énfasis principalmente en dos de los tres ensayos que esta referencia realizó: El primer ensayo para cables con una resistencia específica de 35 ton, y el segundo ensayo correspondiente a cables con resistencia específica de 700 ton. A continuación se presentan las configuraciones que fueron consideradas para cada tipo de ensayo junto con la notación de los parámetros incluidos en cada caso tales como radio del cable (R_o), radio de cada componente del cable (r_s), ángulo de hélice de cada capa de cada subcable que contenga el cable (α_i) y paso de cada capa de cada subcable que contenga el cable (p_i). La nomenclatura de cada cable está señalada como $N(x+y+z+\dots)$, en donde N está referido a un cable con “ N ” subcables distribuidos en forma paralela. Estos “ N ” subcables se distribuyen por capas en la sección del cable empezando por la capa más externa hacia el interior, es decir, el cable contiene “ x ” subcables en la primera capa, luego la segunda capa con “ y ” subcables, la tercera capa con “ z ” subcables y así sucesivamente. Si

consideramos un ejemplo en particular, 20(10+7+3), se entiende como un cable con 20 subcables en paralelo distribuidos en tres capas, la primera (la más externa) con 10 subcables, seguida de una segunda capa con 9 subcables y finalmente una tercera capa con 3 subcables.

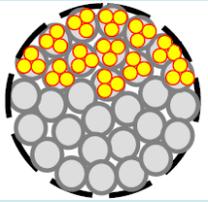
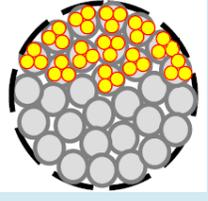
Cable	Ensayo	N°Subcables	Símbolo	Descripción	Valor	Unidad	Sección
MARLOW	35 ton	24 (12+9+3)	R_0	Radio del cable	16	mm	
			r_s	Radio de cada componente	1.27	mm	
			α	Ángulo de hélice de cada componente	10.04	°	
			p	Paso de hélice de cada componente	52	mm	
	700 ton	24 (12+9+3)	R_0	Radio del cable	80	mm	
			r_s	Radio de cada componente	6.55	mm	
			α	Ángulo de hélice de cada componente	10.68	°	
			p	Paso de hélice de cada componente	252	mm	
BEXCO	35 ton	18 (11+6+1)	R_0	Radio del cable	16	mm	
			r_s	Radio de cada componente	1.6	mm	
			α	Ángulo de hélice de cada componente	2.32	°	
			p	Paso de hélice de cada componente	286	mm	
	700 ton	20 (10+7+3)	R_0	Radio del cable	73.5	mm	
			r_s	Radio de cada componente	6.125	mm	
			α	Ángulo de hélice de cada componente	8.83	°	
			p	Paso de hélice de cada componente	286	mm	

Tabla 4.2-1: Parámetros geométricos para cables tipo MARLOW y BEXCO (Ward et al, 2006)

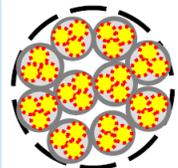
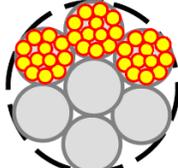
Cable	Ensayo	N°Subcables	Símbolo	Descripción	Valor	Unidad	Sección
WHITEHILL	35 ton	10 (8+2)	R ₀	Radio del cable	18	mm	
			r _s	Radio de cada componente	2.25	mm	
			α	Ángulo de hélice de cada componente	11.13	°	
			p	Paso de hélice de cada componente	83	mm	
	700 ton	10 (8+2)	R ₀	Radio del cable	83	mm	
			r _s	Radio de cada componente	10	mm	
			α	Ángulo de hélice de cada componente	13.6	°	
			p	Paso de hélice de cada componente	300	mm	
CSL	700 ton	7 (6+1)	R ₀	Radio del cable	72	mm	
			r _s	Radio de cada componente	6.0	mm	
			α1	Ángulo de hélice 1ra capa	2.82	°	
			α2	Ángulo de hélice 2da capa	7.66	°	
			p1	Paso de hélice 1ra capa de cada componente	884	mm	
			p2	Paso de hélice 2da capa de cada componente	884	mm	

Tabla 4.2-2: Parámetros geométricos para cables tipo WHITEHILL y CSL (Ward et al, 2006)

La ley constitutiva para cada cable se obtuvo de la curva de capacidad no dañada de acuerdo a ensayos realizados en la referencia [6]. Cabe mencionar que la curva de capacidad está representada en unidades de fuerza. Por la cual está curva de capacidad se dividió por el área total de la sección del cable obteniendo así una curva en unidades de tensión promedio (ton/mm²) versus deformación (mm/mm), en efecto, una ley constitutiva del cable. Sin embargo, el modelo extendido requiere la ley constitutiva del material y no del cable, lo que significa obtener la ley constitutiva de un componente del cable. Para la obtención de la ley constitutiva del componente a partir de la ley constitutiva del cable se utilizó la expresión determinada por McKenna (et al., 2004) [14]:

$$\text{Modulo del cable} = \text{modulo del componente} * \prod \cos^{4.75}(\theta_n) \quad \text{Ec. 4.2 - 1}$$

En donde el modulo del cable está determinado por la curva tensión-deformación del cable (ley constitutiva) y θ_n representa el ángulo de hélice de cada nivel “n” que pueda contener el cable.

Una vez obtenida la ley constitutiva del componente del cable, se efectuó una regresión polinómica de quinto orden con el fin de tener una expresión algebraica de dicha ley y utilizarla como una función dentro del modelo extendido para cualquier deformación (mm/mm) que se desee. Se utilizó una regresión de quinto orden debido a la no linealidad de las curvas obtenidas y, además, para ser consecuentes con estudios anteriores en donde consideran regresiones de quinto orden [10], [13], [16], [17]. Las curvas tensión-deformación del componente para cada cable y su respectiva regresión polinómica se detalla en el *ANEXO B: Curvas tensión-deformación de componentes para caso multinivel*. Las leyes constitutivas a utilizar en el modelo extendido para cada cable se presentan en el gráfico siguiente. Se debe aclarar que para el cable Marlow no se tiene una curva de capacidad no dañada para el ensayo de 700 ton, por lo que se utilizó la misma ley constitutiva obtenida del cable Marlow de 35 ton para los análisis.

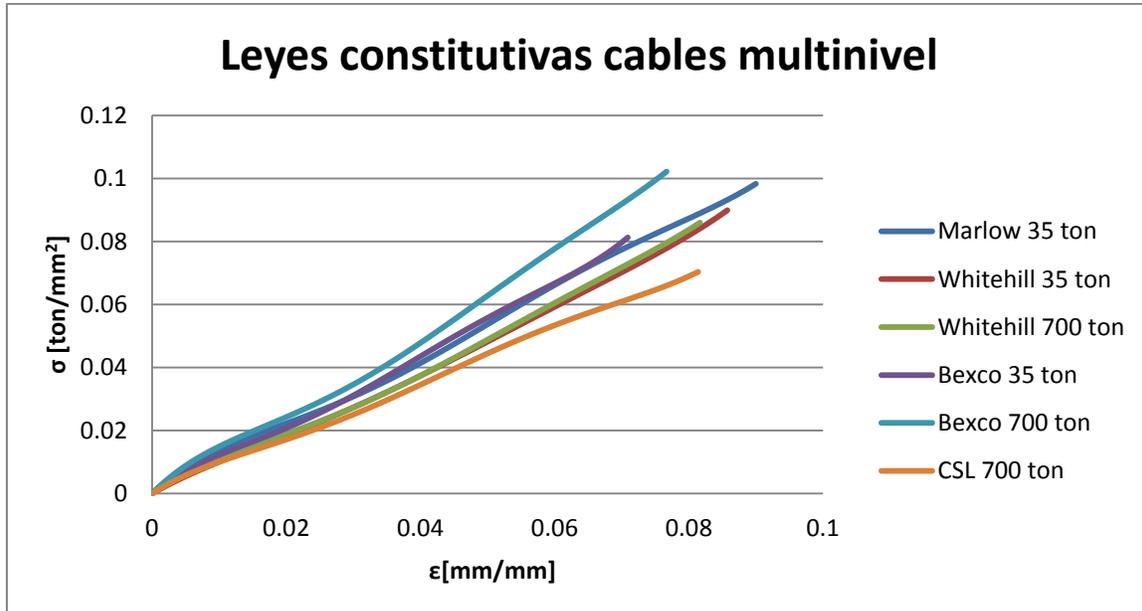


Figura 4.2-1: Ley constitutiva para cables multinivel con subcables en paralelo según referencia [6]

Observamos del gráfico anterior que las curvas de leyes constitutivas entre tipo de cable varía una de otra, entendiéndose por esto que el material utilizado por

cada fabricante en la elaboración del cable difiere uno del otro. Las curvas asociadas al cable tipo Whitehill muestran que efectivamente se trata del mismo material utilizado tanto en la configuración del cable de 35 ton como en el cable de 700 ton. Sin embargo se aprecia cierta diferencia, en particular en capacidad, en el cable tipo Bexco, en donde se tiene un comportamiento más rígido para el cable de 700 ton en comparación al de 35 ton. Cabe mencionar que la cantidad de ensayos no dañados realizados en la referencia [6] para cada cable es escasa llegando en algunos casos a ser sólo uno. Por lo que el nivel de confiabilidad en los resultados anteriores es bajo y se necesitarían un mayor número de ensayos no dañados de cada cable para dar confiabilidad a los datos.

La deformación última alcanzada ($\epsilon_{\text{fractura}}$) de cada cable no dañado ensayado en la referencia [6] se muestra en la tabla adjunta a continuación:

Cable	Ensayo	$\epsilon_{\text{fractura}}$ [%]
Marlow	35	8.96
	700	8.65
Whitehill	35	8.57
	700	8.17
Bexco	35	7.09
	700	7.67
CSL	700	8.14

Tabla 4.2-3: Deformaciones últimas de cables no dañados ensayados

En las tablas mostradas a continuación se presentan las configuraciones multinivel con subcables en paralelo dañadas y ensayas en la referencia [6], en donde los componentes en negro representan los componentes fracturados. En cada tabla se detalla: el tipo de ensayo realizado para cada cable (35 ton o 700 ton), la nominación de los ensayos realizados a cada configuración dañada según

la referencia [6], el daño aproximado en la sección transversal del cable como porcentaje de ésta y el índice de asimetría calculado según lo mencionado en 4.1.

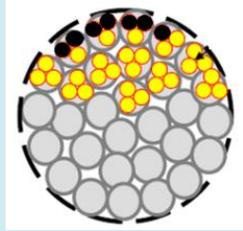
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
MARLOW	T5, T9 y T17	10	0.159	

Tabla 4.2-4: Configuración dañada para cable MARLOW ensayo 35 ton (Ward et al, 2006)

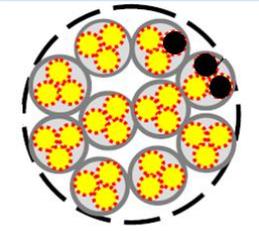
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
WHITEHILL	T11, T13 y T19	10	0.172	

Tabla 4.2-5: Configuración dañada para cable WHITEHILL ensayo 35 ton (Ward et al, 2006)

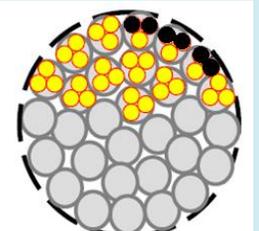
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
BEXCO	T4 y T21	10	0.186	

Tabla 4.2-6: Configuración dañada para cable BEXCO ensayo 35 ton (Ward et al, 2006)

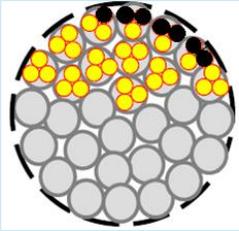
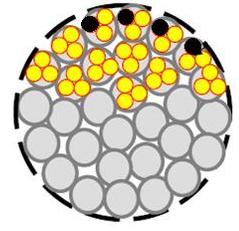
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
MARLOW	T1	10	0.159	
	T2	5	0.095	

Tabla 4.2-7: Configuraciones dañada para cable MARLOW ensayo 700 ton (Ward et al, 2006)

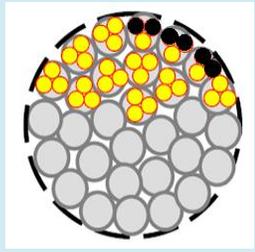
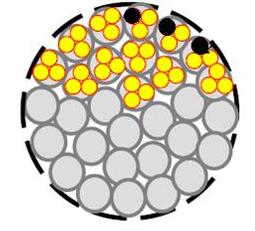
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
BEXCO	T6	10	0.173	
	T8	5	0.09	

Tabla 4.2-8: Configuraciones dañada para cable BEXCO ensayo 700 ton (Ward et al, 2006)

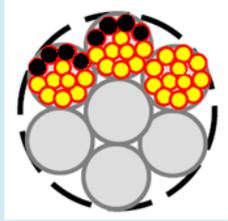
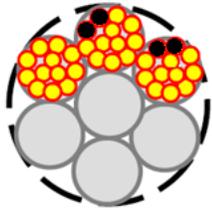
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
CSL	T20 y T31	10	0.149	
	T21, T24 y T32	5	0.078	

Tabla 4.2-9: Configuraciones dañada para cable CSL ensayo 700 ton (Ward et al, 2006)

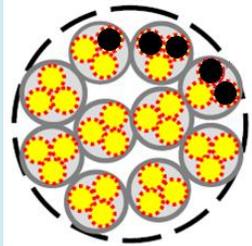
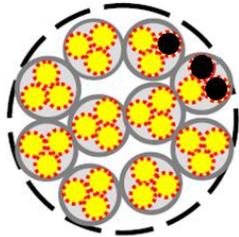
Cable	Ensayo	Daño (%.Aprox)	IA	Configuración
WHITEHILL	T5 y T7	15	0.252	
	T3	10	0.172	

Tabla 4.2-10: Configuraciones dañada para cable WHITEHILL ensayo 700 ton (Ward et al, 2006)

CAPÍTULO 5 : ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se desarrollarán los análisis correspondientes a los resultados obtenidos de las aplicaciones referidas al capítulo anterior. Luego se harán las comparaciones respectivas entre los resultados obtenidos y/u otras referencias propuestas en la literatura.

5.1 Análisis correspondiente a la influencia del daño asimétrico en cables con configuración multicapa

En las tablas mostradas a continuación se presenta para cada configuración multicapa, detallada en el Capítulo 4, lo siguiente: Capacidad residual, capacidad de deformación ($\epsilon_{fractura}$), pérdida de capacidad y deformación respecto a resultados obtenidos de la configuración no dañada, índice de asimetría (IA) y daño total en la sección transversal. Cada uno de estos parámetros se expone como resultado considerando el modelo extendido y área neta, en donde ésta última asume igual deformación para todos los componentes no dañados. Las curvas correspondientes a los resultados mencionados y mostrados en las tablas que se presentan a continuación se señalan a su vez en el *ANEXO A*.

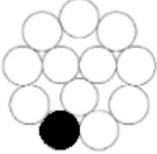
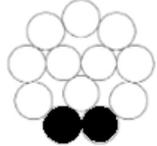
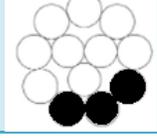
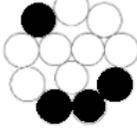
Cable	Modelo extendido				Área neta			Sección	IA	Daño [%]
	$E_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]	Pérdida Def. [%]	$E_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]			
G12_ND	0.08	3.012	0.00	0.00	0.08	3.012	0.00		0.00	0.00
G12_a	0.0792	2.756	-8.52	-1.00	0.08	2.762	-8.33		0.130	8.33
G12_b	0.0792	2.506	-16.82	-1.00	0.08	2.511	-16.64		0.253	16.67
G12_c	0.0792	2.256	-25.11	-1.00	0.08	2.261	-24.95		0.356	24.99
G12_d	0.0792	2.005	-33.43	-1.00	0.08	2.010	-33.29		0.278	33.32

Tabla 5.1-1: Resultados de capacidad y deformación según modelo extendido y área neta para cable GALGO 1x12

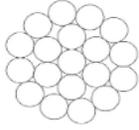
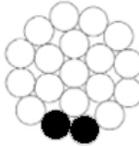
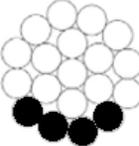
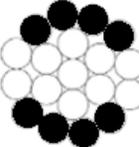
Cable	Modelo extendido				Área neta			Sección	IA	Daño [%]
	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]	Pérdida Def. [%]	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]			
G19_ND	0.08	9.316	0.00	0.00	0.08	9.316	0.00		0.00	0.00
G19_a	0.0792	8.321	-10.68	-1.00	0.08	8.338	-10.49		0.167	10.53
G19_b	0.0792	7.348	-21.12	-1.00	0.08	7.364	-20.95		0.303	21.05
G19_c	0.0792	6.370	-31.62	-1.00	0.08	6.383	-31.48		0.213	31.58
G19_d	0.08	5.405	-41.98	0.00	0.08	5.405	-41.98		0.00	42.11

Tabla 5.1-2: Resultados de capacidad y deformación según modelo extendido y área neta para cable GALGO 1x19

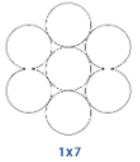
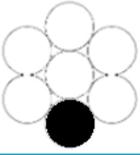
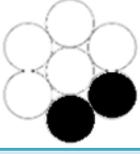
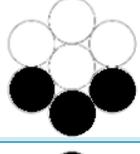
Cable	Modelo extendido				Área neta			Sección	IA	Daño [%]
	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]	Pérdida Def. [%]	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]			
R7_ND	0.08	123.818	0.00	0.00	0.08	123.818	0.00		0.00	0.00
R7_a	0.0784	105.821	-14.53	-2.00	0.08	106.277	-14.17		0.20	14.28
R7_b	0.0776	88.356	-28.64	-3.00	0.08	88.928	-28.18		0.375	28.57
R7_c	0.0752	70.663	-42.93	-6.00	0.08	71.577	-42.19		0.5	42.86
R7_d	0.076	53.027	-57.17	-5.00	0.08	53.594	-56.72		0.363	57.14

Tabla 5.1-3: Resultados de capacidad y deformación según modelo extendido y área neta para cable RETENIDAS 1x7

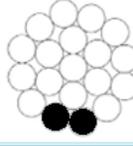
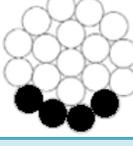
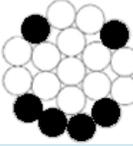
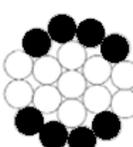
Cable	Modelo extendido				Área neta			Sección	IA	Daño [%]
	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]	Pérdida Def. [%]	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]			
R19_ND	0.08	361.998	0.00	0.00	0.08	361.998	0.00		0.00	0.00
R19_a	0.0768	322.001	-11.05	-4.00	0.08	324.755	-10.29		0.167	10.53
R19_b	0.0752	284.266	-21.47	-6.00	0.08	288.000	-20.44		0.303	21.05
R19_c	0.0768	247.923	-31.51	-4.00	0.08	250.005	-30.94		0.213	31.58
R19_d	0.08	212.358	-41.34	0.00	0.08	212.358	-41.34		0.00	42.11

Tabla 5.1-4: Resultados de capacidad y deformación según modelo extendido y área neta para cable RETENIDAS 1x19

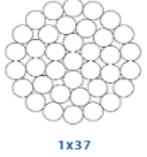
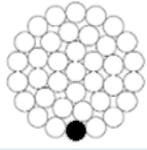
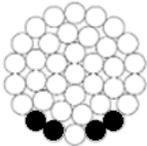
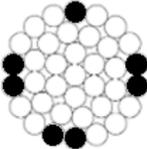
Cable	Modelo extendido				Área neta			Sección	IA	Daño [%]
	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]	Pérdida Def. [%]	$\epsilon_{fractura}$ [mm/mm]	Capacidad [kN]	Pérdida capacidad [%]			
R37_ND	0.08	700.712	0.00	0.00	0.08	700.712	0.00		0.00	0.00
R37_a	0.0784	679.705	-3.00	-2.00	0.08	682.757	-2.56		0.047	2.7
R37_b	0.0752	620.885	-11.39	-6.00	0.08	629.279	-10.19		0.163	10.81
R37_c	0.0704	561.491	-19.87	-12.00	0.08	576.815	-17.68		0.268	18.91
R37_d	0.0784	572.229	-18.34	-2.00	0.08	574.782	-17.97		0.056	18.91

Tabla 5.1-5: Resultados de capacidad y deformación según modelo extendido y área neta para cable RETENIDAS 1x37

Dada la deformación de fractura del cable ($\epsilon_{fractura}$), las tablas presentadas a continuación muestran la deformación máxima (ϵ_{max}) y mínima (ϵ_{min}) asociada a cada sección dañada analizada. Cabe recordar que la deformación de los componentes no fracturados varía linealmente en la sección transversal al considerar la hipótesis de Bernoulli en el modelo extendido. La deformación máxima de componentes no dañados se obtendrá en aquellos que se localicen más cercanos a los componentes fracturados (Componentes en negro Figura 5.1-1). Esto sucede debido a que, al tener componentes fracturados, el eje neutro de la sección se traslada respecto al eje neutro de la sección no dañada quedando los componentes no dañados más cercanos a los fracturados a una mayor distancia del eje neutro respecto a los componentes no dañados más alejados de los componentes fracturados. Esto se traduce, al haber esfuerzos de flexión en el cable, que los componentes no dañados cercanos a los componentes fracturados tendrán una mayor deformación axial respecto a los componentes no dañados más lejanos a los componentes fracturados (Ver Figura 5.1-1). A su vez se muestra para cada configuración la razón de capacidad entre área neta y resultados entregados por el modelo extendido (RC) y la razón de deformación (RD) como parámetros para poder analizar la influencia de la asimetría. Estos se denotan como:

$$RC = \frac{Cap. \text{Área neta} - Cap. \text{Modelo extendido}}{Cap. \text{Área neta}} \quad Ec. 5.1 - 1$$

$$RD = \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}{\epsilon_{fractura}} \quad Ec. 5.1 - 2$$

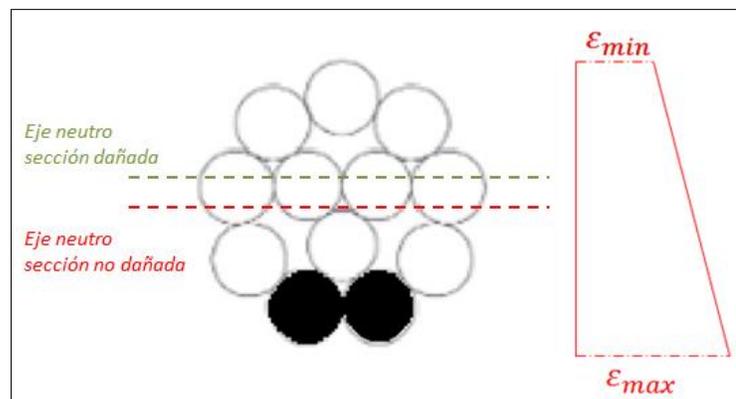


Figura 5.1-1: Diagrama deformaciones en sección de un cable multicapa dañado

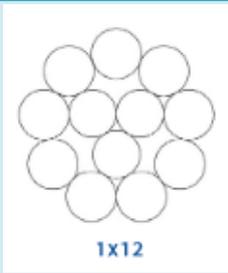
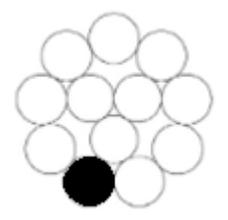
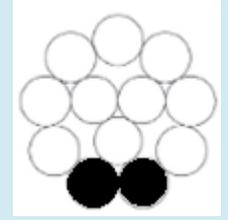
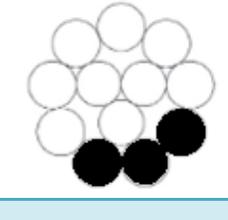
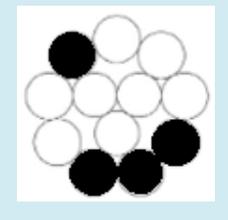
Cable	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{\min} [mm/mm]	RD [%]	RC [%]	Sección	IA
G12_ND	0.08	0.08	0.00	0.00	 1x12	0.00
G12_a	0.0793	0.0791	0.253	0.211		0.130
G12_b	0.0795	0.0789	0.758	0.211		0.253
G12_c	0.0796	0.0788	1.01	0.211		0.356
G12_d	0.0796	0.0787	1.14	0.211		0.278

Tabla 5.1-6: RC y RD para cable GALGO 1x12

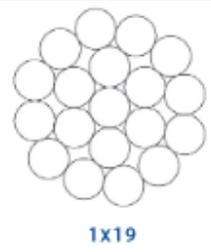
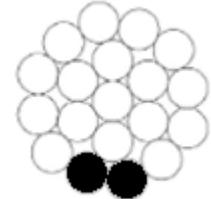
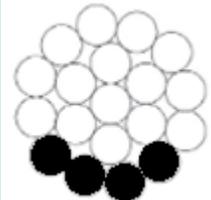
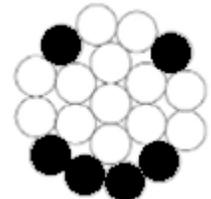
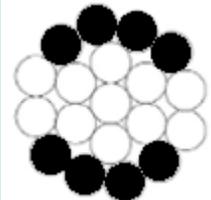
Cable	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{\min} [mm/mm]	RD [%]	RC [%]	Sección	IA
G19_ND	0.08	0.08	0.00	0.00	 1x19	0.00
G19_a	0.0794	0.079	0.505	0.212		0.167
G19_b	0.0799	0.0784	1.894	0.212		0.303
G19_c	0.0794	0.0789	0.631	0.212		0.213
G19_d	0.08	0.08	0.00	0.00		0.00

Tabla 5.1-7: RC y RD para cable GALGO 1x19

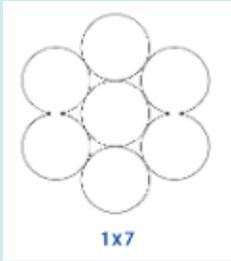
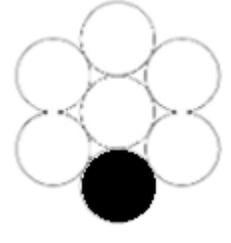
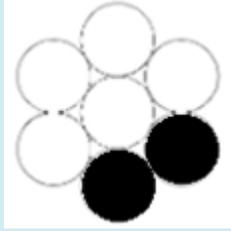
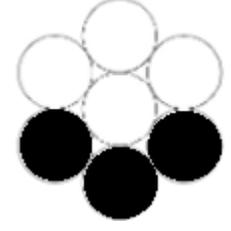
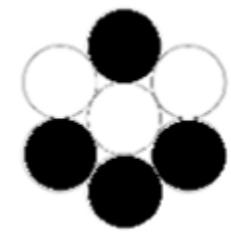
Cable	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{\min} [mm/mm]	RD [%]	RC [%]	Sección	IA
R7_ND	0.08	0.08	0.00	0.00		0.00
R7_a	0.0797	0.0768	3.699	0.429		0.20
R7_b	0.0797	0.0745	6.701	0.643		0.375
R7_c	0.0798	0.0706	12.23	1.277		0.5
R7_d	0.0793	0.0744	6.447	1.058		0.363

Tabla 5.1-8: RC y RD para cable RETENIDAS 1x7

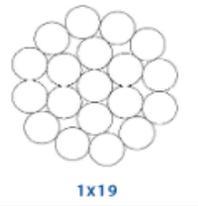
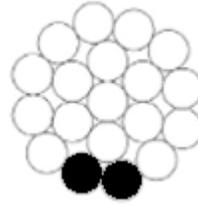
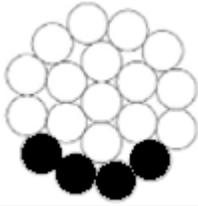
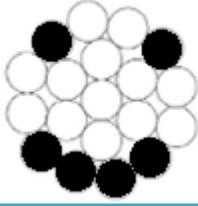
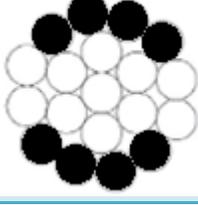
Cable	ϵ_{max} [mm/mm]	ϵ_{min} [mm/mm]	RD [%]	RC [%]	Sección	IA
R19_ND	0.08	0.08	0.00	0.00		0.00
R19_a	0.0794	0.0741	6.901	0.848		0.167
R19_b	0.0796	0.0702	12.5	1.297		0.303
R19_c	0.0793	0.0732	7.943	0.833		0.213
R19_d	0.08	0.08	0.00	0.00		0.00

Tabla 5.1-9: RC y RD para cable RETENIDAS 1x19

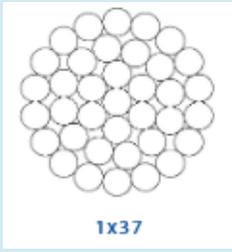
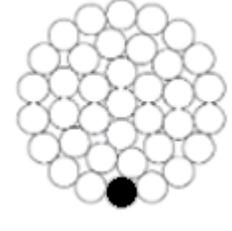
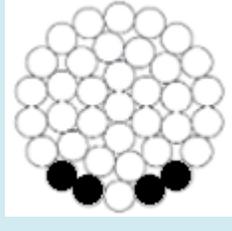
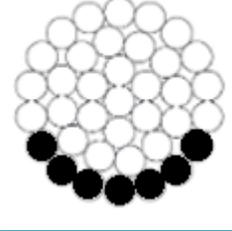
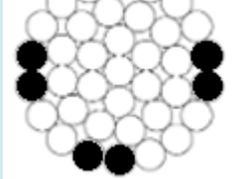
Cable	ϵ_{\max} [mm/mm]	ϵ_{\min} [mm/mm]	RD [%]	RC [%]	Sección	IA
R37_ND	0.08	0.08	0.00	0.00	 1x37	0.00
R37_a	0.0794	0.0774	2.551	0.447		0.047
R37_b	0.0797	0.0718	10.505	1.334		0.163
R37_c	0.0793	0.0616	25.142	2.657		0.268
R37_d	0.0796	0.078	2.041	0.444		0.056

Tabla 5.1-10: RC y RD para cable RETENIDAS 1x37

De los resultados obtenidos anteriormente se aprecia que para los casos no dañados de todas las configuraciones, no existe diferencia alguna entre la capacidad obtenida mediante el modelo generalizado y área neta. Esto es de esperar dado que al no existir daño en el cable no se tiene una fuerza en desequilibrio F_{des} que produzca deflexiones en el cable, obteniendo así deformaciones iguales para todos los componentes lo que sucede de la misma manera en el caso del área neta.

El mismo análisis puede observarse de configuraciones dañadas pero que contemplen un daño simétrico ($I.A=0$), como es el caso de las configuraciones G19_d y R19_d. Similar a lo que se mencionó anteriormente, en estos casos, al no tener un daño asimétrico del cable, no se tiene una fuerza en desequilibrio F_{des} que produzca deflexiones laterales en el cable, teniendo mismas deformaciones en los componentes tanto con el modelo extendido como el área neta y por ende las capacidad residual y deformación última en ambos casos es la misma.

Al tener daño asimétrico en la sección del cable, se presenta dicha fuerza en desequilibrio F_{des} produciendo una deflexión lateral en el cable y obteniendo así deformaciones distintas en los componentes de éste. Por lo que la deformación de fractura del cable es menor en relación a la deformación de fractura del área neta y por ende, considerando la ley constitutiva señalada en el Capítulo 4, la capacidad última para el cable con daño asimétrico es menor a la capacidad última considerando área neta. Podemos observar además que para los casos de daño analizados las deformaciones últimas no son menores a un 7% y considerando la ley constitutiva utilizada, en la cual para valores de deformación entre 6% y 8% el módulo de elasticidad es considerablemente menor en comparación al módulo para las primeras deformaciones, las tensiones no varían significativamente para una variación de deformación en este rango (6%-8%).

Si comparamos los resultados entre los daños de las configuraciones G19 y R19, en donde podemos observar que las configuraciones de daño son las mismas tanto en pérdida de área como distribución de daño y solo difieren por el tamaño del cable, observamos que la razón de capacidad (RC) y la razón de deformación (RD) son mayores para el cable de mayor diámetro, R19. Por lo que para una misma pérdida de área y distribución de daño de una sección de un cable, el efecto tamaño pasa a ser un parámetro a considerar en cuanto a capacidad de deformación y resistencia entre un cable de mayor diámetro que otro.

Si analizamos la influencia del índice de asimetría en los resultados de área neta y los resultados obtenidos con el modelo, observamos que para la mayoría de los casos analizados la razón de capacidad (RC) y la razón de deformación

(RD) aumenta mientras mayor es el índice de asimetría (I.A), siendo la diferencia más clara para cables de mayor tamaño (R19 y R37). En cuanto a la capacidad de deformación, vemos que para cables de menor tamaño (Galgo) la diferencia porcentual de pérdida de deformación entre área neta y el modelo es alrededor de un 1% para las configuraciones dañadas asimétricamente, por lo que el índice de asimetría para estos casos no es influyente. Para cables de mayor tamaño (Retenidas) el índice de asimetría genera mayores diferencias de pérdida de deformación entre las configuraciones de daño consideradas, aumentando la pérdida de deformación para configuraciones con mayor asimetría. Se observa que en términos de pérdida de deformación, la influencia del tamaño del cable es mayor que el índice de asimetría y/o cantidad de daño en el cable. Si comparamos por ejemplo el cable R19_b (I.A=0.303, Daño=21.05%) y R37_c (I.A=0.268, Daño=18.91%) podemos observar que, a pesar que el cable R19_b tiene un mayor daño e índice de asimetría que el cable R37_c, la pérdida de deformación del cable R19_b es la mitad en relación al cable R37_c, 6% y 12% respectivamente.

Si observamos los resultados de la capacidad residual del cable para los casos R37_c y R37_d vemos que para ambos casos la pérdida de área en la sección del cable es la misma pero difieren en la distribución del daño, lo que resulta un índice de asimetría de 0,268 para el caso R37_c y 0,056 para el caso R37_d. Si bien en términos de capacidad residual son similares debido a la ley constitutiva utilizada y lo explicado anteriormente, en un daño con mayor grado de asimetría se tiene una capacidad de deformación menor que para un daño más simétrico, por lo cual el tamaño significaría un parámetro importante en términos de diseño y serviciabilidad del cable. Lo anterior se ratifica analizando la razón de capacidad (RC) y la razón de deformación (RD) entre los casos R37_c y R37_d, en donde se puede apreciar una considerable diferencia tanto en la razón de capacidad (RC=2.657 y RC=0.444 respectivamente) como en deformación de los componentes (RD=25.142% y RD=2.041% respectivamente).

Los siguientes gráficos muestran las diferencias de RC y RD para los diferentes diámetros de cables analizados dependiendo del índice de asimetría correspondiente. Se desprende de ellos, y complementando lo mencionado anteriormente respecto a la influencia del factor escala en las razones RD y RC, que para ambos casos mientras mayor es el índice de asimetría IA la pérdida de deformación y de capacidad tiende a aumentar independiente del diámetro del cable. Vemos a su vez que para los cables de menor tamaño (G12 y G19) variaciones en el índice IA no produce incrementos considerables en RC y RD en comparación al resto de los cables de mayor diámetro (R7, R19 y R37) y al

augmentar el tamaño (diámetro) del cable el incremento tanto RC como en RD tiende a ser más pronunciado.

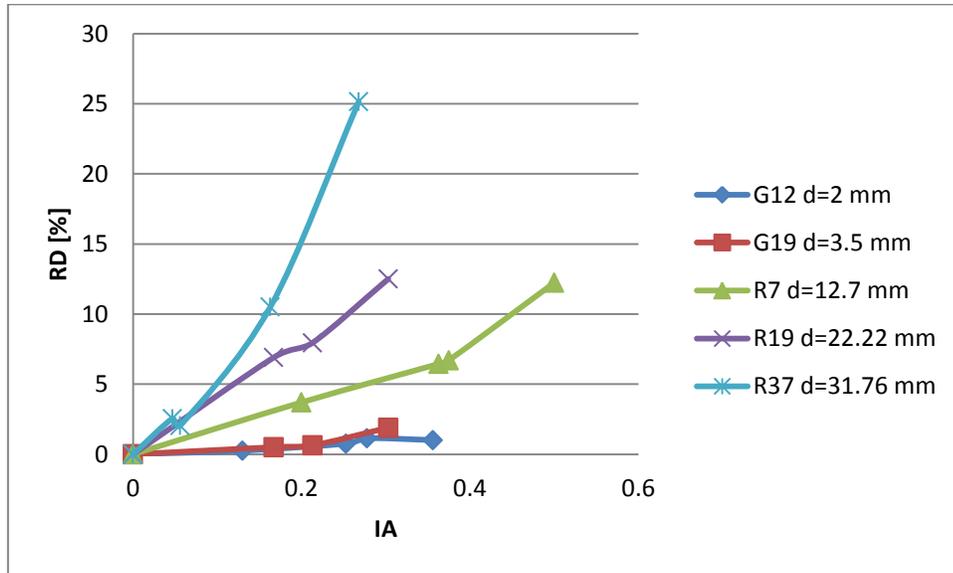


Figura 5.1-2: Influencia del efecto escala en relación IA vs RD en cables con configuración multicapa

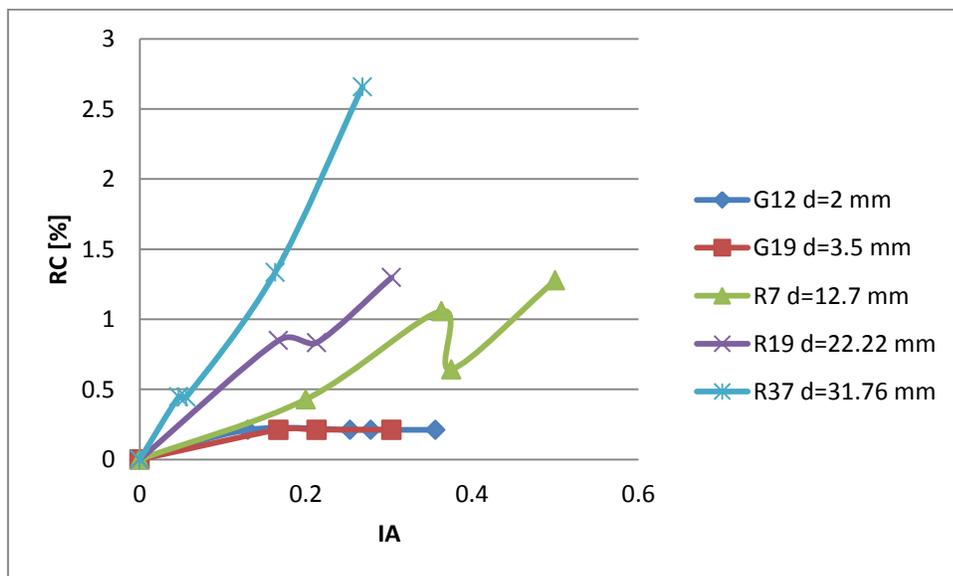


Figura 5.1-3: Influencia del efecto escala en relación IA vs RC en cables con configuración multicapa

5.1.1 Robustez del modelo multicapa

Con robustez del modelo nos referimos a la sensibilidad (cantidad de iteraciones) del modelo genérico propuesto al variar moderadamente parámetros iterativos del modelo. Analizaremos dos parámetros iterativos en particular. El primero asociado a la cantidad de incrementos de deformaciones consideradas para la construcción de la curva de capacidad (d_i), cuya última deformación corresponde a la deformación máxima que del cable ($\epsilon_{fractura}$); y el segundo parámetro correspondiente al error de convergencia (e_0) considerado para un incremento de deformación dada (d_i).

Estos análisis se realizaron sobre dos cables multicapa mencionados anteriormente: R7 y R37. Para cada cable se escogieron dos configuraciones de daño: R7_a (IA=0.2), R7_c(IA=0.5) y R37_a (IA=0.047), R37_c(IA=0.268) respectivamente.

Se seleccionaron estos cables y configuraciones para poder analizar la influencia de los parámetros entre un cable de dos capas (R7) y otro de cuatro capas (R37), además de la influencia sobre configuraciones de daño con distintos índice de asimetría (IA). A continuación se muestran las iteraciones necesarias para la convergencia de resultados para tres diferentes errores de convergencia e_0 (2%, 0.5% y 0.01%). Lo anterior se realizó, a su vez, para tres cantidades de incremento de deformación consideradas (d_i) (10,30 y 60) y para cada configuración multicapa mencionada previamente.

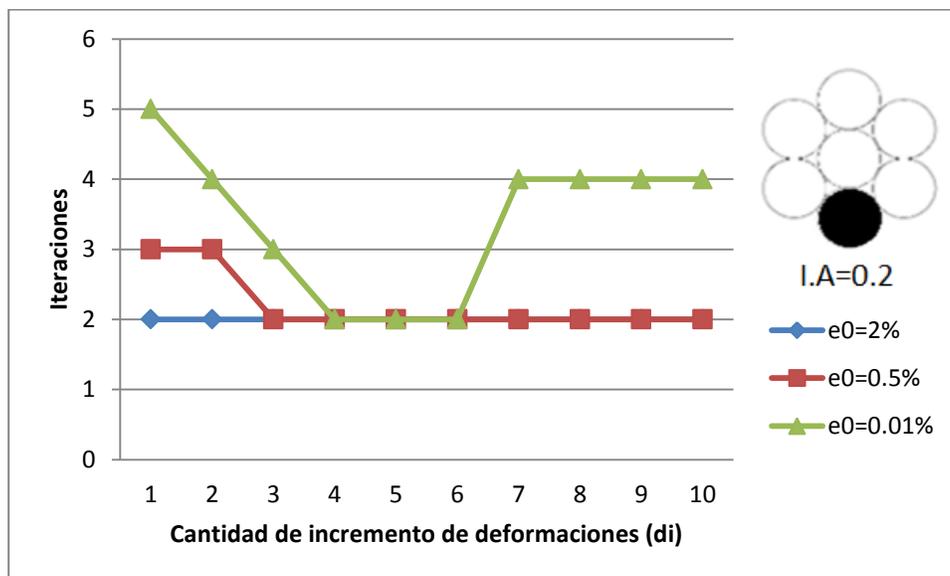


Figura 5.1.1-1: Iteraciones necesarias para $d_i=10$ deformaciones. Cable R7_a

Se puede observar que a menor error considerado se requiere mayor número de iteraciones para converger dada una deformación d_i . Esto resulta lógico y esperable ya que se pretende obtener resultados más exactos al considerar un menor error y para ello se requiere mayor cantidad de iteraciones.

En los dos gráficos que se muestran a continuación se realiza el mismo análisis pero una cantidad de deformaciones $d_i=30$ y $d_i=60$ para la misma configuración.

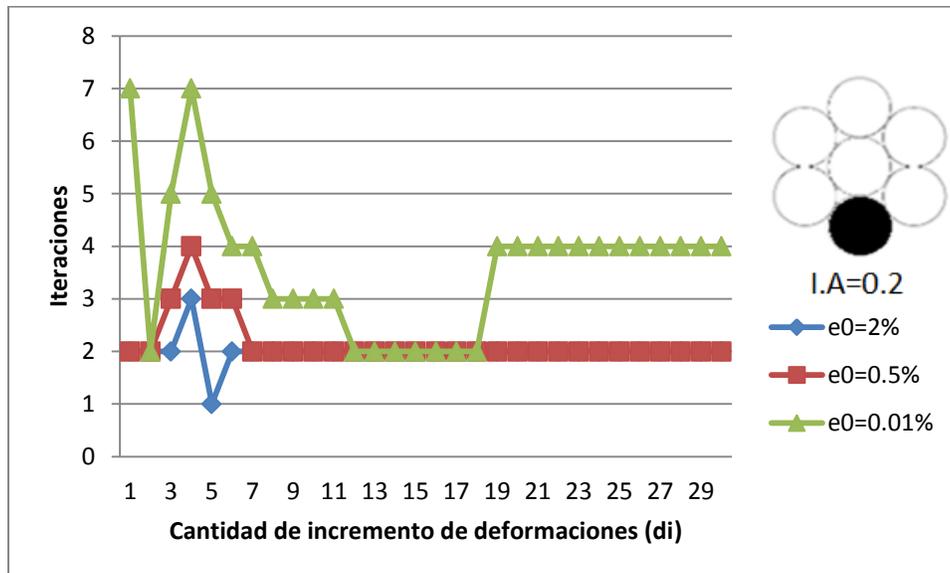


Figura 5.1.1-2: Iteraciones necesarias para $d_i=30$ deformaciones. Cable R7_a

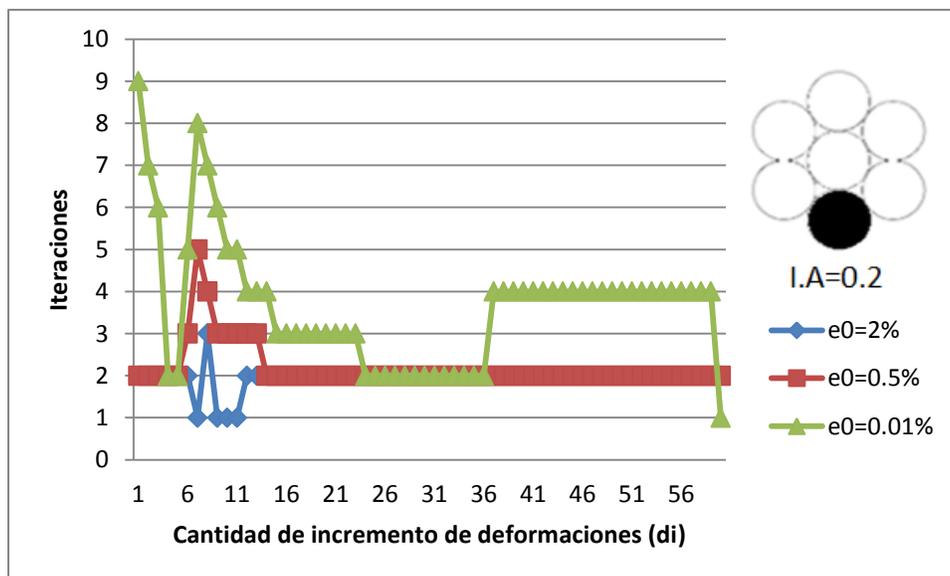


Figura 5.1.1-3: Iteraciones necesarias para $d_i=60$ deformaciones. Cable R7_a

Al igual que el primer gráfico se muestran resultados análogos y la explicación es la misma. Veremos en los gráficos siguientes que se obtiene resultados similares para los demás casos, independientes del tamaño y/o distribución de daño del cable.

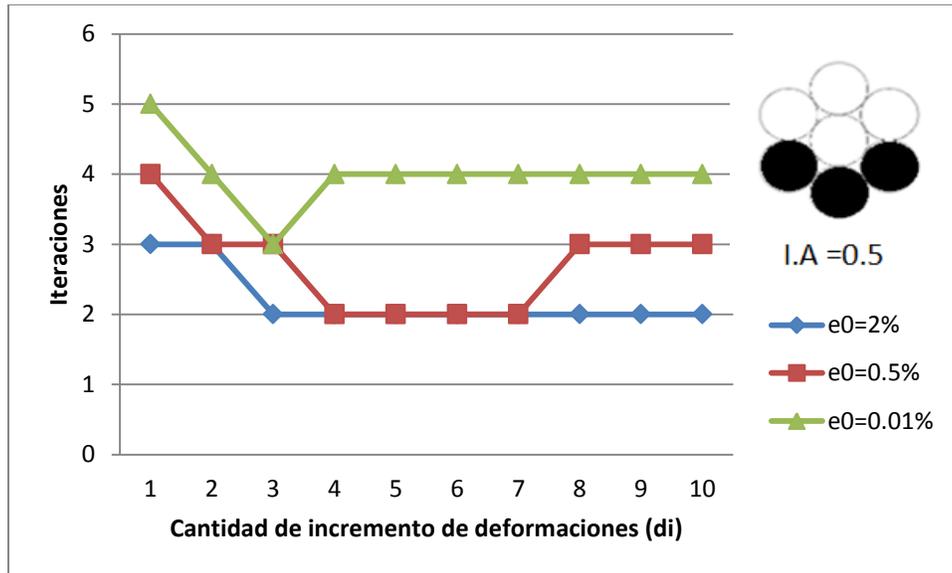


Figura 5.1.1-4: Iteraciones necesarias para di=10 deformaciones. Cable R7_c

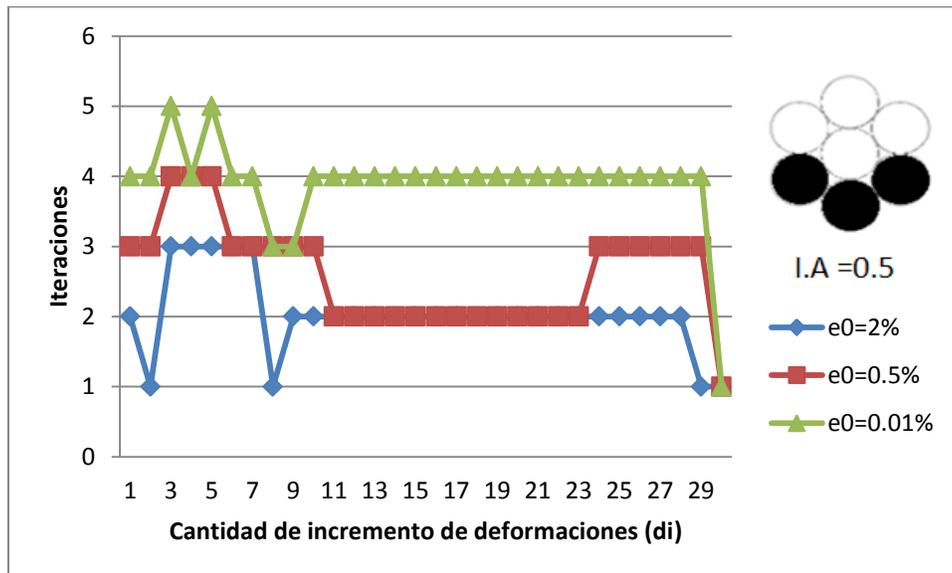


Figura 5.1.1-5: Iteraciones necesarias para di=30 deformaciones. Cable R7_c

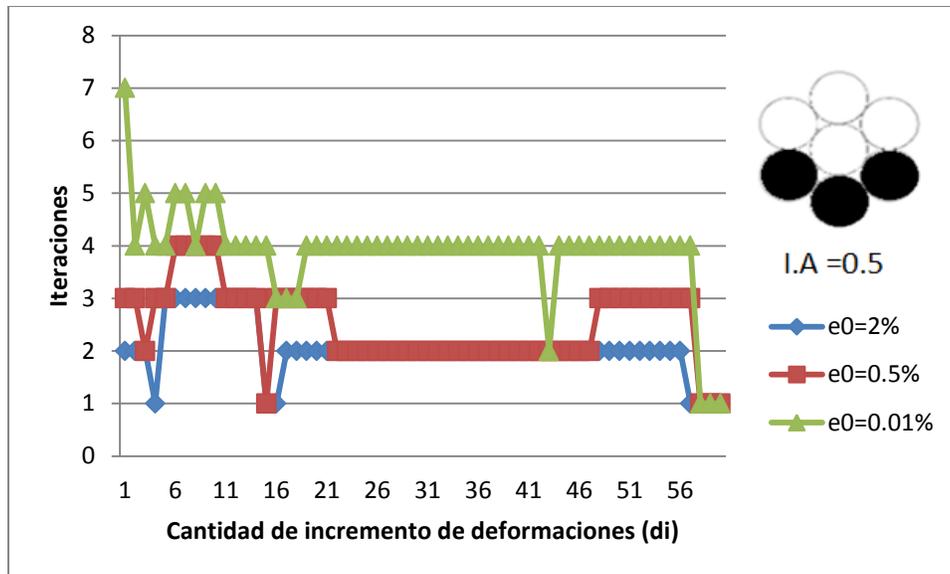


Figura 5.1.1-6: Iteraciones necesarias para di=60 deformaciones. Cable R7_c

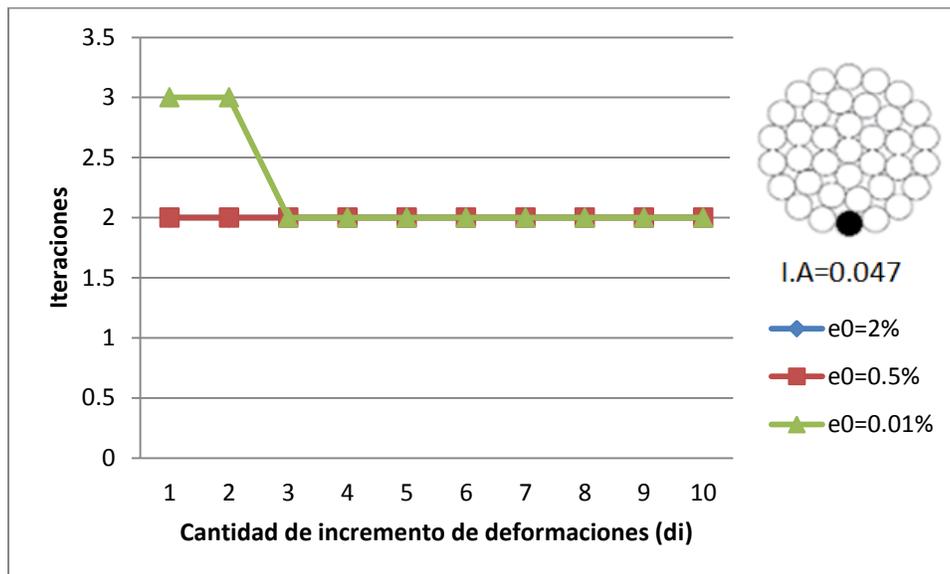


Figura 5.1.1-7: Iteraciones necesarias para di=10 deformaciones. Cable R37_a

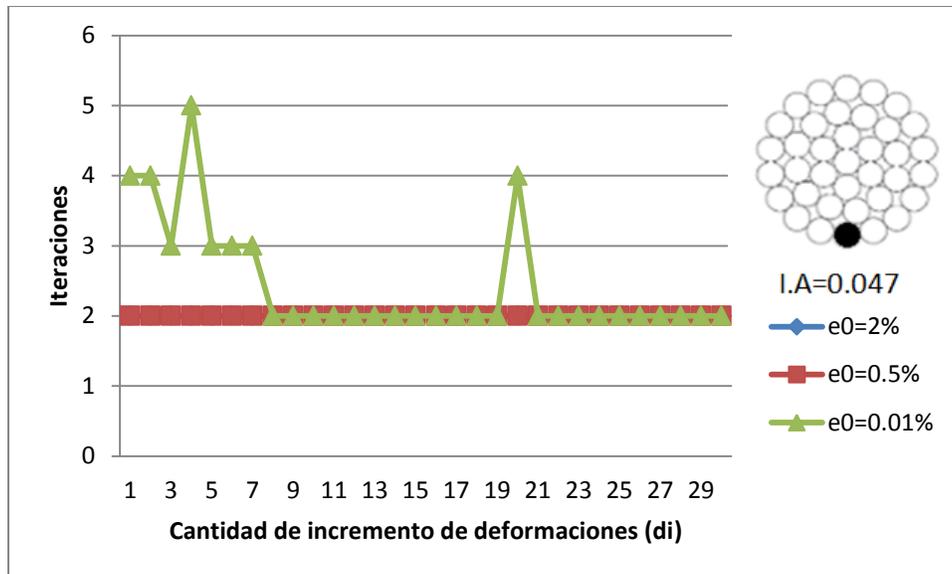


Figura 5.1.1-8: Iteraciones necesarias para di=30 deformaciones. Cable R37_a

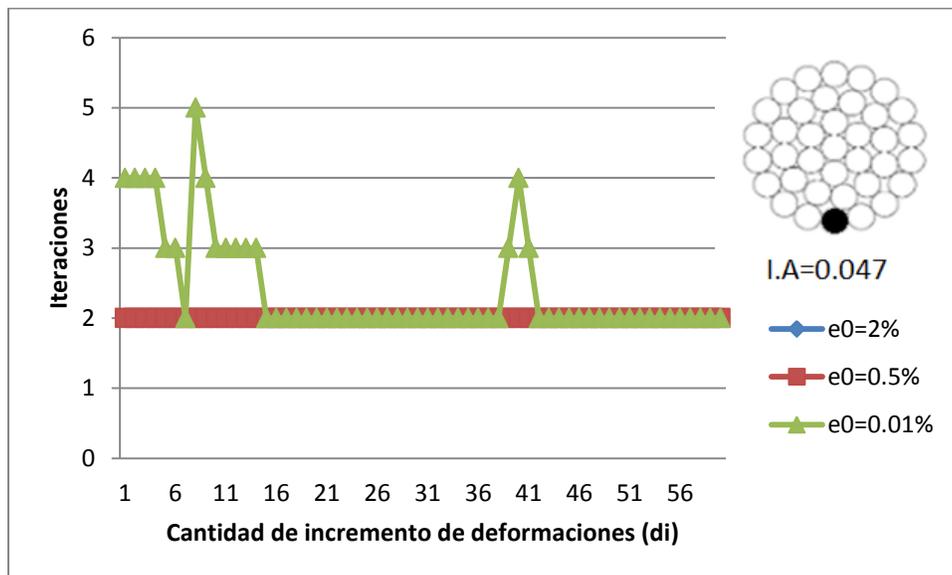


Figura 5.1.1-9: Iteraciones necesarias para di=60 deformaciones. Cable R37_a

Podemos deducir de este caso (R37_a) que para un índice de asimetría bajo, la influencia del error de convergencia no es muy severa en cuanto a las iteraciones requeridas para la convergencia. Se obtiene diferencias notorias cuando se tiene un error de convergencia mucho menores al 2%, como por ejemplo 0.01% el cual se muestra en el caso anterior.

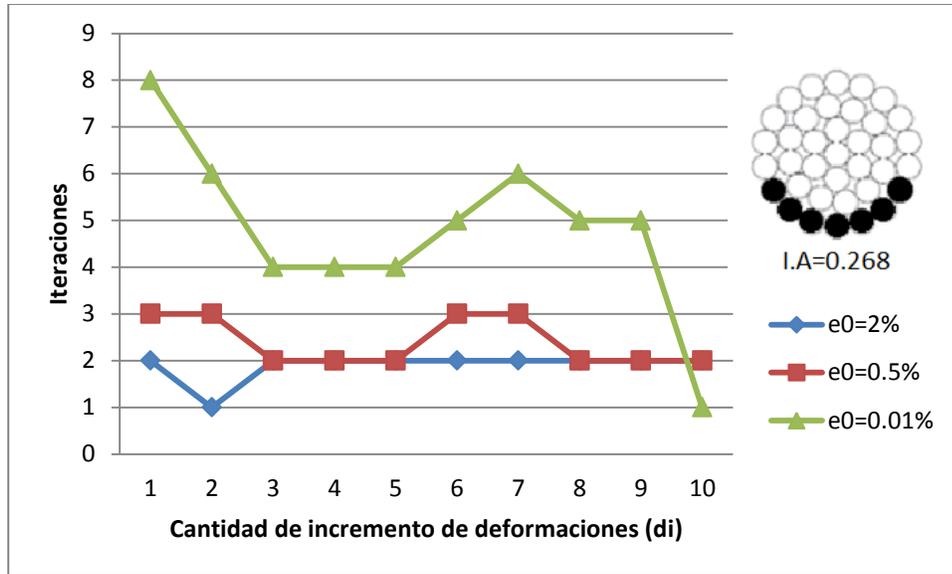


Figura 5.1.1-10: Iteraciones necesarias para di=10 deformaciones. Cable R37_c

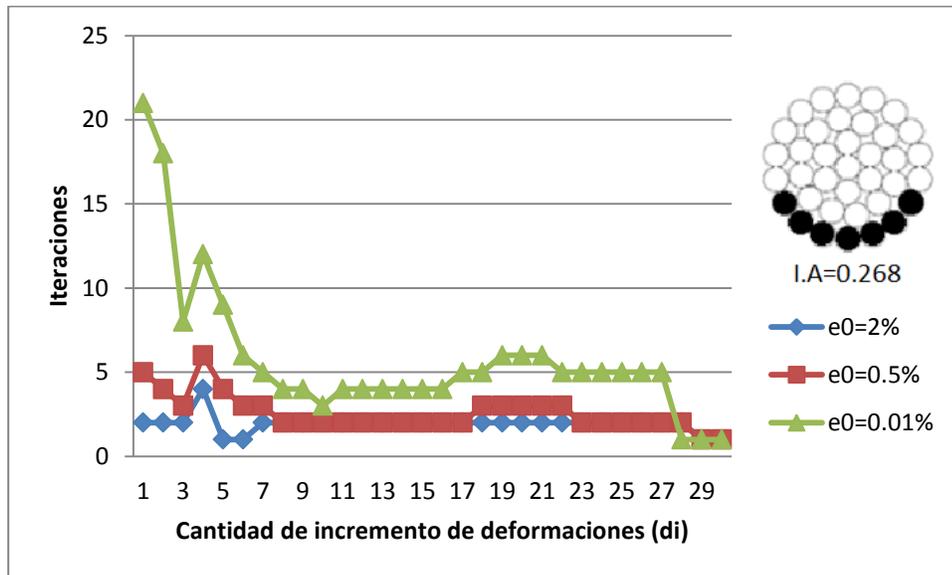


Figura 5.1.1-11: Iteraciones necesarias para di=30 deformaciones. Cable R37_c

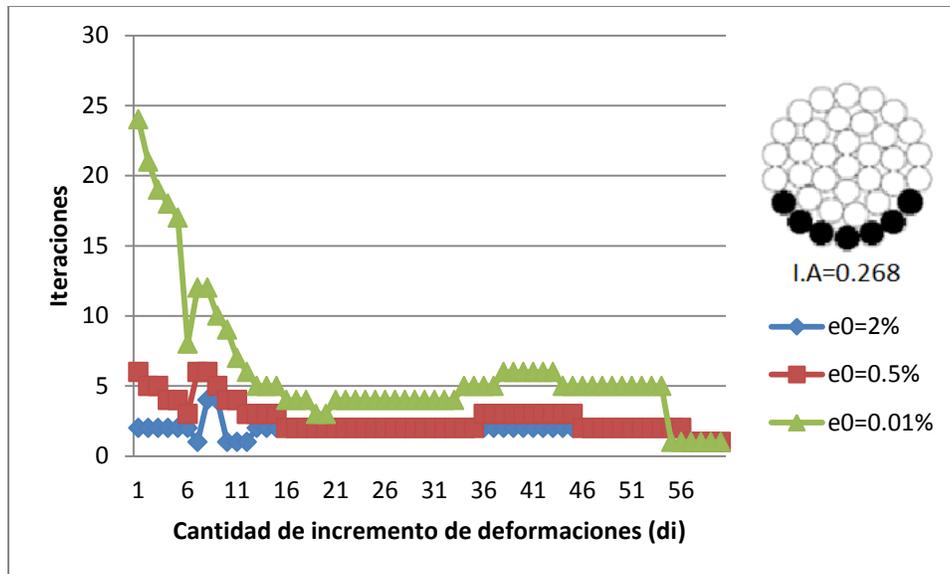


Figura 5.1.1-12: Iteraciones necesarias para di=60 deformaciones. Cable R37_c

De este último caso se observa que un índice de asimetría mayor aumenta las iteraciones necesarias para la convergencia, especialmente cuando consideramos errores de convergencia pequeños. Sin embargo esta gran variación puede deberse al mismo tiempo del tamaño del cable y no solo de su índice de asimetría.

En general, de los gráficos anteriores, se aprecia que se necesita un mayor número de iteraciones para los primeros incrementos de deformación y ésta diferencia aumenta mientras menor es el error de convergencia considerado. La explicación puede deberse al tipo de ley constitutiva que se utilizó. Recordemos que la ley constitutiva utilizada considera para las primeras deformaciones una relación lineal y luego se curva rápidamente llegando a una curva prácticamente constante. Por lo que para los primeros incrementos de deformación considerados el modelo trabaja dentro del rango lineal de la ley constitutiva convergiendo para un mayor número de iteraciones en comparación cuando el modelo trabaja sobre la curva constante de la ley constitutiva.

Comparemos ahora los casos R7_a (I.A=0.2) y R37_c (I.A=0.268), los cuales tienen un índice de asimetría similar pero un cable de con mayor cantidad de capas (componentes) que el otro.

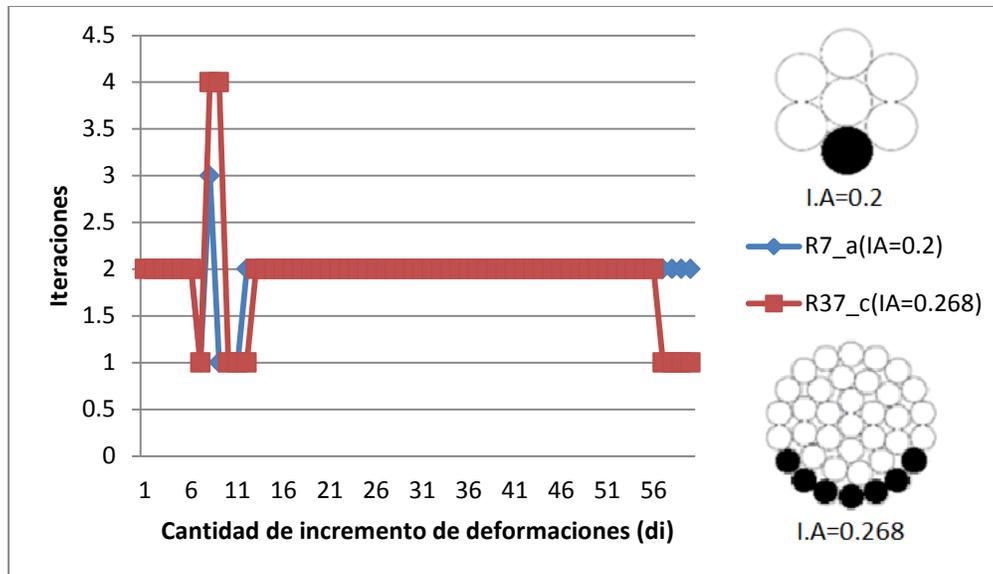


Figura 5.1.1-13: Comparación de convergencia entre casos R7_a y R37_c para e0=2% y di=60

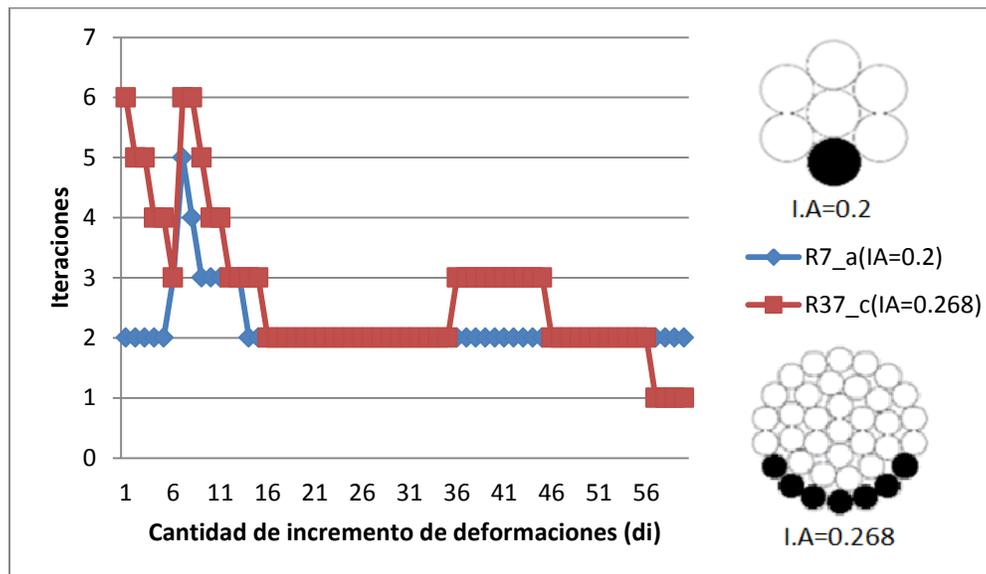


Figura 5.1.1-14: Comparación de convergencia entre casos R7_a y R37_c para e0=0.5% y di=60

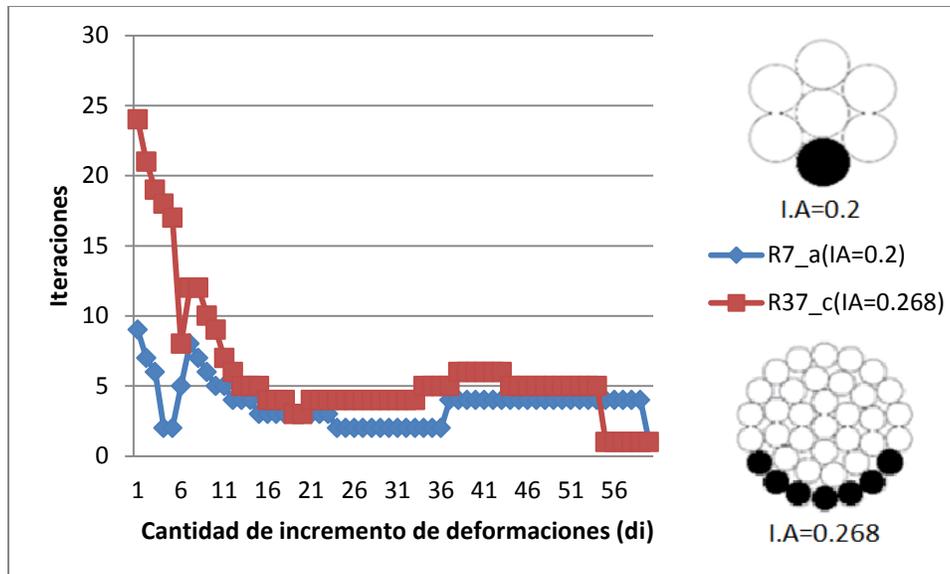


Figura 5.1.1-15: Comparación de convergencia entre casos R7_a y R37_c para $e_0=0.01\%$ y $d_i=60$

En las Figuras 5.1.1-13, 5.1.1-14, 5.1.1-15, en los cuales se compara los casos R7_a y R37_c, se observa para que para un índice de asimetría similar pero para cables de distinto tamaño las iteraciones necesarias aumentan mientras más pequeño es el error de convergencia considerado. Nótese que para un error de 2% las iteraciones requeridas para cada deformación son similares para ambos casos. Pero al considerar un error de 0.01% la diferencia en iteraciones entre un caso y otro es considerablemente mayor para el cable con mayor número de componentes para las primeras deformaciones, siendo esto último consistente con los resultados anteriores en donde la explicación de esta diferencia para las primeros incrementos de deformación radica en la ley constitutiva utilizada como se explicó anteriormente.

La sección de un cable mientras más componentes contenga se va asemejando a tener un cable con un componente del diámetro del mismo. Por lo que el análisis del modelo pasaría de un caso discreto (considerando un número reducido de componentes que conformen el cable) a un caso continuo, integrando en toda la sección del cable. Conforme a esto, el modelo necesitaría de una mayor cantidad de iteraciones para su convergencia al tener que considerar una mayor cantidad de factores dentro de las ecuaciones de equilibrio y diferenciales que rigen el modelo, explicando los resultados de convergencia entre las configuraciones R7_a y R37_c.

5.2 Análisis correspondiente a la influencia del daño asimétrico en cables de configuración multinivel con subcables en paralelo

5.2.1 Análisis de deformaciones de componentes en cables multinivel con subcables en paralelo

Del mismo modo como se analizó para el caso multicapa, interesa saber cómo varía la distribución de deformación, y por ende de tensión, de componentes en la sección del cable con el propósito de observar previamente si el daño asimétrico infligido en las configuraciones multinivel detalladas en el Capítulo 4 radica en alguna diferencia respecto al área neta. En este análisis teórico se obtuvo la deformación máxima (ϵ_{\max}) y mínima (ϵ_{\min}) para una sección dañada del cable además de la correspondiente deformación asociada al área neta la cual es igual para todos los componentes. Dichas deformaciones fueron obtenidas para ciertas configuraciones multinivel ensayadas y detalladas en la referencia [6]. Los casos analizados fueron los siguientes: Para el ensayo correspondiente a 35 ton los casos analizados fueron Marlow con 10% de daño (M35_10), Bexco con 10% de daño (B35_10) y Whitehill con 10% de daño (W35_10). Para el ensayo de 700 ton: Bexco con 10% de daño (B700_10), CSL con 10% de daño (CSL700_10) y Whitehill con 15% de daño (W700_15). Para cada caso analizado se obtuvo resultados para un 30% y 80% de la deformación de fractura ($\epsilon_{\text{fractura}}$) de cada cable utilizando el modelo de viga no lineal extendido. A su vez se incorpora la variación porcentual, tanto de la deformación mínima como máxima, respecto a la deformación según área neta para poder observar el impacto de la asimetría sobre las deformaciones de los componentes. Al igual como se explicó en el caso multicapa (Capítulo 5.1) los componentes más solicitados serán aquellos que se encuentren más cercanos de los componentes fracturados y disminuirá linealmente por la hipótesis de Bernoulli a los componentes más lejanos de los componentes fracturados (Ver Figura 5.2.1-1 en donde los componentes fracturados se encuentran en negro). Las tablas mostradas a continuación contienen los resultados obtenidos para los casos recién mencionados.

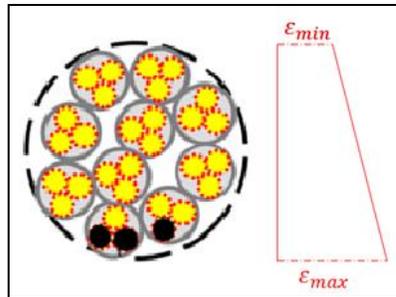


Figura 5.2.1-1: Diagrama deformaciones en sección dañada de un cable multinivel con subcables en paralelo (Ward et al, 2006)

Cable	IA	30% $\epsilon_{fractura}$				
		ϵ_{min} [mm/mm]	ϵ_{max} [mm/mm]	$\epsilon_{A.neta}$ [mm/mm]	Variación min [%]	Variación max [%]
M35_10	0.159	0.0242	0.0266	0.0254	-4.72	4.72
B35_10	0.186	0.0212	0.0213	0.0213	-0.47	0.00
W35_10	0.172	0.0222	0.0263	0.0243	-8.64	8.23

Tabla 5.2.1-1: Deformación máxima y mínima de componentes en cable de ensayo 35 ton a 30% $\epsilon_{fractura}$

Cable	IA	80% $\epsilon_{fractura}$				
		ϵ_{min} [mm/mm]	ϵ_{max} [mm/mm]	$\epsilon_{A.neta}$ [mm/mm]	Variación min [%]	Variación max [%]
M35_10	0.159	0.0666	0.0737	0.0702	-5.13	4.99
B35_10	0.186	0.0555	0.0556	0.0555	0.00	0.18
W35_10	0.172	0.0575	0.068	0.0628	-8.44	8.28

Tabla 5.2.1-2: Deformación máxima y mínima de componentes en cable de ensayo 35 ton a 80% $\epsilon_{fractura}$

Cable	IA	30% $\epsilon_{fractura}$				
		ϵ_{min} [mm/mm]	ϵ_{max} [mm/mm]	$\epsilon_{A.neta}$ [mm/mm]	Variación min [%]	Variación max [%]
B700_10	0.173	0.0205	0.023	0.0217	-5.53	5.99
CSL_10	0.149	0.0238	0.025	0.0244	-2.46	2.46
W700_15	0.252	0.0212	0.0245	0.0229	-7.42	6.99

Tabla 5.2.1-3: Deformación máxima y mínima de componentes en cable de ensayo 700 ton a 30% $\epsilon_{fractura}$

Cable	IA	80% $\epsilon_{fractura}$				
		ϵ_{min} [mm/mm]	ϵ_{max} [mm/mm]	$\epsilon_{A.neta}$ [mm/mm]	Variación min [%]	Variación max [%]
B700_10	0.173	0.0542	0.0609	0.0575	-5.74	5.91
CSL_10	0.149	0.0622	0.0639	0.0631	-1.43	1.27
W700_15	0.252	0.0593	0.0649	0.0621	-4.51	4.51

Tabla 5.2.1-4: Deformación máxima y mínima de componentes en cable de ensayo 700 ton a 80% $\epsilon_{fractura}$

Podemos observar que en general mientras mayor es el índice de asimetría IA la variación porcentual de las deformaciones mínimas y máximas respecto a la deformación por área neta es mayor. Al tener una mayor variación de deformación se tendrá que el cable fallará con mayor anterioridad lo que muestra una implicancia directa entre el índice de asimetría y la deformación de falla. Nótese que para cada caso la variación min y variación max son similares en magnitud. Esto nos dice que a pesar de los diferentes IA contemplados el centro de rigidez del cable varía levemente respecto a la sección no dañada. Es de esperar que en general para las curvas obtenidas con el modelo de viga no lineal VGNL, las cuales serán mostradas más adelante, se obtengan valores de pérdida de deformación mayor para los casos con mayor asimetría.

Vemos que para los casos relacionados con el ensayo de 35 ton, los cuales tienen un índice de asimetría similar, la diferencia de variación de deformación entre los casos es variada teniendo desde una variación prácticamente de 0% (B35_10) a 8% (W35_10). Esto puede deberse a que la distribución de los componentes y/o el tamaño de los componentes y/o la cantidad de componentes tenga un efecto mayor en relación a la distribución del daño (i.e índice de asimetría I.A). Observamos a su vez que para el caso W700_15 se obtienen variaciones del mismo orden que para el caso W35_10 (7.42%) y difiere considerablemente del resto de los casos. Por lo que se puede pensar, como se acaba de mencionar, que la cantidad de componentes o distribución de éstos podría ser una variable a considerar en los análisis además la distribución del daño.

Cabe mencionar que la guía de retiro “API RP 2SM” [18] señala que no deben tenerse niveles de daño por sobre el 10%. Lo que implicaría, para los casos multinivel que estamos analizando, que los valores máximos de índice de asimetría posibles no podrían superar 0.2 siendo una cota superior a la hora de concluir los efectos de la asimetría en la práctica.

En cuanto a la deformada lateral en ambos planos (V y W) de los casos analizados anteriormente, se obtuvo una deformada global del cable muy similar a lo calculado por De Vico [10] lo que muestra consistencia con las hipótesis utilizadas para la extensión del modelo de viga no lineal. Como ejemplo se muestra la deformada para el caso B35_10 para un 30% de $\epsilon_{fractura}$.

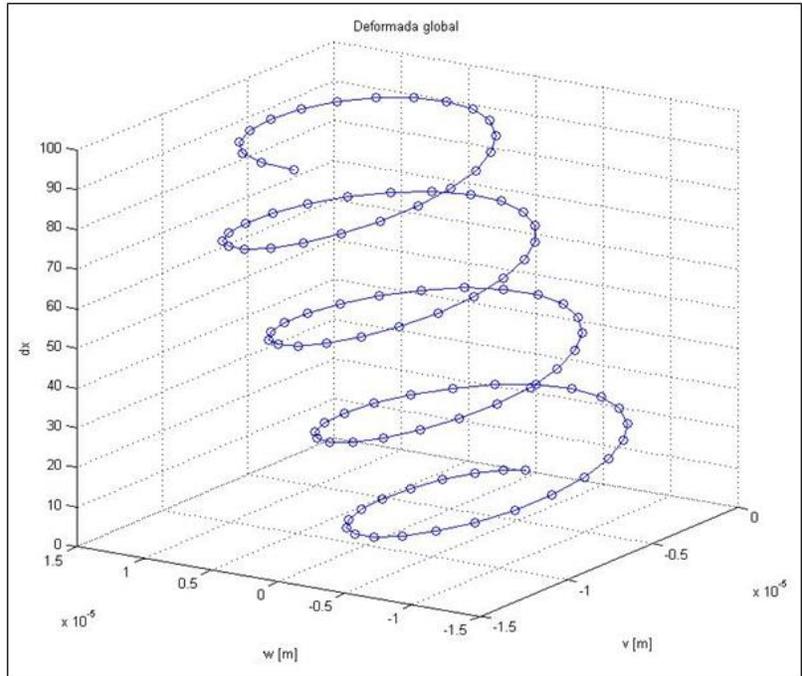


Figura 5.2.1-2: Deformada global cable Bexco 35 ton 10% daño para un 30% de $\epsilon_{fractura}$

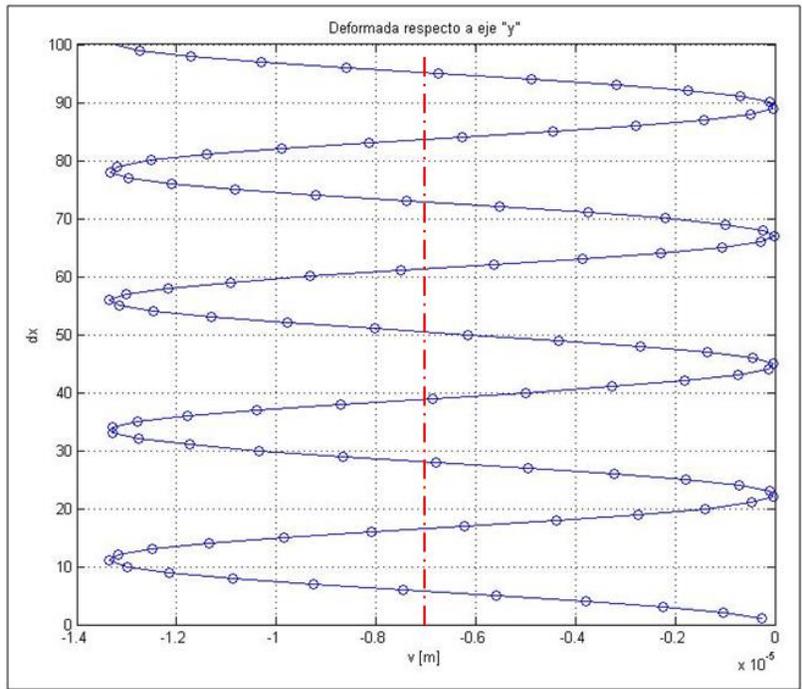


Figura 5.2.1-3: Deformada según eje "y" cable Bexco 35 ton 10% daño para un 30% de $\epsilon_{fractura}$

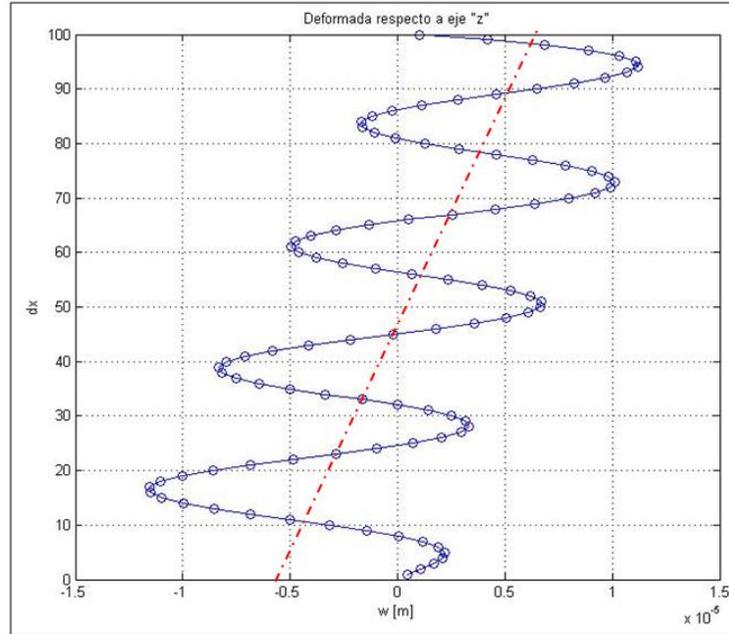


Figura 5.2.1-4: Deformada según eje “z” cable Bexco 35 ton 10% daño para un 30% de $\epsilon_{fractura}$

En donde:

- dx : Secciones a lo largo del cable
- v [m]: Deformada respecto al eje “y” del sistema global del cable
- w [m]: Deformada respecto al eje “z” del sistema global del cable

Se puede apreciar que para ambos ejes la oscilación (i.e magnitud) de la deformada es la misma, sin embargo la oscilación de la deformada del eje “y” se tiene en torno a un eje vertical y respecto al eje “z” la deformada oscila respecto a un eje inclinado, similar a lo obtenido por De Vico [10] y su explicación ésta dada debido a la condiciones de borde impuestas y del desarrollo de la ecuación diferencial obtenida. A su vez se tienen magnitudes máximas de deformación del orden de 10^{-4} [m], cuyos valores se comparan con los resultados generados por De Vico [10] para índices de asimetría semejantes. Cabe notar que a pesar de considerar diámetros de cables diversos (4,4 mm para cables modelados por De Vico [10], 36 mm aprox. para ensayo 35 ton [6] y 160 mm aprox. para ensayo 700 ton [6]) la magnitud de desplazamientos laterales fue similar. Si bien se debería esperar magnitudes de fuerza desbalanceada mayores para cables de mayor diámetro, y por ende mayores deformaciones laterales, a su vez la carga axial es

mayor para cables de mayor diámetro mitigando así los efectos de flexión producidos por la fuerza desbalanceada. De esta manera, al obtener deformaciones laterales similares entre cables de diferente diámetro, hace pensar que la relación entre fuerza desbalanceada y carga axial en cada cable deberían ser similares explicando el efecto observado.

5.2.2 Resultados obtenidos con modelo de viga no lineal extendido en cables multinivel con subcables en paralelo

A partir de las configuraciones adoptadas en el Capítulo 4 se obtuvo la capacidad residual y capacidad de deformación de los cables dañados con configuración multinivel según el modelo extendido detallado en el Capítulo 3. Recordar que el modelo extendido solo incorpora el efecto de la asimetría en su algoritmo y la referencia de la cual se obtuvo los ensayos de las configuraciones multinivel a comparar con el modelo extendido [6] señala otros factores posibles involucrados en el comportamiento de los cables ensayados. Entre éstos destacan:

- Concentración de deformaciones
- Desenrollamiento de subcables dañados
- Daño adyacente “Recoil damage”
- Espesor del “jacket” del cable
- Número de “pasos” del subcable

Atribuyendo los posibles factores que señala la referencia [6], en particular la concentración de deformaciones, existe en la literatura un modelo que incorpora el efecto de concentración de deformaciones pero no así el efecto de la asimetría, y su influencia depende del factor L/D mencionado con anterioridad en las referencias. Dicho modelo, presentado por Beltrán y Williamson [16],[17], fue aplicado para las configuraciones multinivel detalladas en el Capítulo 4 para poder concluir sobre la relevancia del daño asimétrico y de la concentración de deformaciones por separado en el comportamiento de configuración analizada.

A continuación se presentan para cada configuración los resultados obtenidos con el modelo de viga no lineal extendido (Modelo propuesto), considerando área neta, con el modelo de concentración de deformaciones (SLM) [16],[17] y los ensayos realizados según la referencia [6] (nombrados como “T (L/D)”), en donde estos últimos se pueden observar a su vez en el ANEXO C: *Curvas de capacidad-deformación obtenidas de ensayos realizados en* . Los resultados contemplan, para cada configuración y para cada modelo o ensayo, un gráfico que muestra la curva capacidad-deformación junto con una tabla que incorpora la deformación de fractura ($\epsilon_{\text{fractura}}$), capacidad residual, porcentaje total de daño de la sección transversal, pérdida de capacidad y deformación.

Nomenclatura de resultados:

- *T_x(y): Resultado experimental correspondiente al ensayo “T” número “x” según referencia [6] con un factor “L/D=y”. (ej. T9(40): Ensayo T9 según [6] con un factor L/D=40).*
- *A_x_y: Resultado con modelo de viga no lineal correspondiente a Cable tipo “A” ensayado a “x” toneladas según referencia [6] con un daño infligido de “y” %. (ej. M35_10: Resultado asociado a cable Marlow sometido a 35 ton con un daño seccional de 10%).*
- *SLM_x(y): Resultado simulado con concentración de deformaciones con daño “x” % y un factor “L/D=y”. (ej. SLM_10(40): Simulación con concentración de deformaciones con un daño de 10% asociado a un factor L/D=40).*

5.2.2.1 Resultados y comentarios para configuración MARLOW 35 ton y 700 ton

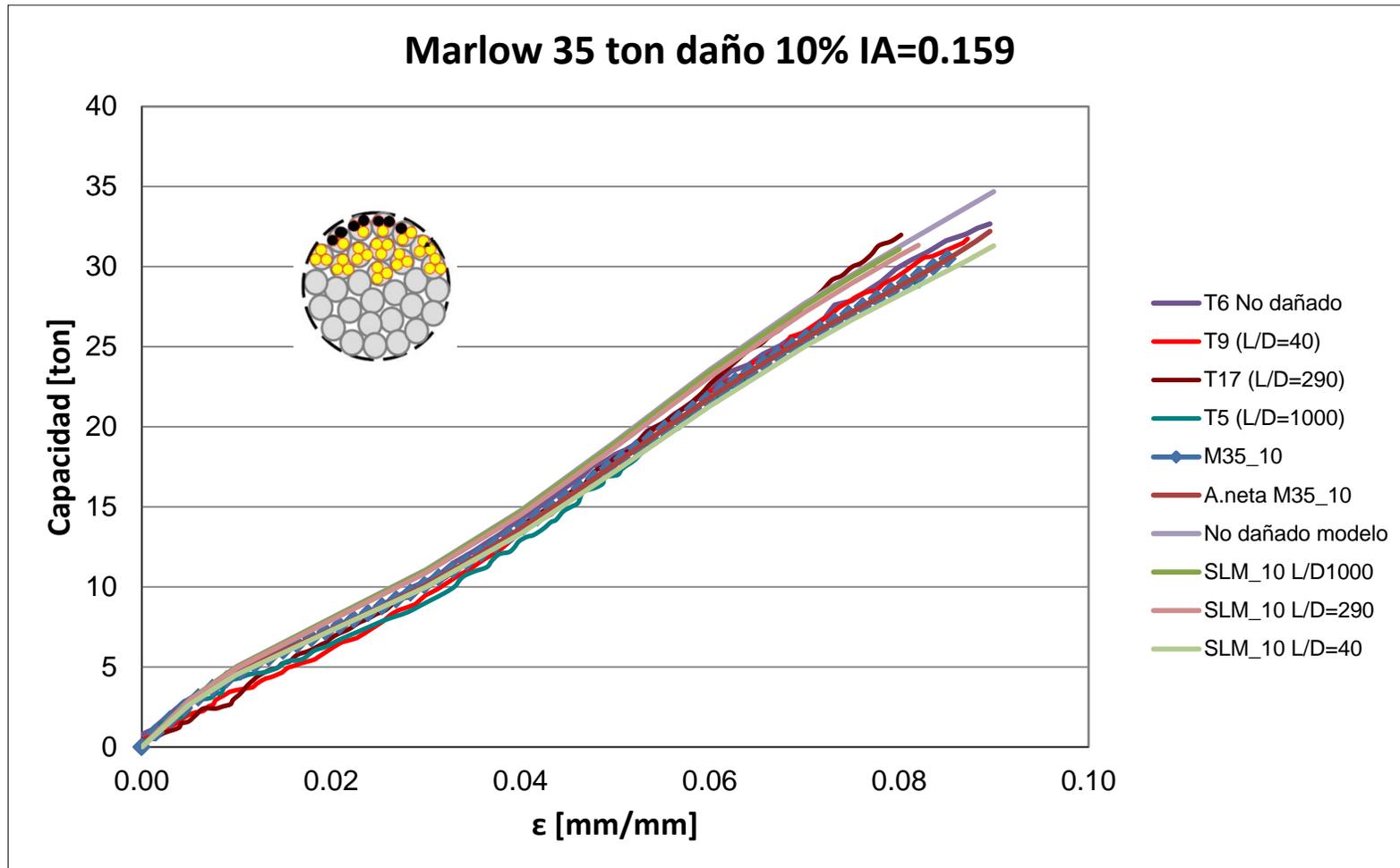


Figura 5.2.2-1: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Marlow 35 ton 10% daño

Marlow 700 ton daño 5% IA=0.095

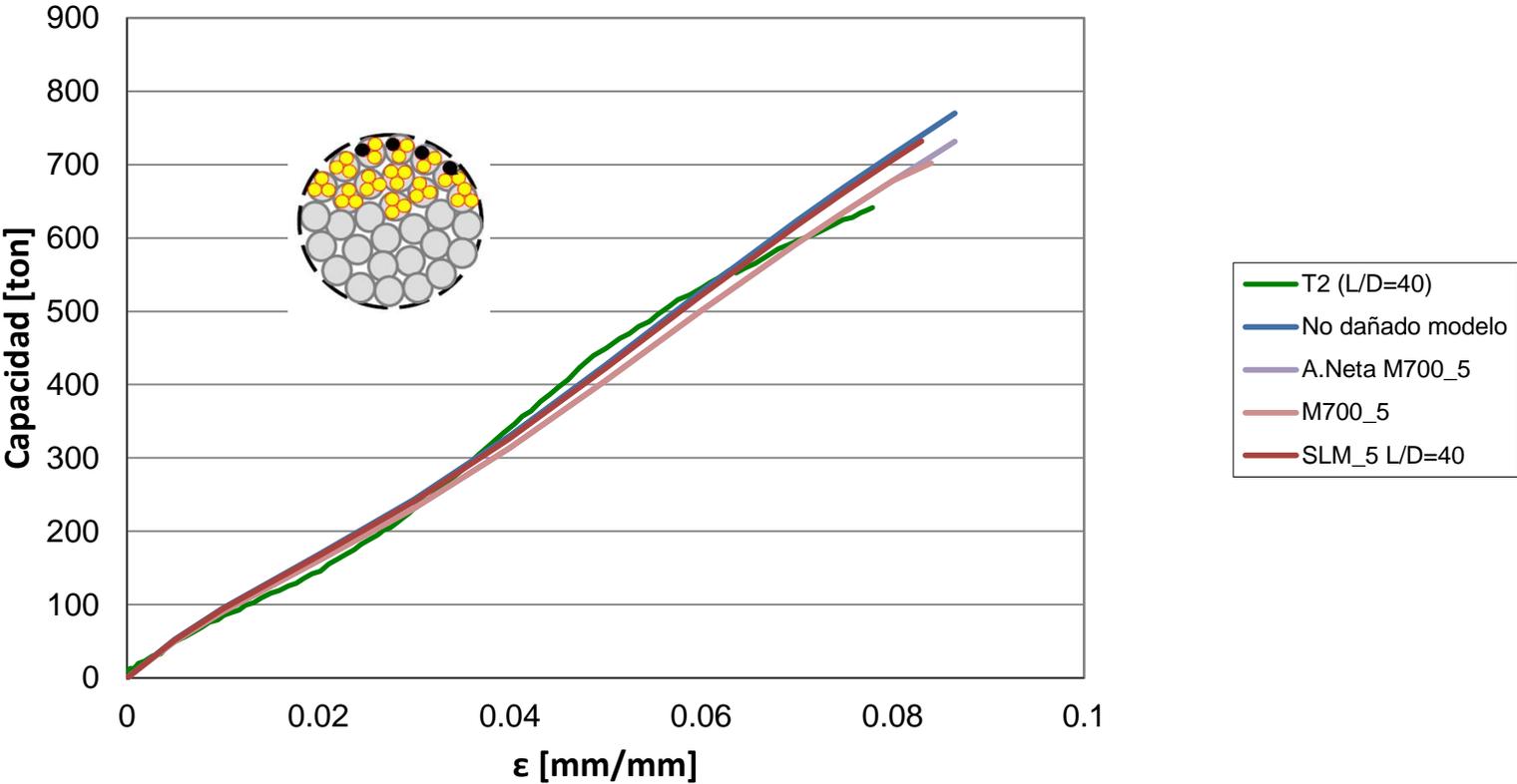


Figura 5.2.2-2: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Marlow 700 ton 5% daño

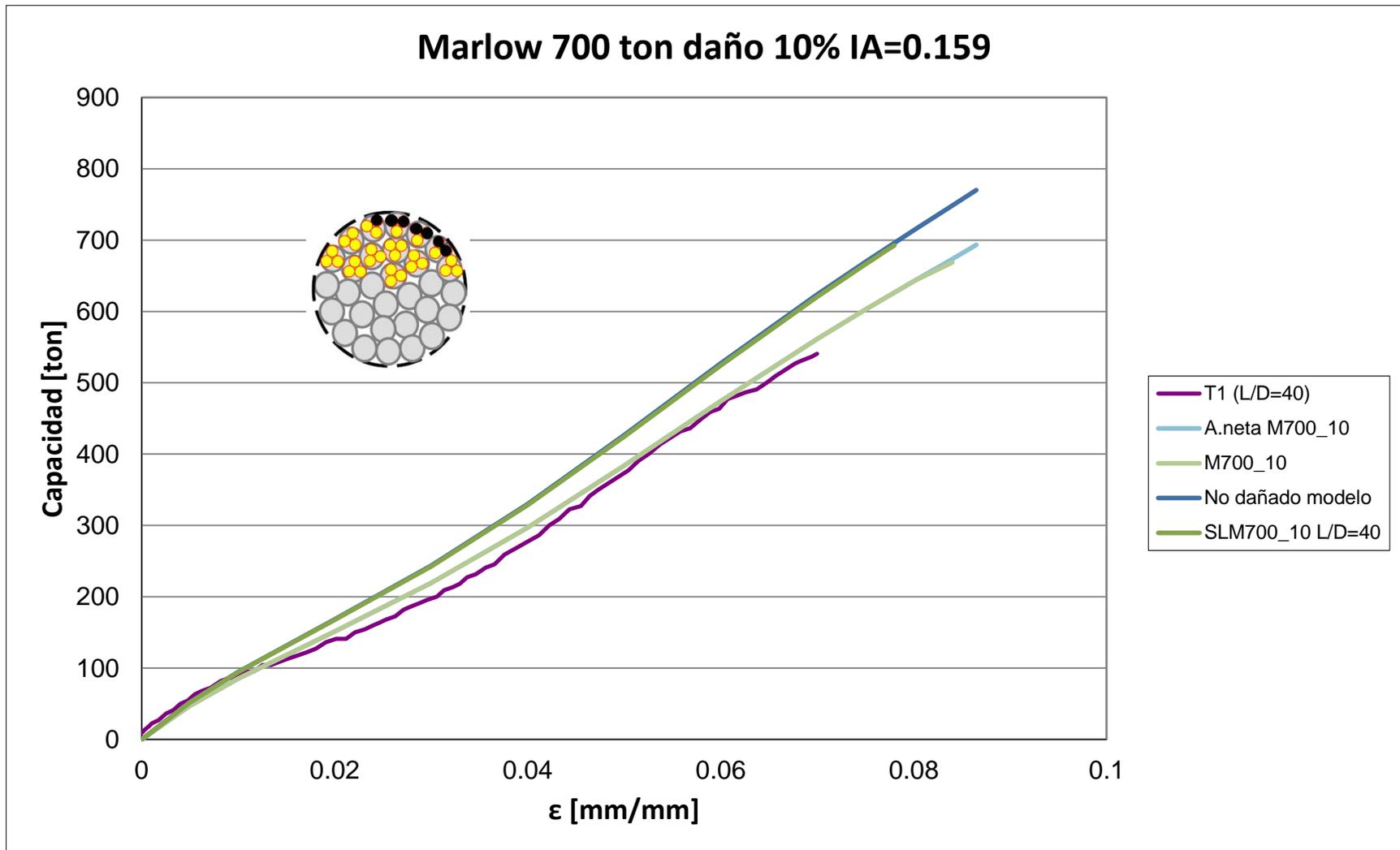


Figura 5.2.2-3: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Marlow 700 ton 10% daño

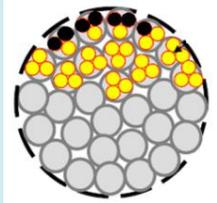
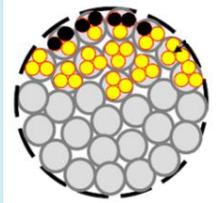
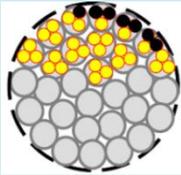
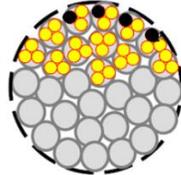
Cable Marlow											
Ensayo	Origen	Cable	ϵ fractura [mm/mm]	Capacidad [ton]	Daño [%]	Perdida cap. [%]	Perdida def. [%]	Sección			
35 ton	Ensayo	T6	0.0896	32.67	0	0.00	0.00	Daño 10%			
		T5 (1000)	0.0823	29.04	10	-11.12	-8.15				
		T9 (40)	0.087	31.73	10	-2.86	-2.68				
		T17 (290)	0.0802	31.98	10	-2.11	-10.49				
	Modelo	M35_0	0.0896	34.67	0	0.00	0.00				
		M35_10	0.0851	30.49	10	-12.04	-5.00				
		Área neta M35_10	0.0896	32.20	10	-7.12	0.00				
	Simulación Ction.def	SLM_10 (40)	0.0896	31.30	10	-9.72	0.00	IA = 0.159			
		SLM_10 (290)	0.0820	31.34	10	-9.60	-8.48				
SLM_10 (1000)		0.0800	31.08	10	-10.35	-10.71					
700 ton*	Modelo	M700_0	0.0865	770.21	0	0.00	0.00	Daño 10%	Daño 5%		
	Ensayo	T1	0.07	540.91	10	-29.77	-19.08				
		T2	0.0779	641.32	5	-16.73	-9.94				
	Modelo	M700_10	0.084	668.70	10	-13.18	-2.89				
		Área neta M700_10	0.0865	693.19	10	-10.00	0.00				
		M700_5	0.084	702.00	5	-8.86	-2.89				
		Área neta M700_5	0.0865	731.70	5	-5.00	0.00				
	Simulación Ction.def	SLM_10 (40)	0.078	692.65	10	-10.07	-9.83	IA = 0.159	IA = 0.095		
		SLM_5 (40)	0.083	732.06	5	-4.95	-4.05				

Tabla 5.2.2-1: Capacidades y deformaciones para cable Marlow

* Cálculos de pérdida de capacidad y deformación para este ensayo se obtuvo con relación a los datos del modelo de cable intacto (M700_0) debido a que no se contemplaba con un ensayo no dañado del cable con el cual comparar.

Como se puede apreciar, la curva no dañada modelada difiere de la curva experimental no dañada. Si bien la ley constitutiva se obtuvo de dicho ensayo no dañado no se contaba con la geometría exacta de la cuerda (ángulo de hélice, paso de cada subcable, etc) lo que implicaría en las diferencias observadas. Producto de estas diferencias entre curva no dañada ensayada y curva no dañada modelada no es posible hacer comparaciones directas de pérdida de capacidad última y pérdida de deformación última entre los resultados obtenidos con el modelo y los ensayos realizados debido a que como la geometría utilizada en el modelo no es exactamente fiel a la cuerda ensayada es de esperar ciertas diferencias entre los resultados obtenidos y los ensayados. Sin embargo es posible realizar comparaciones entre las pérdidas de capacidad y deformación obtenidas si analizamos diferencias de resultados que fueron obtenidos por medio del mismo método, es decir, comparando la pérdida de capacidad y deformación que se obtienen entre los resultados del modelo con la curva no dañada modelada y la pérdida de capacidad y deformación entre resultados ensayados respecto al ensayo no dañado. Análogamente se utilizó la misma metodología para la comparación de resultados de los casos Whitehill 35 y 700 ton.

Considerando lo señalado anteriormente, se aprecia para el caso Marlow 35 ton:

- Se observa que la curva M35_10 es más rígida que las curvas ensayadas para las primeras deformaciones. A partir de un 4% de deformación las curvas ensayadas intersectan a la curva obtenida con el modelo propuesto. Para deformaciones posteriores al 4% las curva T17 se rigidiza situándose por sobre la curva M35_10, fallando a una deformación similar a la curva SLM_10 (1000) (8.02% vs 8.0% respectivamente). Sin embargo las curvas T9 y T5 tienden a acoplarse a la curva M35_10 fallando una deformación y capacidad entre ambas curvas ensayadas (8.51% y 30.49 ton respectivamente). Por lo que el modelo propuesto (influencia asimétrica) tiende a describir el comportamiento aproximado de los ensayos T5 y T9 los cuales al parecer está influenciado principalmente por el efecto de asimetría.
- Con respecto al ensayo T17 (290) vemos, al igual que para el resto de los ensayos, es menos rígida en comparación con las curvas modeladas M35_10 y SLM_10 (290) para las primeras deformaciones. Luego la curva ensayada tiende a rigidizarse, y a partir de una deformación aproximada del 6.5% llega a estar por sobre la curva SLM_10 (290), fallando a una capacidad residual similar a la curva SML_10 (290) (31.98 ton vs 31.34 ton respectivamente) pero a una

deformación levemente menor (8.02% vs 8.20%). Por lo que la curva de concentración de deformaciones SLM_10 (290) (junto con la curva SLM_10 (1000) la cual tiene un comportamiento similar) describe de mejor satisfactoria la curva ensayada T17 en relación a la curva obtenida con el modelo propuesto (influencia asimétrica). Reflejando que el efecto de concentración de deformaciones para este ensayo predomina sobre el efecto de la asimetría. Sin embargo, según lo señalado en la referencia [6] respecto a este ensayo (T17), esta curva ensayada logra fallar en los extremos del cable y no donde fue dañada de forma manual. Lo que implicaría en una rigidización de la curva producto de que algunos de los elementos cortados hayan recuperado carga en los extremos del cable explicando la falla de éste por sobre la curva no dañada.

- En general las curvas modeladas con concentración de deformaciones tienden a estar por sobre la curva obtenida con el modelo propuesto a excepción de la curva SLM_10 (40) que se localiza por debajo de ésta para todo nivel de deformación. Todas las curvas que consideran concentración de deformaciones fallan a una capacidad residual similar (31.30 ton, 31.34 ton y 31.08 ton) y mayor en comparación a la curva con el modelo propuesto M35_10 (30.49 ton).
- Para los modelos con concentración de deformaciones (SML) y el modelo propuesto M35_10, se obtiene que para un 10% de daño del cable se obtiene alrededor de un 10% de pérdida de capacidad.
- La curva con el modelo propuesto M35_10 y su área neta respectiva tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez. A diferencia que la curva con el modelo falla a una menor deformación y para una capacidad última menor respecto a la curva de área neta (8.51% vs 8.96% en deformación y 30.49 ton vs 32.20 ton en capacidad respectivamente).

Para el caso Marlow 700 ton, al no tener una curva ensayada sin daño, el cálculo de pérdida de capacidad y deformación para los ensayos y los modelos fueron realizadas respecto a la curva sin daño modelada M700_0. Para este caso se puede apreciar que:

- Para un 5% de daño, la curva ensayada T2 (40) es menos rígida en comparación con las curvas modeladas (M700_5 SML_5 (40)) para las primeras deformaciones y se rigidiza a partir de una deformación

aproximada de 3.5% para situarse por sobre ambas curvas modeladas. Para una deformación de 6.5% aprox. la curva ensayada tiende a acoplarse a la curva obtenida con el modelo propuesto M700_5 fallando a una deformación más temprana y para una capacidad menor (7.79% vs 8.4% en deformación y 641.32 ton vs 702.00 ton en capacidad respecto a la curva M700_5). La diferencia de pérdida tanto de capacidad como en deformación entre las curvas T2 y M700_5 es notoria, llegando a obtener valores con diferencia de dos y tres veces aproximado. (-16.73% vs -8.86% en pérdida de capacidad y -9.94% vs -2.89% en pérdida de deformación respectivamente). Cabe señalar que, al igual que caso M35, la curva no dañada modelada puede que no sea comparable con la curva no dañada ensayada del cable M700 (con la cual no se cuenta), lo que explicaría los porcentajes de pérdida de capacidad y deformación de la curva ensayada, los cuales fueron calculados respecto a la curva no dañada modelada M700_0 como se dijo en un principio.

- El ensayo T1 (40), correspondiente a un 10% de daño, se correlaciona muy bien con la curva obtenida con el modelo propuesto M700_10. Lo que implicaría en un eventual efecto de la asimetría como influencia en el comportamiento en este ensayo. Sin embargo esta similitud entre las curvas no es comparable debido a que, según lo mencionado en la referencia [6], la curva ensayada T1 fue llevada a rotura luego de que haberse ciclado el cable lo que produjo un total de 6 subcables fracturados. Por lo que la sección real dañada correspondería aproximadamente a un 25% y no 10% como se consideró en un principio. Esto podría explicar la considerable diferencia de capacidad y deformación última entre la curva T1 y la curva M700_10 (En deformación: 7.0% vs 8.4% respectivamente. En capacidad: 540.91 ton vs 668.70 ton respectivamente).
- Tanto para el caso SML_5 (40) y SML_10 (40) se obtiene que para un 5% y un 10% de daño del cable se obtiene alrededor de un 5% y un 10% de pérdida de capacidad respectivamente (-4.95% y -10.07%). Esta diferencia aumenta levemente para los valores asociadas a las curvas M700_5 y M700_10 (-8.86% y 13.18% respectivamente). En cuanto a las curvas ensayadas los valores de pérdida de capacidad son considerables en relación al porcentaje de pérdida de área llegando a -16.73% y -29.77% para los ensayos T2 y T1 respectivamente.

- Las curvas obtenidas con el modelo propuesto M700_5 y M700_10 tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez respecto de la curva de área neta correspondiente. A diferencia que las curvas obtenidas con el modelo propuesto fallan a una menor deformación y a una menor capacidad última respecto a la curva de área neta (8.4% vs 8.65% en deformación y 702.00 ton vs 731.70 ton en capacidad respectivamente para el caso M700_5. Para el caso M700_10 se obtiene 8.4% vs 8.65% en deformación y 668.70 ton vs 693.19 ton en capacidad respectivamente).
- Es posible apreciar que las curvas con concentración de deformaciones SLM_5 (40) y SLM_10 (40) presentan la misma rigidez en comparación con la curva no dañada modelada con la diferencia que estas tienden a la fallar antes y para una menor capacidad en relación a esta última (En deformación: 8.3%, 7.8% y 8.65%. En capacidad: 732.06 ton, 692.65 ton y 770.21 ton. Valores correspondiente a las curvas SLM_5 (40), SLM_10 (40) y No dañada modelada respectivamente).

5.2.2.2 Resultados y comentarios para configuración WHITEHILL 35 ton y 700 ton

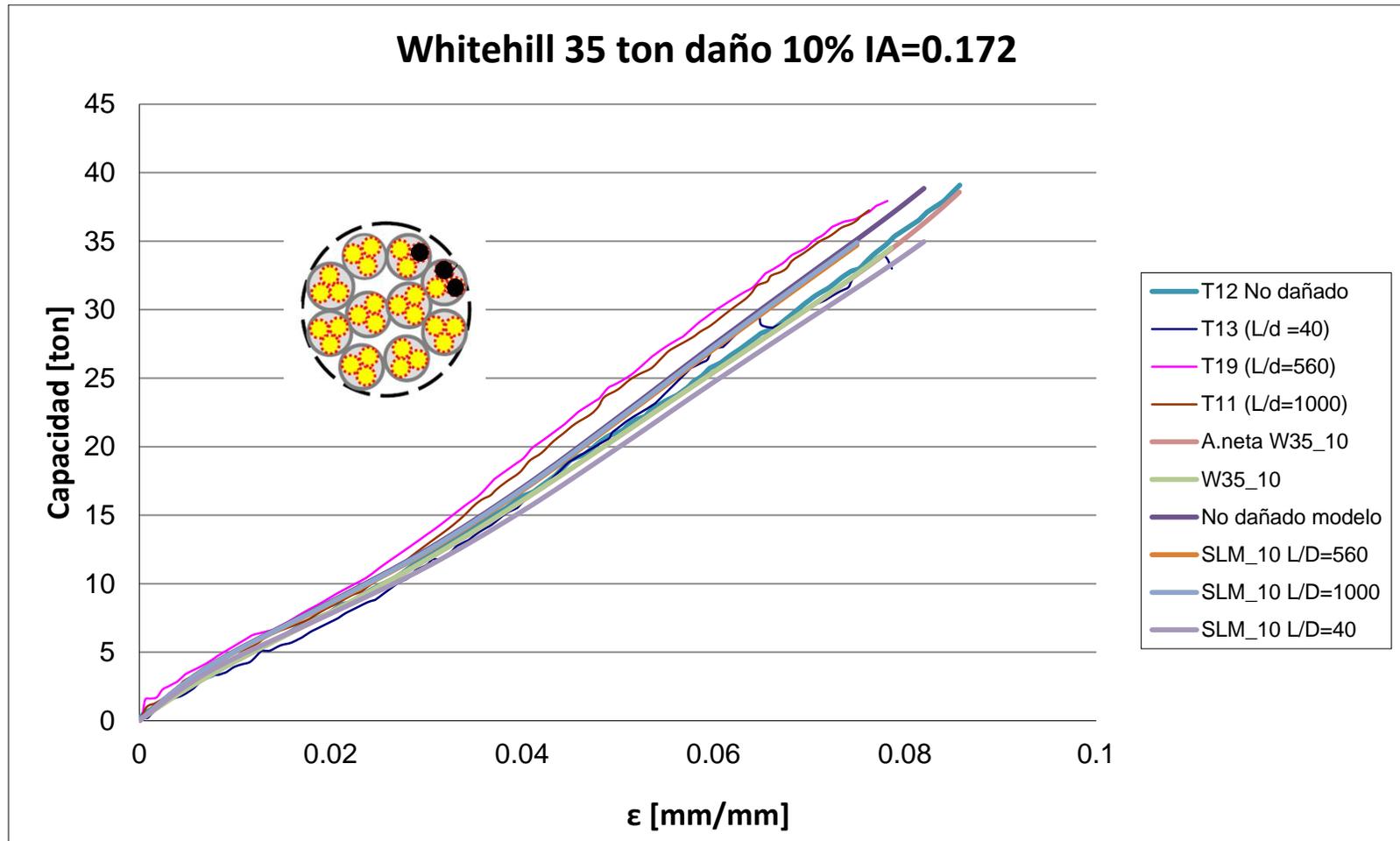


Figura 5.2.2-4: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Whitehill 35 ton 10% daño

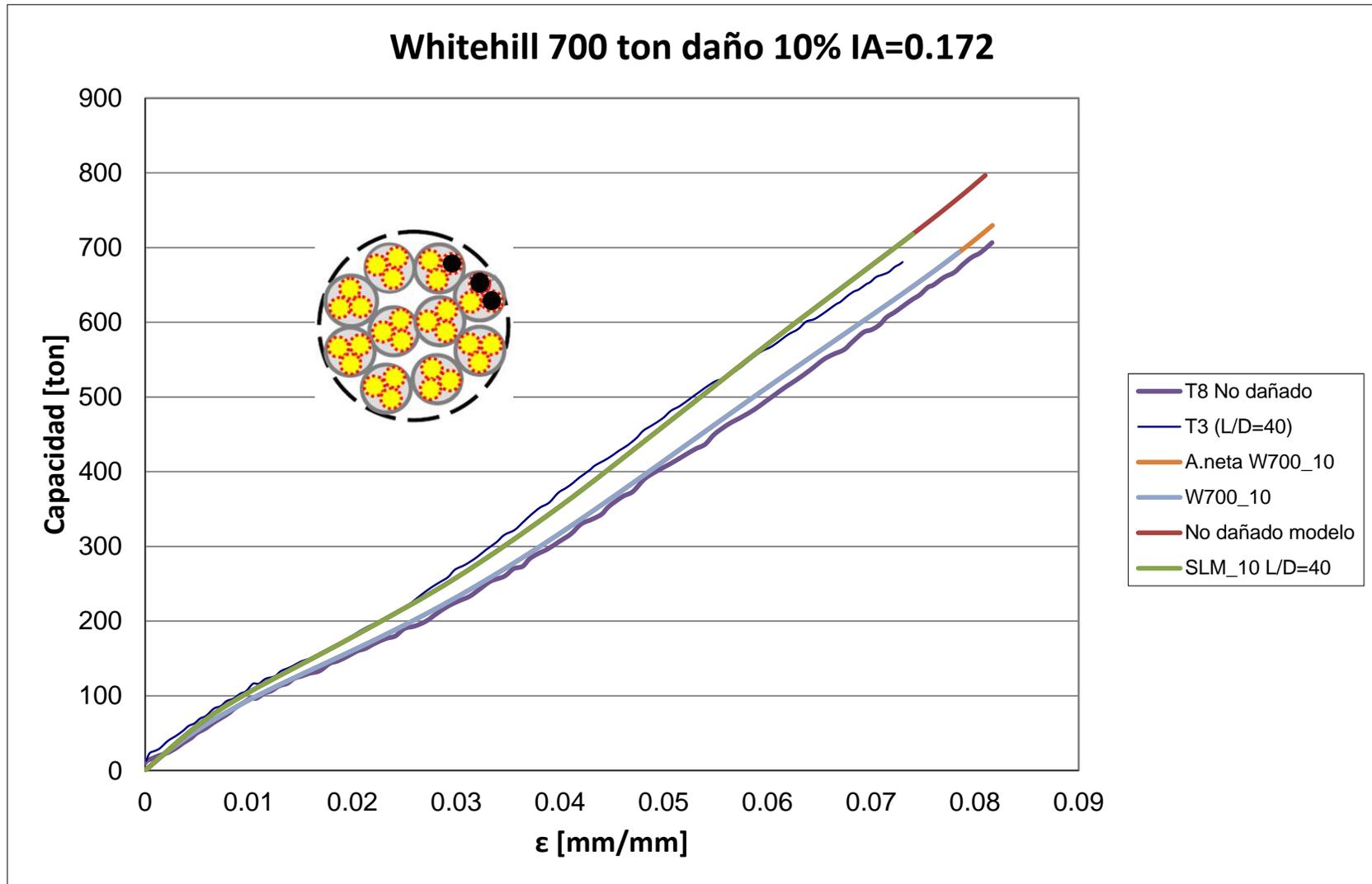


Figura 5.2.2-5: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Whitehill 700 ton 10% daño

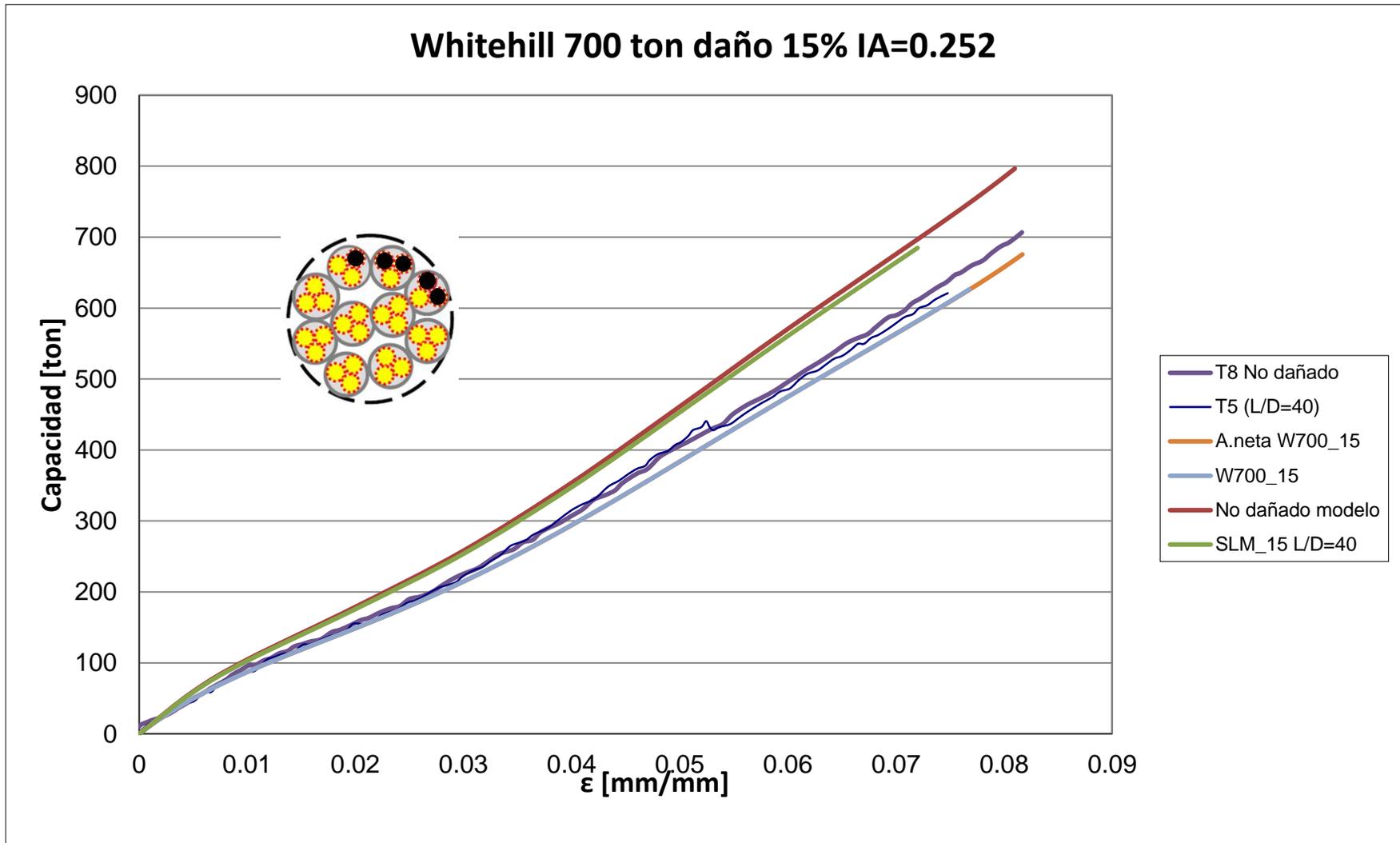


Figura 5.2.2-6: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Whitehill 700 ton 15% daño

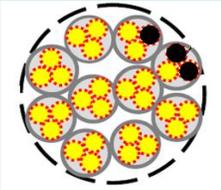
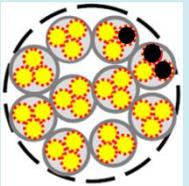
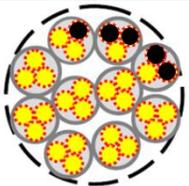
Cable Whitehill													
Ensayo	Origen	Cable	ϵ fractura [mm/mm]	Capacidad [ton]	Daño [%]	Perdida cap. [%]	Perdida def. [%]	Sección					
35 ton	Ensayo	T12	0.0857	39.09	0	0	0.00	Daño 10%					
		T11 (1000)	0.0763	37.25	10	-4.70	-10.97						
		T13 (40)	0.0786	33.00	10	-15.58	-8.28						
		T19 (560)	0.0782	37.93	10	-2.96	-8.75						
	Modelo	W35_0	0.0820	38.85	0	0.00	0.00			<p style="text-align: center;">IA = 0.172</p>			
		W35_10	0.0786	34.49	10	-11.23	-4.20						
		Área neta W35_10	0.0857	38.58	10	-0.70	4.51						
	Simulación Ction.def	SML_10 (40)	0.0820	34.96	10	-10.01	0.00	<p style="text-align: center;">IA = 0.172</p>					
		SLM_10 (560)	0.0750	34.71	10	-10.66	-8.54						
SLM_10 (1000)		0.0750	34.89	10	-10.19	-8.54							
700 ton	Ensayo	T8	0.0817	706.67	0	0	0.00					Daño 10%	Daño 15%
		T3 (40)	0.0730	680.50	10	-3.70	-10.65						
		T5 (40)	0.0748	620.98	15	-12.13	-8.45						
	Modelo	W700_0	0.081	796.62	0	0.00	0.00			<p style="text-align: center;">IA = 0.172</p>			
		W700_10	0.0784	693.36	10	-12.96	-3.17						
		Área neta W700_10	0.0817	729.68	10	-8.40	0.86						
		W700_15	0.0768	626.45	15	-21.36	-5.19						
	Área neta W700_15	0.0817	675.63	15	-15.19	0.86	<p style="text-align: center;">IA = 0.252</p>						
	Simulación Ction.def	SLM_10 (40)	0.0740	717.59	10	-9.92			-8.64				
SLM_15 (40)		0.0720	684.76	15	-14.04	-11.11							

Tabla 5.2.2-2: Capacidades y deformaciones para cable Whitehill

Se desprende del caso Whitehill 35 ton lo siguiente:

- Observamos que los ensayos T19 (560) y T11 (1000) tienen un comportamiento similar. En donde la capacidad residual y deformación de fractura es prácticamente la misma (7.82% vs 7.63% en deformación de fractura y 37.93 ton vs 37.25 ton en capacidad residual respectivamente). En comparación con los modelos considerados, vemos que la curva capacidad-deformación entre los ensayos y ambos modelos (propuesto y concentración de deformaciones) se comporta de manera similar hasta una deformación aproximada del 2.5%. A partir de ésta deformación los ensayos T19 (560) y T11 (1000) aumentan su rigidez en relación a los modelos. A su vez, las curvas con concentración de tensiones SLM_10 (1000) y SLM_10 (560) se tornan más rígidas que la curva obtenida con el modelo propuesto (W35_10) fallando antes que está (7.5% para modelos SLM_10 (560) y SLM_10 (1000), y 7.86% para W35_10). Sin embargo las tres curvas se fracturan para una capacidad residual prácticamente igual (34.71 ton, 34.89 ton y 34.49 ton para SLM_10 (560), SLM_10 (1000) y W35_10 respectivamente). Finalmente ninguna de las curvas modeladas logra captar el comportamiento de los ensayos T19 y T11. Cabe mencionar que de acuerdo a lo mencionado en la referencia [6], y similar a lo ocurrido en el caso Marlow 35 ton con el ensayo T17, la curva ensayada T19 falla en los extremos del cable lo que implicaría en una rigidización de la curva producto de que algunos de los elementos cortados hayan recuperado carga en los extremos de este explicando la falla por sobre la curva no dañada.
- En relación a la curva ensayada T13 (40), observamos que para las primeras deformaciones se sitúa por debajo de las curvas modeladas SLM y W35_10, y tiende a rigidizarse superando a la curva obtenida con el modelo propuesto W35_10 para una deformación aproximada del 4%. Al llegar a una deformación aproximada del 5.8% la curva T13 se acopla a la curva de concentración de deformaciones SLM_10 (560) y SLM_10 (1000), las cuales tienen un comportamiento similar según lo mencionado en el punto anterior. La curva T13 continua con la misma rigidez que las curvas modeladas SLM_10 (560) y SLM_10 (1000) hasta la deformación 6.5%, en donde drásticamente cae para acoplarse a la curva obtenida con el modelo propuesto W35_10. Ambas curvas, T13 y W35_10, logran fallar a una misma deformación (7.86%) y para una capacidad residual similar (33.00 ton vs 34.49 ton respectivamente). En particular para este caso se puede

afirmar que la curva T13 tiende a estar influenciado en un principio por la concentración de deformaciones y luego el efecto de asimetría pasa a ser el factor de mayor influencia. En este caso el modelo propuesto W35_10 logra predecir con exactitud la deformación de falla y capacidad residual del ensayo T13.

- Tanto con el modelo de viga no lineal propuesto (W35_10) como con los modelos de concentración de deformaciones (SLM) se obtiene que para un 10% de daño en la sección del cable se logra una pérdida de la capacidad cercana a un 10% (-11.23%, -10.01%, -10.66% y -10.19% para los casos W35_10, SLM_10 (40), SLM_10 (560) y SLM_10 (1000) respectivamente).
- La curva con el modelo propuesto W35_10 y su área neta respectiva tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez. A diferencia que la curva obtenida con el modelo falla a una menor deformación y para una capacidad última menor respecto a la curva de área neta (7.86% vs 8.57% en deformación y 34.49 ton vs 38.58 ton en capacidad respectivamente).

Con respecto al caso Whitehill 700 ton se observa lo siguiente:

- La curva ensayada T3 (40) se correlaciona de forma satisfactoria con el modelo de concentración de deformaciones SLM_10 (40). Éste se ubica sobre la curva SLM_10 (40) a diferencia que llega a fracturarse antes y para una menor capacidad residual (7.3% vs 7.4% para deformación y 680.5 ton vs 717.59 ton en capacidad respectivamente). La curva W700_10 se sitúa por debajo de las curvas SLM_10 y T3, fallando a una deformación mayor que a las curvas mencionadas (7.84%) pero para una capacidad residual de 693.36 ton, similar a las demás curvas. Esto nos dice que para este caso la curva ensayada T3 tiende a estar influenciada por el efecto de concentración de deformaciones por sobre el efecto de la asimetría, efecto el cual está representado por la curva W700_10.
- Para el caso correspondiente a un 15% de daño se observa la situación contraria al caso anterior. En este caso la curva ensayada T5 (40) se acopla satisfactoriamente con la curva obtenida con el modelo propuesto W700_15 en lugar de la curva modelada con concentración de deformaciones SLM_15 (40) la cual se sitúa por sobre las curvas T5 y W700_15. Nótese que similar al caso W35_10 respecto a la curva T13, la curva T5 se rigidiza levemente a partir de una deformación del 3%, tendiendo a acoplarse a la curva modelada con concentración de deformaciones SLM_15 (40). Pero al

llegar a una deformación de 5% aproximado la curva T5 recae para acoplarse a la curva W700_15 logrando fallar a una deformación y capacidad similar (7.48% vs 7.68% en deformación y 620.98 ton vs 626.45 ton en capacidad respectivamente). Por lo que para este caso la curva T5 tiende a estar influenciada principalmente por el efecto de la asimetría en lugar del efecto de concentración de deformaciones.

- Para un daño de 10% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 10% para el modelo propuesto W700_10 y el modelo SLM_10 (40) (-12.96% y -9.92% respectivamente). No así para el ensayo T3 en donde la pérdida es de un -3.7%.
- Para un daño de 15% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 15% para el modelo SLM_15 (40) y la curva ensayada T5 (-14.04% y -12.13% respectivamente). No así para la curva W700_15 en donde la pérdida es de un -21.36%. Recordar que las pérdidas de capacidad para cada caso se calculan respecto a la curva no dañada ensayada, para este caso la curva T8.
- Las curvas obtenidas con el modelo propuesto W700_10 y W700_15 tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez respecto de la curva de área neta correspondiente. A diferencia que las curvas obtenidas con el modelo propuesto fallan a una menor deformación y a una menor capacidad última respecto a la curva de área neta (7.84% vs 8.17% en deformación y 693.36 ton vs 729.68 ton en capacidad respectivamente para el caso W700_10. Para el caso W700_15 se obtiene 7.68% vs 8.17% en deformación y 626.45 ton vs 675.63 ton en capacidad respectivamente).

5.2.2.3 Resultados y comentarios para configuración BEXCO 35 ton y 700 ton

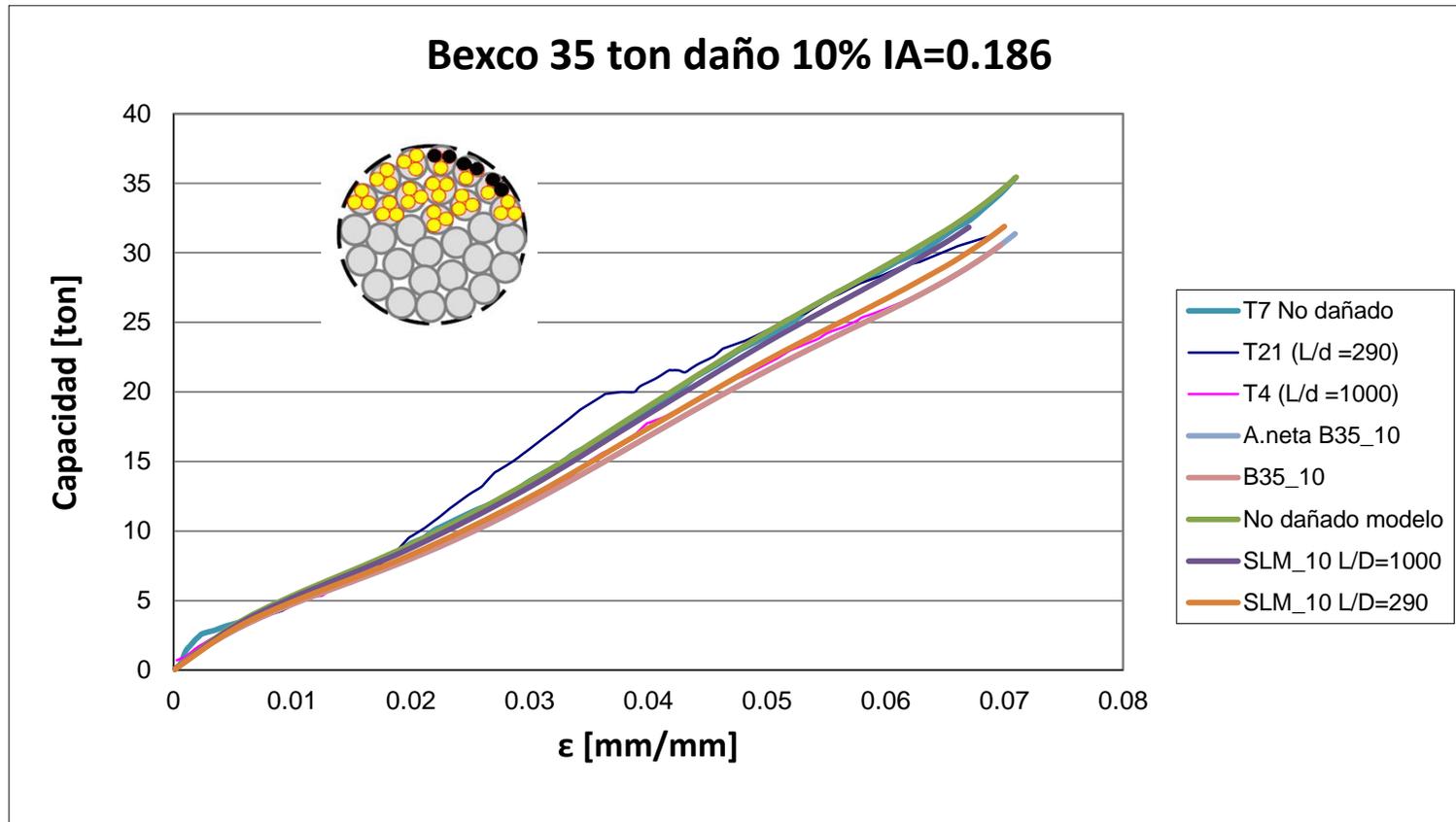


Figura 5.2.2-7: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Bexco 35 ton 10% daño

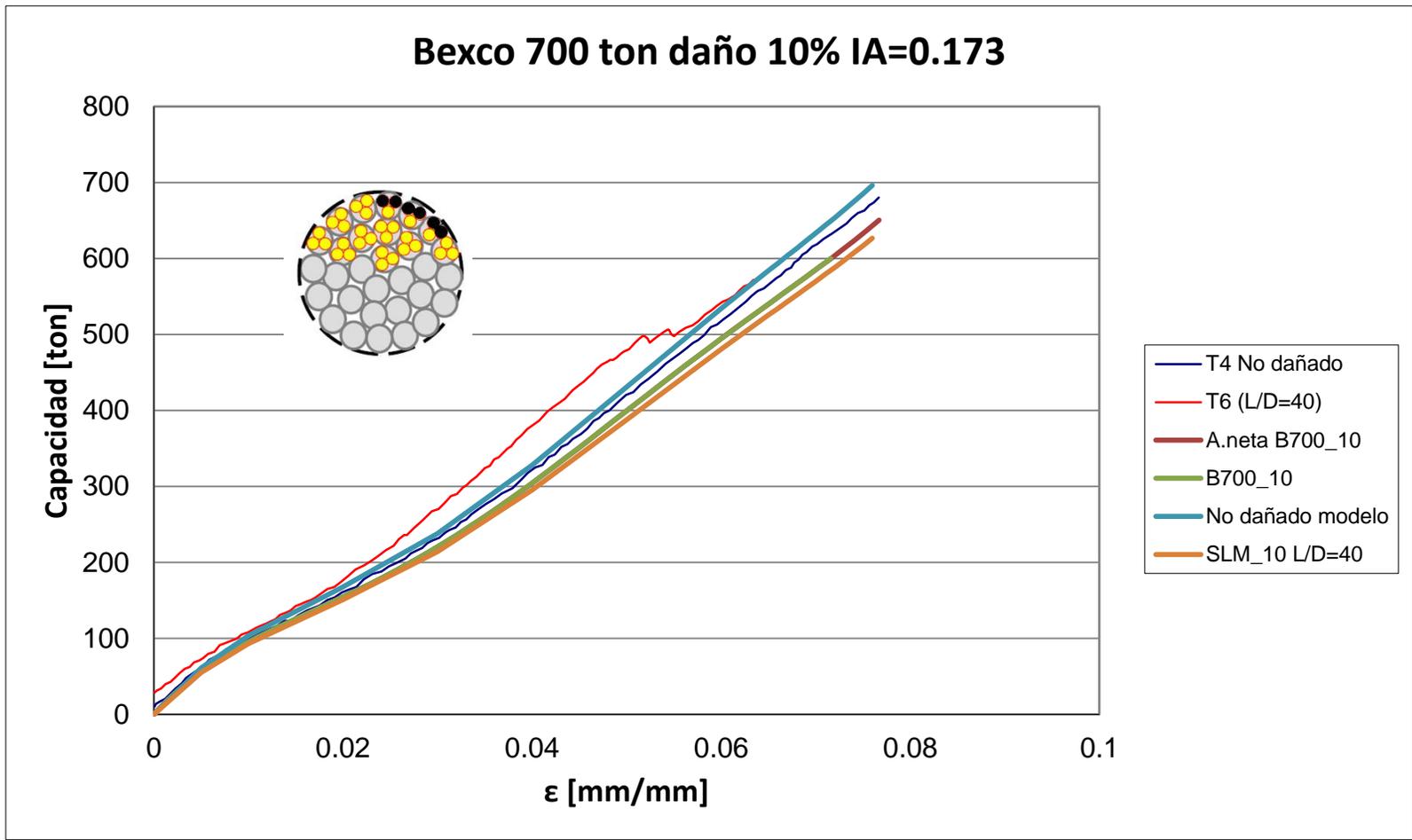


Figura 5.2.2-8: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Bexco 700 ton 10% daño

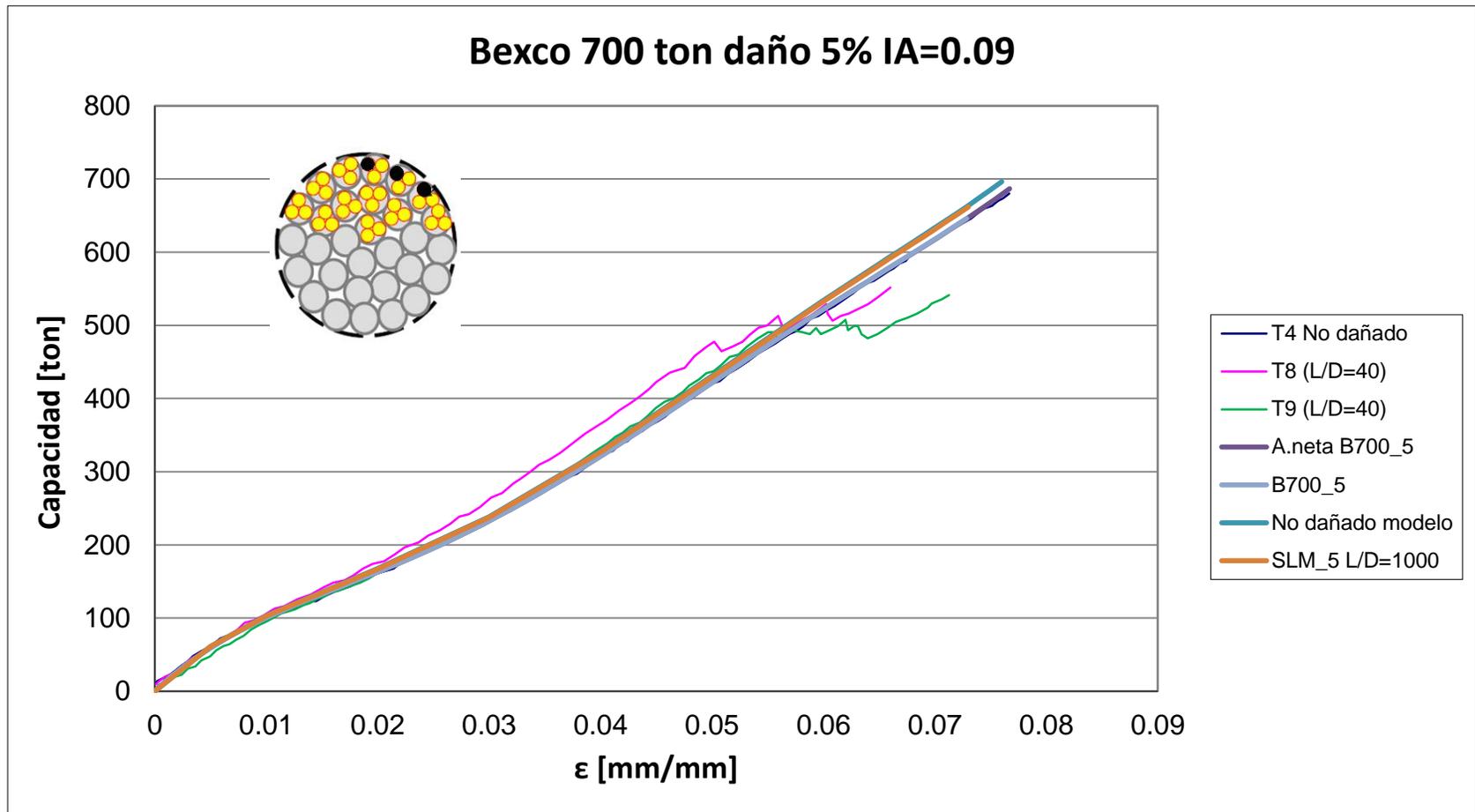


Figura 5.2.2-9: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable Bexco 700 ton 5% daño

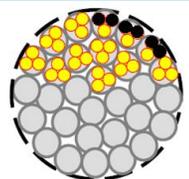
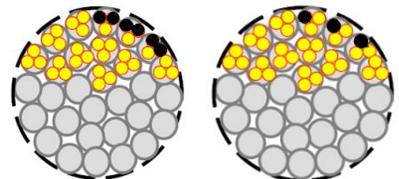
Cable Bexco									
Ensayo	Origen	Cable	ϵ fractura [mm/mm]	Capacidad [ton]	Daño [%]	Perdida cap. [%]	Perdida def. [%]	Sección	
35 ton	Ensayo	T7	0.0709	35.39	0	0	0.00		
		T4 (1000)	0.0623	26.80	10	-24.28	-12.13		
		T21 (290)	0.0693	31.34	10	-11.46	-2.26		
	Modelo	B35_10	0.0697	30.58	10	-13.60	-1.67		
		Área neta B35_10	0.0709	31.37	10	-11.37	0.00		
	Simulación Ction.def	SLM_10 (290)	0.0700	31.90	10	-9.87	-1.27		
		SLM_10 (1000)	0.0670	31.84	10	-10.04	-5.50		IA = 0.186
700 ton	Ensayo	T4	0.0767	680.34	0	0.00	0.00	Daño 10%	Daño 5%
		T6 (40)	0.0643	577.25	10	-15.15	-16.17		
		T8 (40)	0.066	551.61	5	-18.92	-13.95		
		T9 (40)	0.0713	541.12	5	-20.46	-7.04		
	Modelo	B700_10	0.0716	600.00	10	-11.80	-6.67		
		Área neta B700_10	0.0767	650.50	10	-4.39	0.00		
		B700_5	0.0729	646.20	5	-5.02	-5.00		
		Área neta B700_5	0.0767	686.60	5	0.92	0.00		
	Simulación Ction.def	SLM_5 (1000)	0.0730	661.70	5	-2.74	-4.82		
		SLM_10 (40)	0.0760	626.50	10	-7.91	-0.91		IA = 0.173

Tabla 5.2.2-3: Capacidades y deformaciones para cable Bexco

De lo anterior, referido al caso Bexco 35 ton, se observa lo siguiente:

- La curva ensayada T21 (290) tiene rigidez similar a las curvas obtenidas con el modelo propuesto B35_10 y con el modelo de concentración de deformaciones SLM_10 para las primeras deformaciones evaluadas. Para una deformación aproximada del 2% la curva T21 difiere de las curvas modeladas y tiende a rigidizarse hasta una deformación del 4%. A partir de esta deformación la curva T21 pierde rigidez de forma paulatina tendiendo hacia la curva SLM_10 (290). Finalmente se acopla para las últimas deformaciones con la curva SLM_10 (290) fallando para una deformación y capacidad similar (6.93% vs 7.0% en deformación y 31.34 ton vs 31.90 ton en capacidad para las curvas T21 y SLM_10 (290) respectivamente). Lo anterior hace pensar que la curva T21 está influenciada principalmente por el efecto de concentración de deformaciones. Sin embargo la baja paulatina de rigidez y el acople de la curva T21 solo para las últimas deformaciones con la curva SLM_10 (290) hace especular que la curva T21 seguiría perdiendo rigidez para luego acoplarse a la curva B35_10 y de esta manera estar influenciada por el efecto de asimetría. Es posible que la curva T21 no represente el comportamiento total del cable y fallara antes de lo habitual (lo cual no es posible justificar por la falta de ensayos disponibles) producto de condiciones externas al ensayo tales como condición real de apoyo que se le dio al cable, daño adicional no observado debido a una mala manipulación en el montaje del cable para el ensayo y/o daño durante el transporte de esta. Algunos factores internos ya mencionados al principio de este capítulo también pueden estar involucrados en el comportamiento del cable, los cuales los modelos utilizados no los contemplan.
- Para la curva T4 (1000) se observa nuevamente un comportamiento similar con las demás curvas modeladas para las primeras deformaciones. Pero para el rango de deformaciones 2.5%-4.5% la curva T4 se acopla perfectamente con la curva SLM_10 (290). Luego disminuye su rigidez para acoplarse a la curva B35_10 pero fallando para una menor deformación y capacidad (6.23% vs 6.97% en deformación y 26.80 ton vs 30.58 ton en capacidad respectivamente), pudiendo existir factores externos y/o internos ya mencionados en el punto anterior que atribuyen este comportamiento de esta falla más temprana. Se aprecia entonces que la curva T4 contiene los dos efectos analizados en el desarrollo de la curva. Refleja para las primeras deformaciones el efecto de la concentración de deformaciones para luego tender a la curva influenciada por el efecto de asimetría B35_10.

- Para un daño de 10% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 10% para todos los casos exceptuando al ensayo T4 con una pérdida de -24.28%. Las pérdidas de capacidad para las curvas B35_10, SLM_10 (290), SLM_10 (1000) y T21 (290) son respectivamente -13.6%, -9.87%, -10.04% y -11.46%. Recordar que las pérdidas de capacidad para cada caso se calculan respecto a la curva no dañada ensayada, para este caso la curva T7.
- La curva con el modelo propuesto B35_10 y su área neta respectiva tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez. A diferencia que la curva obtenida con el modelo falla a una menor deformación y para una capacidad última menor respecto a la curva de área neta (6.97% vs 7.09% en deformación y 30.58 ton vs 31.37 ton en capacidad respectivamente).

Referido al caso Bexco 700 ton se desprende que:

- Para el caso con un daño de 10% del área seccional observamos que la curva ensayada T6 (40) desarrolla una curva capacidad-deformación con rigidez similar a las curvas B700_10 y SLM_10 (40) hasta una deformación del 2%. Luego la curva T6 se rigidiza llegando a estar por sobre las curvas no dañadas. Para una deformación de 5.5% la curva decae hasta la curva no dañada T4 fallando para una deformación y capacidad de 6.43% y 577.25 ton respectivamente. Para este caso ningún modelo propuesto logra predecir el comportamiento del ensayo T6, el cual lo más probable que este influenciado por otros tipos de factores ya mencionados adicionales o no a los efectos de concentración de deformaciones y/o asimetría.
- Para el caso con un 5% de daño seccional, la curva asociada al ensayo T9 (40) tiene un comportamiento similar a la curva obtenida con el modelo de concentración de deformaciones SLM_5 (1000) hasta una deformación aproximada del 5.5%. Luego tiende a decrecer abruptamente para alcanzar la falla a un 7.13% y para una capacidad de 541.12 ton. Esta abrupta recaída de la curva T9 se debe a la ruptura de componentes del cable de manera secuencial durante el ensayo, en donde finalmente algunos de los componentes fracturados tienden a recuperar carga aumentando la rigidez del cable (notar pick de crecimiento al final de curva T9). El desarrollo de la curva ensayada T8 (40) es muy similar a la curva T9 a diferencia que esta se rigidiza al alcanzar una deformación del 1.5% situándose por sobre la curva T9. Sin embargo, para una misma deformación aproximada del 5.5% la curva T8 decae drásticamente debido a la fractura de componentes del

cable de manera secuencial fallando a una menor deformación respecto a la curva T9 (6.6%) pero para una capacidad similar (551.61 ton). Luego algunos de los componentes fracturados recupera capacidad de carga aumentando la rigidez del cable (ver pick al final de curva T8), tendiendo a la curva de área neta. Por lo que la curva correspondiente a concentración de deformaciones SLM_5 (1000) logra predecir de mejor manera la curva ensayada T9 en comparación a la curva con el modelo propuesto B700_5 hasta una deformación de un 5.5%.

- Para un daño de 10% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 10% para el modelo propuesto B700_10 y el modelo SLM_10 (40) (-11.80% y -7.91% respectivamente).
- Para un daño de 5% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 5% para el modelo propuesto B700_5 y el modelo SLM_5 (1000) (-5.02% y -2.74% respectivamente). Para los ensayos T8 y T9 esta pérdida difiere considerablemente en relación al porcentaje de daño de la sección llegando a valores de -18.92% y -20.46% respectivamente. Recordar que las pérdidas de capacidad para cada caso se calculan respecto a la curva no dañada ensayada, para este caso la curva T4.
- Las curvas obtenidas con el modelo propuesto B700_10 y B700_5 tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez respecto de la curva de área neta correspondiente. A diferencia que las curvas obtenidas con el modelo propuesto fallan a una menor deformación y a una menor capacidad última respecto a la curva de área neta (7.16% vs 7.67% en deformación y 600.00 ton vs 650.50 ton en capacidad respectivamente para el caso B700_10. Para el caso B700_5 se obtiene 7.29% vs 7.67% en deformación y 646.2 ton vs 686.6 ton en capacidad respectivamente).

5.2.2.1 Resultados y comentarios para configuración CSL 700 ton

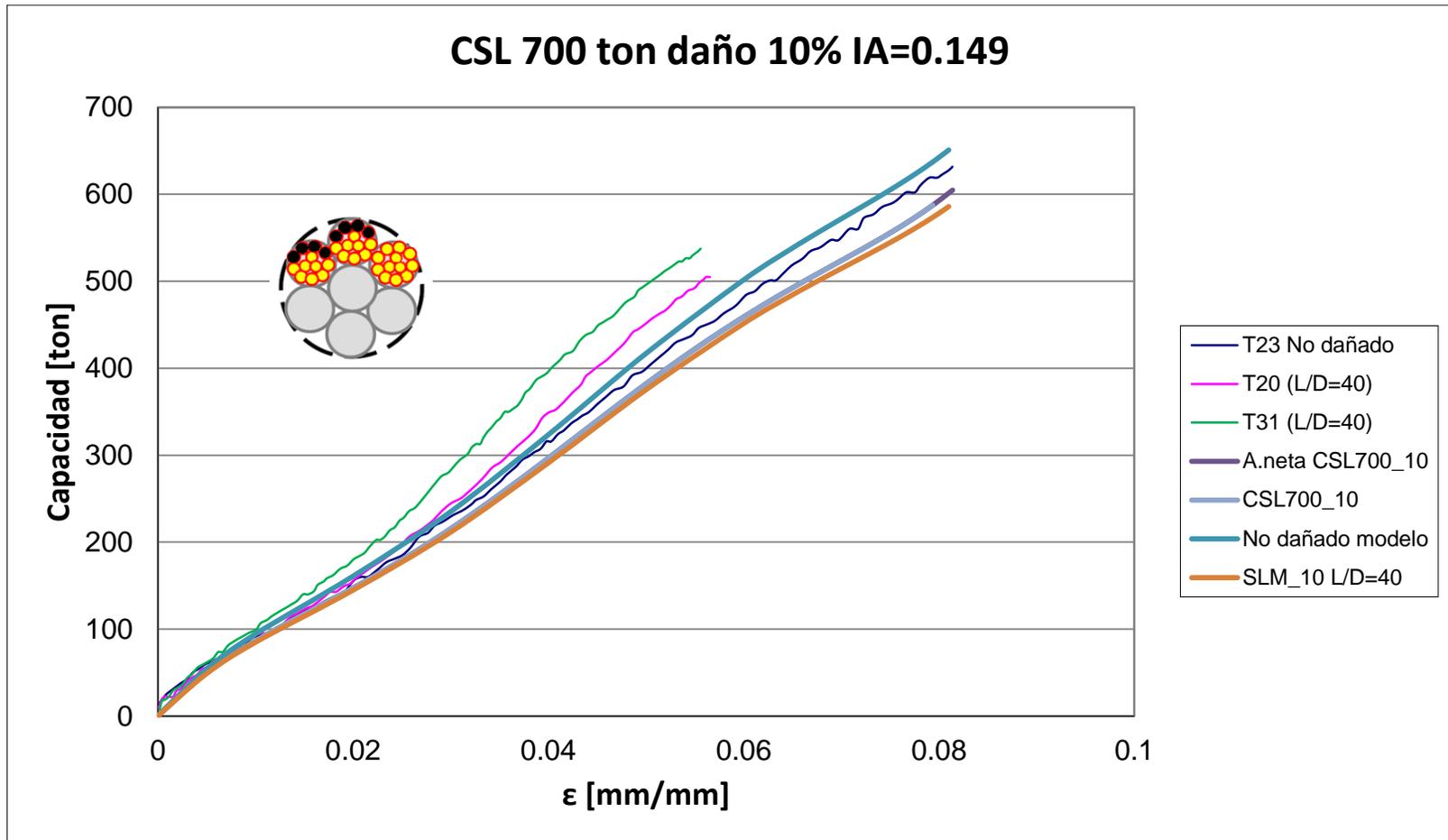


Figura 5.2.2-10: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable CSL 700 ton 10% daño

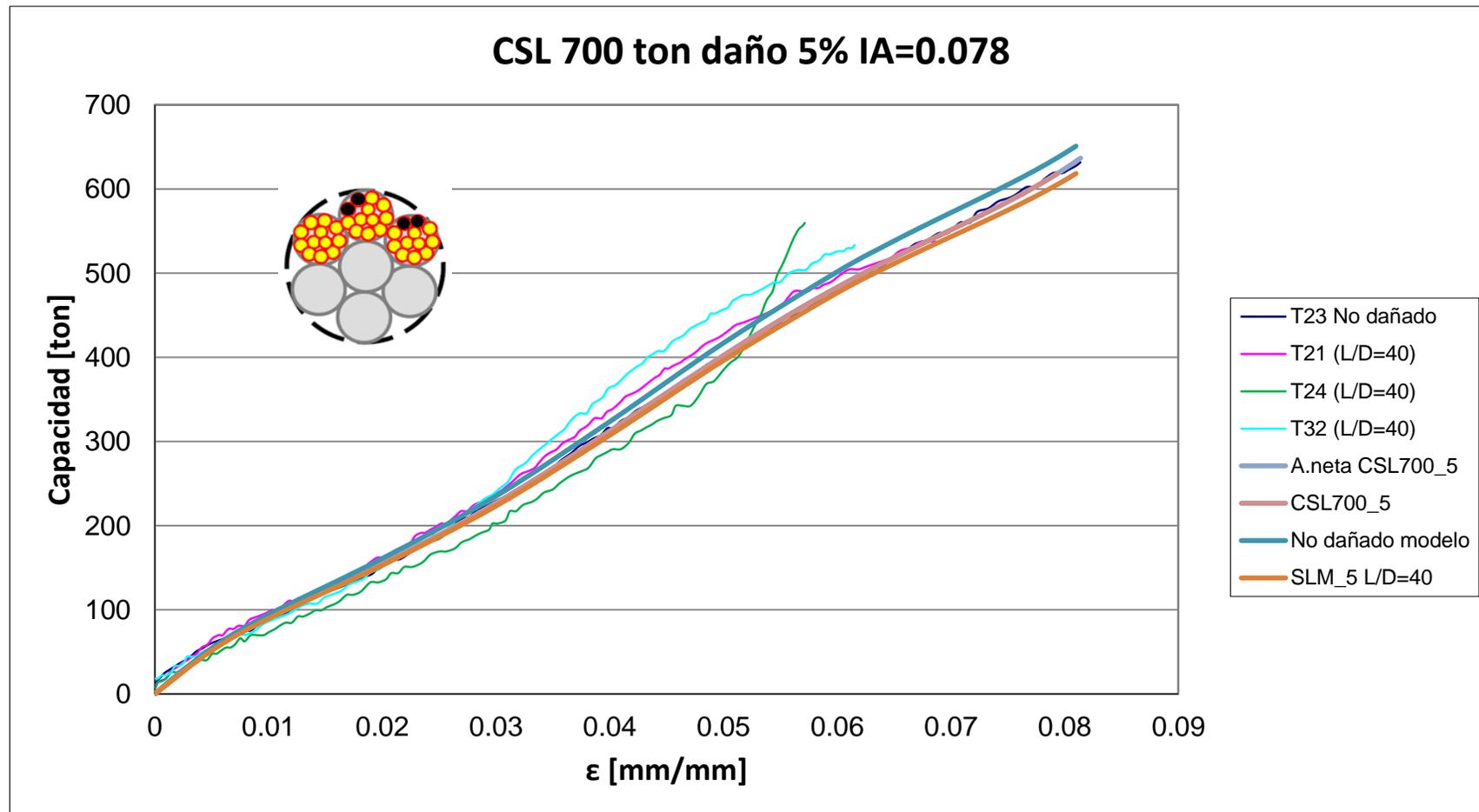


Figura 5.2.2-11: Curvas capacidad-deformación caso multinivel cable CSL 700 ton 5% daño

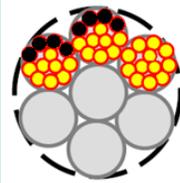
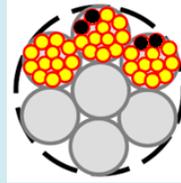
Cable CSL									
Ensayo	Origen	Cable	ϵ fractura [mm/mm]	Capacidad [ton]	Daño [%]	Perdida cap. [%]	Perdida def. [%]	Sección	
700 ton	Ensayo	T23	0.0814	631.58	0	0	0	Daño 10%	Daño 5%
		T20 (40)	0.0565	504.76	10	-20.08	-30.59		
		T31 (40)	0.0556	537.42	10	-14.91	-31.70		
		T21 (40)	0.0687	537.42	5	-14.91	-15.60		
		T24 (40)	0.0572	559.51	5	-11.41	-29.73		
		T32 (40)	0.0615	533.33	5	-15.56	-24.45		
	Modelo	CSL700_10	0.0794	587.36	10	-7.00	-2.50		
		Área neta CSL700_10	0.0814	604.75	10	-4.25	0.00		
		CSL700_5	0.0794	618.27	5	-2.11	-2.50		
		Área neta CSL700_5	0.0814	636.58	5	0.79	0.00		
Simulación Ction.def	SLM_5 (40)	0.0810	618.31	5	-2.10	-0.49	IA = 0.149	IA = 0.078	
	SLM_10 (40)	0.0810	585.77	10	-7.25	-0.49			

Tabla 5.2.2-4: Capacidades y deformaciones para cable CSL

De acuerdo a lo mostrado para el caso CSL 700 ton se observa:

- Para el caso con un daño de 10% en la sección transversal del cable, se observa, al igual que para el caso B700_10 y B700_5, que las curvas ensayadas T20 (40) y T31 (40) mantienen un comportamiento similar a las curvas modeladas CSL700_10 y SLM_10 (40) para las primeras deformaciones, pero a partir de una deformación de del 1% y 2% respectivamente las curvas ensayadas se rigidizan situándose por sobre las curvas modeladas. Finalmente logran llegar a la falla, inclusive sobre la curva no dañada, para deformaciones y capacidades considerablemente menores a las obtenidas con los modelos CSL700_10 y SLM_10 (40) (5.65% y 5.56% en deformación para los casos T20 y T31 respectivamente vs 7.94% y 8.1% para los casos CSL700_10 y SLM_10 respectivamente. En cuanto a capacidad se obtiene 504.76 ton y 537.42 para los casos T20 y T31 respectivamente vs 587.36 ton y 585.77 ton para los casos CSL700_10 y SLM_10 respectivamente). Ninguno de los modelos propuesto interpreta los resultados ensayados. Nótese sin embargo la buena correlación entre el modelo CSL700_10 y SLM_10 (40) tanto en rigidez como en capacidad última y deformación de fractura.
- En cuanto al caso con un 5% de daño seccional ocurre algo similar al punto anterior. La curva ensayada T24 (40) permanece por debajo de las curvas modeladas CSL700_5 y SLM_5 (40) hasta una deformación del 5.5% en donde se rigidiza fallando por sobre la curva no dañada a una deformación de un 5.72% para una capacidad de 559.51 ton. Referido a los ensayos T21 y T32 vemos un comportamiento similar a los ensayos T20 y T31 correspondiente al caso con un daño seccional de 10%. Las curvas T21 y T32 se desarrollan junto a las curvas modeladas CSL700_5 y SLM_5 (40), pero para una deformación del 3% ambas se rigidizan situándose por sobre la curva no dañada. Sin embargo, a diferencia del caso para un daño del 10%, las curvas T21 y T32 comienzan a decaer, en donde la curva T32 termina fallando sobre la curva dañada y la curva T21 decae hasta acoplarse a las curva CSL700_5 pero fallando a una deformación y capacidad menor a ésta (6.87% vs 7.94% en deformación y 537.42 ton vs 618.27 ton para las curvas T21 y CSL700_5 respectivamente. La falla temprana del ensayo T21 podría explicarse a los mismos factores externos y/o internos señalados en los casos anteriores.
- Para un daño de 10% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 10% para el modelo propuesto CSL700_10 y el modelo SLM_10 (40) (-7.0% y -7.25% respectivamente). Para las curvas

ensayadas T20 y T31 las pérdidas llegan a valores de -20.08% y -14.91% respectivamente.

- Para un daño de 5% de área seccional del cable se obtienen pérdidas de capacidad entorno a un 5% para el modelo propuesto CSL700_5 y el modelo SLM_5 (40) (-2.11% y -2.10% respectivamente). Para los ensayos T21, T24 y T32 la pérdida difiere considerablemente en relación al porcentaje de daño de la sección llegando a valores de -14.91%, -11.41% y -15.56% respectivamente. Recordar que las pérdidas de capacidad para cada caso se calculan respecto a la curva no dañada ensayada, para este caso la curva T23.
- Las curvas obtenidas con el modelo propuesto CSL700_10 y CSL700_5 tienen el mismo comportamiento en cuanto a rigidez respecto de la curva de área neta correspondiente. A diferencia que las curvas obtenidas con el modelo propuesto fallan a una menor deformación y a una menor capacidad última respecto a la curva de área neta (7.94% vs 8.14% en deformación y 587.36 ton vs 604.75 ton en capacidad respectivamente para el caso CSL700_10. Para el caso CSL700_5 se obtiene 7.94% vs 8.14% en deformación y 618.27 ton vs 636.58 ton en capacidad respectivamente).

5.2.3 Análisis complementarios para configuraciones multinivel

Con el propósito de complementar las observaciones realizadas anteriormente respecto a las configuraciones multinivel, se presentan gráficos que incorporan los resultados obtenidos para que la comparación entre estos se aprecie de mejor manera.

Una de las relaciones que interesa analizar es la pérdida de capacidad que se tiene en el cable asociado al daño del mismo. La “*API RP 2SM*” [18] asegura que ésta relación varía linealmente en la razón 1:1, vale decir, que para un cierto porcentaje de sección dañada se obtendrá una pérdida de capacidad del cable dañado de igual magnitud (i.e igual porcentaje). La figura que se muestra a continuación incorpora la relación Daño vs pérdida de capacidad para cada ensayo, modelo propuesto (VGNL) y modelo con concentración de deformaciones propuesto por Beltrán y Williamson [16], [17] considerados anteriormente (SLM) (SLM), junto con la relación lineal 1:1 representada por el área neta. Todos los datos se encuentran a su vez en las tablas incorporadas para cada cable en el punto 5.2.2.

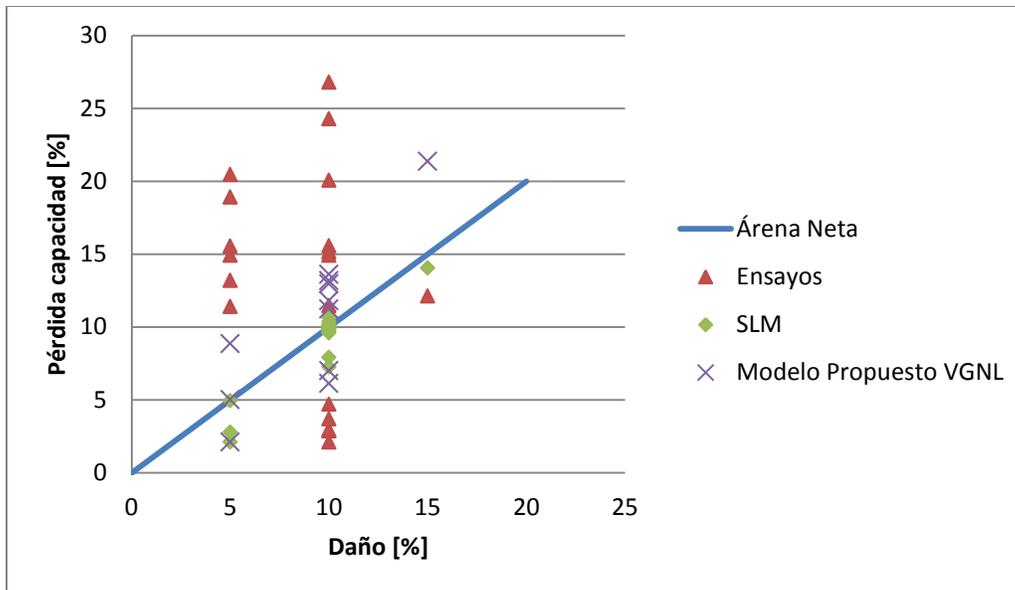


Figura 5.2.3-1: Relación Daño [%] vs Pérdida capacidad [%] para modelos y ensayos de configuración multinivel

De la figura anterior vemos que por lo general los resultados obtenidos por el modelo de concentración de deformaciones se encuentran por debajo de la curva de área neta o bien sobre ésta. Mientras que los resultados obtenidos con el modelo propuesto se encuentran por lo general por sobre la curva de área neta. Por lo que en términos prácticos, el considerar los resultados provenientes del modelo propuesto como parámetro de prediseño en capacidad de un cable dañado de forma asimétrica es una estimación conservadora. Las pérdidas de capacidad obtenidas de los ensayos difieren considerablemente de los resultados obtenidos con los modelos, en donde para la mayoría de los ensayos las pérdidas de capacidad se sitúan por sobre la curva de área neta llegando a valores de un 27% de pérdida de capacidad para un daño del 10% del cable. Cabe recordar, como se menciona a su vez en la misma referencia de los ensayos realizados [6], que estos resultados estén influenciados por diversos factores a la vez, tanto factores internos como externos mencionados en puntos anteriores. Uno de estos factores corresponde a la falla de algunas curvas ensayadas en los extremos del cable y no donde fueron dañados. Lo que significa en una rigidización de la curva fallando a una capacidad y deformación menor en relación a si hubieran fallado en donde fueron dañados, explicando los elevados valores de pérdida de capacidad en relación a los resultados obtenidos con los modelos propuestos.

Otra observación en cuanto a la utilidad práctica que se puede desprender de los resultados es la zona probabilística de resultados esperados para una configuración dada conociendo su curva con concentración de deformaciones y su

curva con efecto asimétrico. Al obtener un aumento de rigidez en la curva producto de la concentración de deformaciones se produce una variación tanto en deformación como en capacidad respecto a la curva con efecto asimétrico (modelo propuesto). Esta zona intermedia, delimitada por la curva de concentración de deformaciones (cota superior) y curva con efecto asimétrico (cota inferior), estaría representando la zona esperable de resultados en cuanto a rigidez, deformación de fractura y capacidad del cable. Veamos por ejemplo el caso Whitehill 700 ton para un 10% de daño. La curva obtenida con el modelo propuesto (efecto asimetría) y la curva con concentración de deformaciones se presenta a continuación junto con la zona esperable de resultados (zona roja achurada):

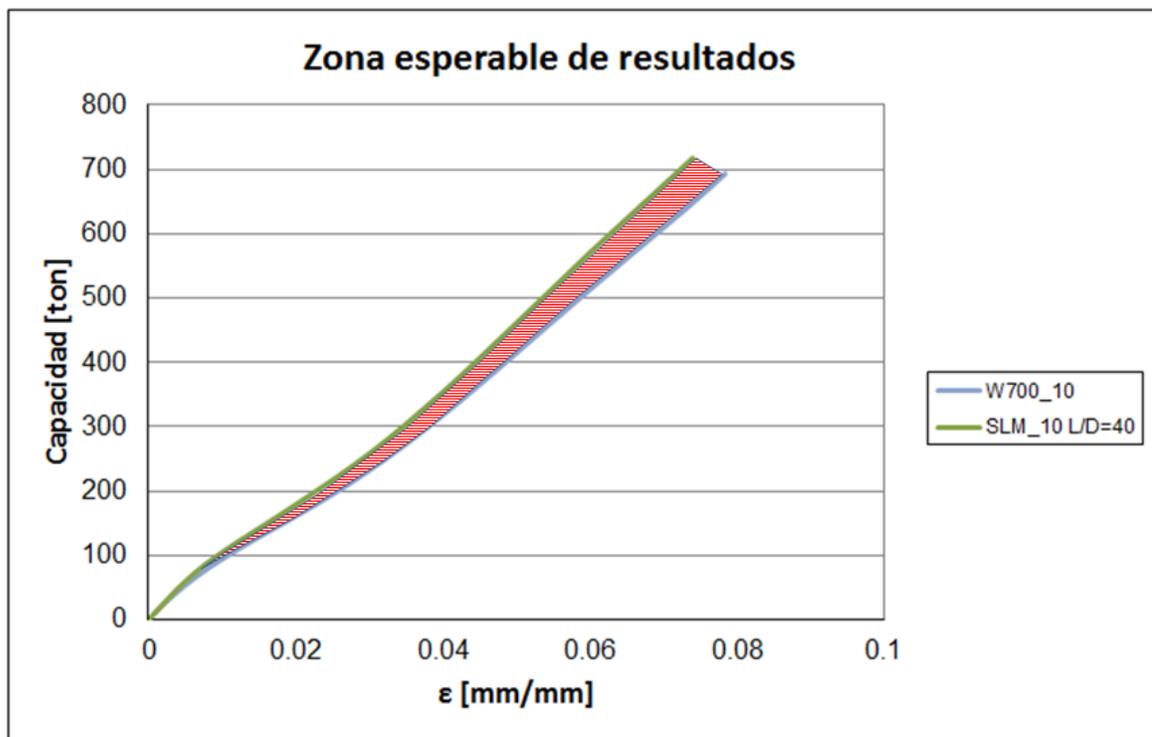


Figura 5.2.3-2: Zona esperable de resultados en función de curva con concentración de deformaciones y curva con efecto de asimetría

Podemos apreciar que la curva con efecto de asimetría representa una cota inferior para los resultados esperados en cuanto a rigidez. Mientras que la curva con concentración de deformaciones está representando la cota superior respecto a rigidez. En cuanto a capacidades últimas podemos observar que la curva con efecto asimétrico (W700_10) es una cota superior en cuanto a deformación de

fractura esperable, mientras que la curva con concentración de deformaciones (SLM_10) representa una cota superior en cuanto a capacidad residual esperable.

Nuevamente en los resultados con configuración multinivel, al igual que en las configuraciones multicapa, las curvas obtenidas con el modelo propuesto se localizan sobre la curva de área neta pero terminan fallando antes y para una menor capacidad residual. Por lo que el efecto de asimetría influye en los parámetros últimos del cable pero no en su rigidez. Por lo que el aumento de rigidez de las curvas debe explicarse por medio de otros factores tales como la concentración de factores, entre otros.

Otra relación que es importante analizar es la influencia de la asimetría sobre la pérdida de capacidad y deformación de los cables analizados. Para el caso multicapa se observó que a mayor asimetría (IA), mayor era la pérdida de capacidad y deformación obtenidas. Estas diferencias eran aún mayores si considerábamos el diámetro como factor influyente. Para el caso multinivel vemos que se obtienen resultados variados. Las figuras que se muestran a continuación relacionan la pérdida de capacidad y deformación con el grado de asimetría de los cables analizados para un daño de 5% y 10%, indicando a su vez el diámetro correspondiente a cada cable.

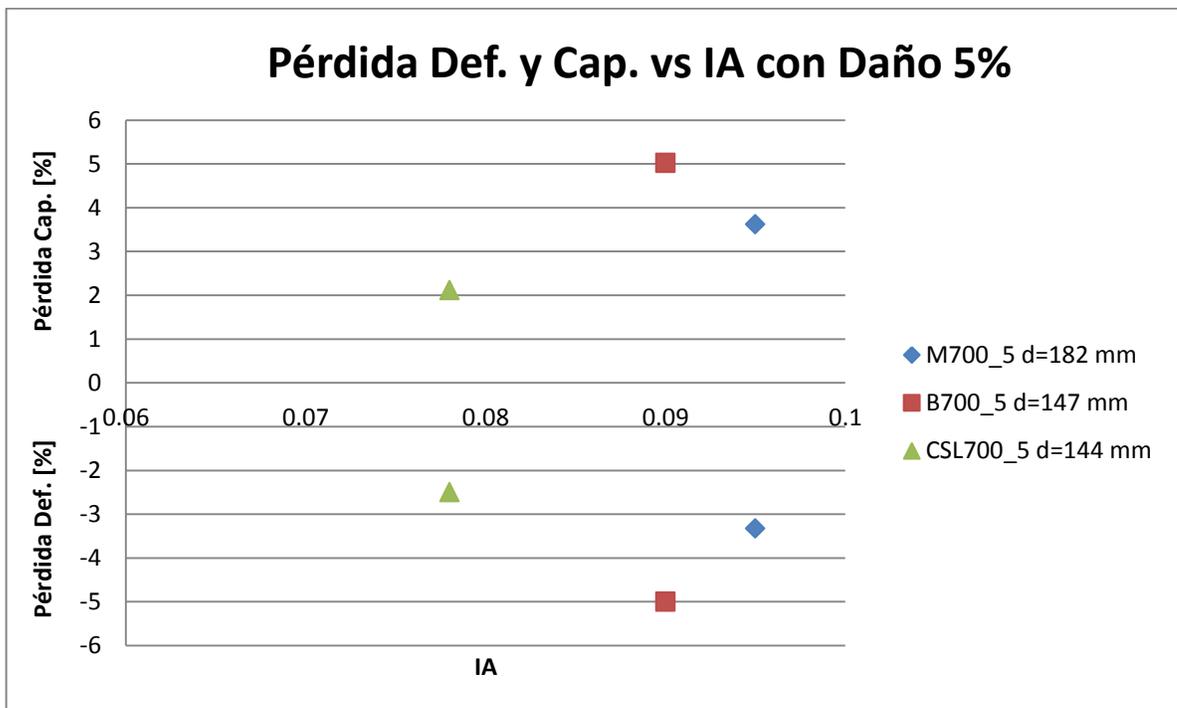


Figura 5.2.3-3: Pérdida de Deformación y Capacidad vs IA para cable multinivel con 5% de daño

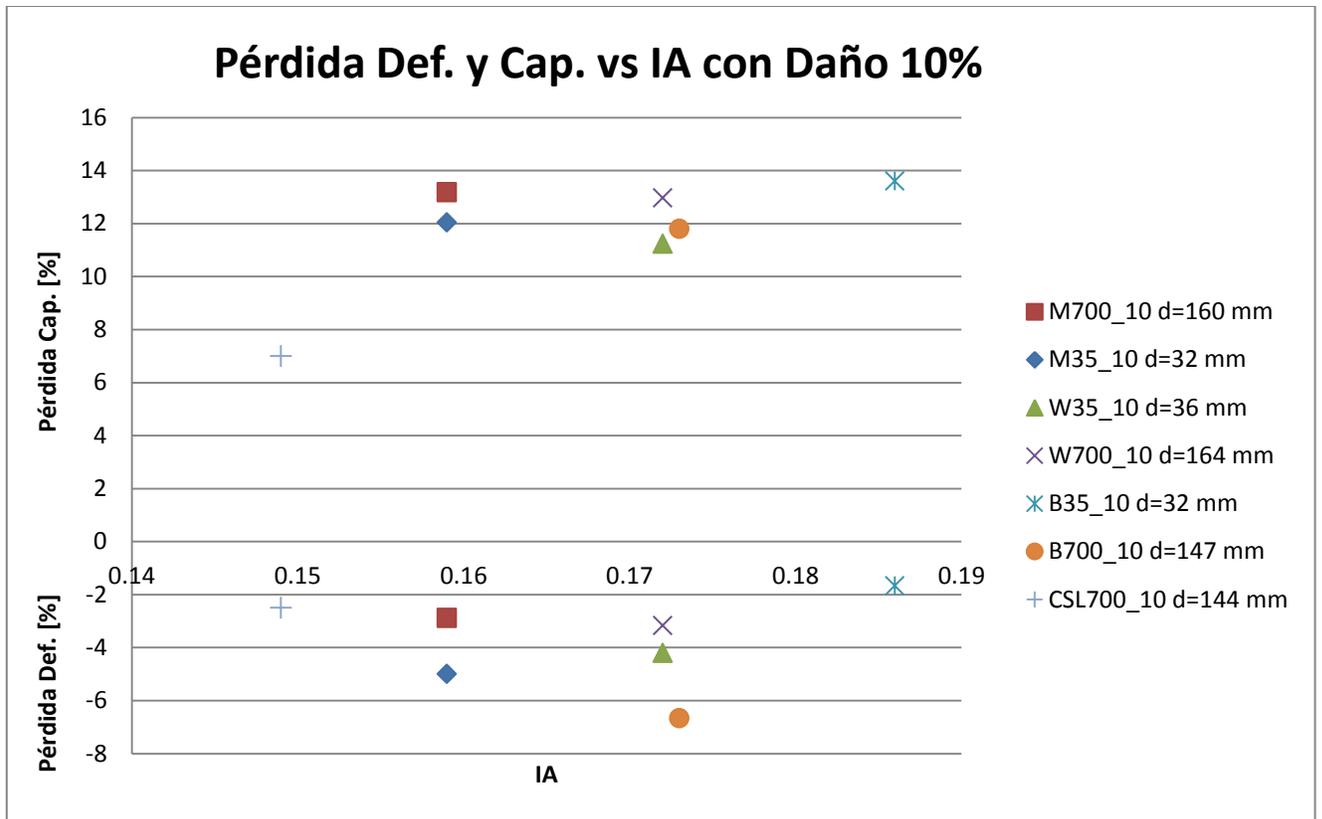


Figura 5.2.3-4: Pérdida de Deformación y Capacidad vs IA para cable multinivel con 10% de daño

De la figura correspondiente a un 5% de daño, al comparar los resultados referidos a los casos CSL700_5 y B700_5, se observa que al igual que el caso multicapa a mayor grado de asimetría y para un mayor diámetro la pérdida de capacidad y deformación es mayor. Esta relación no cumple al comparar el caso B700_5 con el caso M700_5, en el cuál este último tiene una menor pérdida de capacidad y deformación en relación al caso B700_5 aun teniendo un mayor grado de asimetría IA y diámetro. Sin embargo esto se puede explicar por las leyes constitutivas utilizadas. Si observamos las leyes constitutivas presentadas en el punto 4.2 vemos que la ley asociada al caso Marlow 35 (recordar que se utilizó la ley de este cable para el caso Marlow 700 debido a que no se contaba con algún ensayo no dañado para este último para su posible obtención de ley constitutiva) es considerablemente menos rígida que la ley constitutiva para el caso Bexco 700. Esto significa que para una misma variación de deformación se obtendrá una mayor variación en capacidad para el caso B700_5 respecto al caso M700_5, explicando la diferencia en cuestión.

En relación a los resultados correspondiente a un daño del 10% para los casos M700_10 y M35_10, los cuales tienen el mismo grado de asimetría y la misma ley constitutiva, observamos que se obtiene una pérdida de capacidad mayor y una pérdida menor de deformación para el caso M700_10 en comparación a los resultados obtenidos de la curva M35_10. La única diferencia entre estos casos es su diámetro 160 mm y 32 mm. Sin embargo, a pesar de la notable diferencia de diámetro entre un caso y otro, las diferencias en pérdidas son de solo un 2% aproximadamente. Para los casos W35_10 y W700_10, en donde poseen el mismo índice de asimetría y prácticamente la misma ley constitutiva y sólo difieren en el diámetro (36 mm vs 164 mm respectivamente), el caso W700_10 tiene una mayor pérdida de capacidad variando por un 2% respecto a la pérdida de capacidad del caso W35_10. Sin embargo para el caso W35_10 se tiene una pérdida de deformación mayor que para el caso W700_10, con una diferencia de un 1.5% aproximadamente. Por lo que el efecto de tamaño para este caso no es muy influyente en comparación a los resultados obtenidos en la configuración multicapa.

Si comparamos los casos B700_10 y CSL700_10, los cuales tienen un diámetro comparable (147 mm y 144 mm respectivamente) pero difieren en el grado de asimetría, se obtiene un comportamiento similar a lo obtenido en las configuraciones multicapa y en la relación B700_5 y CSL700_5, en donde se aprecian mayores pérdidas de capacidad y deformación para el caso con mayor grado de asimetría B700_10 ($IA=0.173$). Si observamos los casos W35_10 y B35_10, en donde tienen un diámetro similar y difieren en el grado de asimetría al igual que la relación anterior, podemos observar que para el caso con mayor grado de asimetría (B35_10) se tiene una pérdida de capacidad mayor (11% vs 13.5% aproximadamente), pero no así en capacidad de deformación en donde para el caso con mayor IA se tiene una menor pérdida de deformación en relación al de menor IA (W35_10).

CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se mencionan las conclusiones asociadas a los análisis correspondientes al modelo multicapa y multinivel.

Como observación global en cuanto a los análisis multicapa realizados en las configuraciones consideradas en el capítulo 4 obtenidas con el modelo propuesto se puede concluir principalmente que la asimetría, evaluada como un índice de asimetría IA, no tiene un efecto considerable en cuanto a capacidad residual y rigidez del cable en relación al área neta, pero genera mayores deformaciones en los componentes del cable alcanzando la falla para valores de deformación global del cable menores respecto al área neta.

Tanto la variación de pérdida de deformación como variación de pérdida de capacidad entre lo obtenido con el modelo de VGNL y el área neta, aumenta mientras mayor sea el tamaño (diámetro) del cable (Ver Figura 5.1-2 y 5.1-3). Si se suman ambos efectos, tamaño y grado de asimetría, vemos que dichas variaciones tienden a crecer linealmente para cables de menor diámetro o incluso exponencialmente para cables de mayor tamaño.

En cuanto a la relación entre el daño en cable y la pérdida de capacidad asociada, el modelo en la mayoría de los casos predice que para un cierto daño en el cable se tiene un porcentaje similar de pérdida de capacidad en él, independiente de la asimetría que éste considere.

Referido al análisis de robustez del modelo multicapa, se concluye que las iteraciones requeridas para la convergencia de resultados para cierta deformación d_i dada, aumentan mientras mayor sea el índice de simetría (IA), y/o menor sea el error de convergencia considerado (e_0), y/o mayor sea el tamaño del cable. Lo que genera a su vez, por ende, un aumento de tiempo en la resolución del modelo.

Considerando los ensayos realizados en la referencia [6], el modelo propuesto es capaz de predecir razonablemente el comportamiento para algunos de los casos analizados (ej. M35_10 vs T5), confirmando que efectivamente el efecto de asimetría puede ser en algunos casos el factor predominante. De la misma forma el modelo con concentración de deformaciones es capaz de predecir por sí mismo el comportamiento de algunos casos, evidenciado igualmente que existen casos en que la concentración de deformaciones es el factor predominante (ej. W700_10 vs T3). Sin embargo se tienen casos en el cual están presentes ambos efectos para una misma curva ensayada pero ninguno de los dos modelos logra predecir por separado el comportamiento de ésta (ej, T13 en análisis de cable W35). Por último, existen ensayos que se rigidizan rápidamente llegando a

estar incluso por sobre la curva no dañada, y que claramente no es posible predecir con ninguno de los dos modelos. La explicación a este fenómeno se aborda en la misma referencia de los ensayos [6]. En donde mencionan los siguientes factores probables:

- Concentración de deformaciones
- Desenrollamiento de subcables dañados
- Daño adyacente “Recoil damage”
- Espesor del “jacket” del cable
- Número de “pasos” del subcable

Nuevamente, al igual que en la configuración multicapa, para todas las curvas obtenidas con el modelo de viga no lineal (VGNL) aplicadas a configuraciones multinivel con subcables en paralelo se tiene que esta se ubica sobre la curva de área neta fallando a una menor capacidad residual y deformación última. Por lo que se concluye que la asimetría no tiene un rol importante en cuanto a rigidez del cable pero si en sus parámetros últimos como la capacidad y deformación de fractura.

Vemos que en general, de los resultados obtenidos con ambos modelos en las configuraciones multinivel, se tiene que para un cierto daño en la sección del cable la pérdida de capacidad es menor o igual a esta en porcentaje, concordando con lo mencionado en “API RP 2SM” [18] en donde el área neta corresponden a una relación 1:1 entre daño de la sección vs pérdida de capacidad. Sin embargo las pérdidas de capacidad asociada a los ensayos realizados por la referencia [6] tienden a ser considerablemente mayor al porcentaje de daño del cable (2-4 veces mayor). Dando a conocer que existen factores influyentes en el comportamiento del cable que no se están contemplando en los modelos propuestos considerados en el presente trabajo. En relación al efecto del tamaño del cable para las configuraciones multinivel, se logra percibir diferencias en pérdida de deformación y capacidad para dos cables con diferente diámetro pero del mismo tipo (ley constitutiva) e igual grado de asimetría IA. Sin embargo estas diferencias son más pequeñas en relación a las diferencias obtenidas para las configuraciones multicapa, existiendo otros factores (mencionados anteriormente) más predominantes que el efecto tamaño que influyen principalmente en la rigidez del cable en lugar de sus parámetros últimos.

6.1 Recomendaciones futuras

En base a los modelos propuestos, observaciones y conclusiones realizadas tanto a configuraciones multicapa y multinivel, nacen futuros objetivos con el fin complementar lo analizado en este trabajo. Principalmente destacan:

- Realizar ensayos considerando la distribución de daño propuesto en las configuraciones multicapa con diferentes materiales.
- Extender el modelo propuesto a un modelo que contemple varios efectos observados, en particular la asimetría y la concentración de deformaciones.
- Incorporar modelo de ley constitutiva dependiente del tiempo, reproduciendo el efecto del ciclado del cable realizado en la referencia [6].
- Determinar algún parámetro que represente la influencia del tamaño (diámetro) y el grado de asimetría (IA) en el comportamiento del cable y aplicarlo a las configuraciones analizadas en este trabajo.
- Finalmente, aplicar guías de retiro y reemplazo de cables presentes en la literatura sobre las configuraciones analizadas para estudiar la veracidad de sus hipótesis.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Foster, G.P. “Advantages of fiber rope over wire rope”. Journal of Industrial Textile, 2002; pp: 67-75.
- [2] McKenna, H.A., Hearle, J.S.W., O’Hear, N. “ The Handbook of fibre rope technology”. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd.; 2004, Chapter 9, “Inspection and Retirement”, 2004.
- [3] Chaplin, C.R. “The fatigue and degradation mechanisms of hoisting ropes”. In: Hoist and Haul Conference, Perth, Australia; 2005
- [4] Åhjem, V.R., Colby, C.A., Flory, J.F., Lee, M., Petruska, D.J. “Fiber Rope Damage Assessment and Acceptance Criteria”. Offshore Technology Conference (OTC), 2004.
- [5] “Damage Assessment of Fiber Ropes for Offshore Mooring”. Det Norske Veritas (DNV), 2005.
- [6] Ward, E.G., Ayers, R.R., Banfield. S.J., O’Hear, N. “The Residual Strength of Damage Polyester Rope”. Offshore Technology Conference (OTC), 2006.
- [7] Flory, J.F. “Assessing Strength Loss of Abraded and Damaged Fiber Rope”. Tension Technology International, 2008.
- [8] Zyl, M.V. “Discard criteria for mine winder ropes”. Safety in Mines Research Advisory Committee, 2000.
- [9] Kashyap, S.K., Laxminarayna, G., Tewari, S., Sinha, A. “Non-Destructive Testing of Steel Wire Ropes and Their Discard Criteria”. Central Mining Research Institute, 2005.
- [10] De Vico, E. “Efectos de la distribución asimétrica de daño en la sección transversal de un cable: Modelación numérica”, tesis de Ing.Civil, U de Chile, 2013.

- [11] LeClair, Raymond, A. "Axial response of multilayered strands with compliant layers", J.Eng.Mech 1991.
- [12] MacDougall, C., Bartlett, F. M. "Mechanical Model for Unbonded Seven-Wire Tendon with Single Broken Wire". Journal of Engineering Mechanics, Vol. 132, No 12, December 1, 2006, c ASCE, ISSN 0733 9399/2006/12 pp. 1345-1353.
- [13] Vargas, D. "Análisis de cables de sección transversal sin daño y con daño simétrico y asimétrico sujetos a cargas axisimétricas utilizando modelos tridimensionales de elementos finitos", tesis de Ing. Civil, U de Chile.2010,pp.56.
- [14] McKenna, H.A., Hearle, J.W.S., O'Hear, N. "Handbook of fibre rope technology". The Textile Institute,2004, pp.160.
- [15] Beltran, J.F., Herrera, R y Moffat, R. "Estudio de factibilidad de reemplazo de elementos de fortificación ferrosos". Reporte técnico para el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia SA, 2014.
- [16] Beltran, J.F. y Williamson, E.B. "Numerical simulation of damage localization in polyester mooring ropes". Journal of engineering mechanics, 2010.
- [17] Beltran, J.F. y Williamson, E.B. "Numerical procedure for the analysis of damage polyester ropes". Elsevier Ltd, 2011.
- [18] API RP 2SM. "Recommended practice for design, manufacture, installation, and maintenance of synthetic fiber ropes for offshore mooring". American Petroleum Institute, Noviembre 1999.
- [19] Beltran, J.F. y Vargas, D. "Effect of broken components distribution throughout rope cross-section on polyester rope response: Numerical approach". International journal of mechanical sciences, Agosto 2012.
- [20] Beltran, J.F. y De Vico, E. "Assessment of static rope behavior with asymmetric damage distribution". Engineering structures, Diciembre 2014.

ANEXO A: Curvas de capacidad para configuraciones multicapa

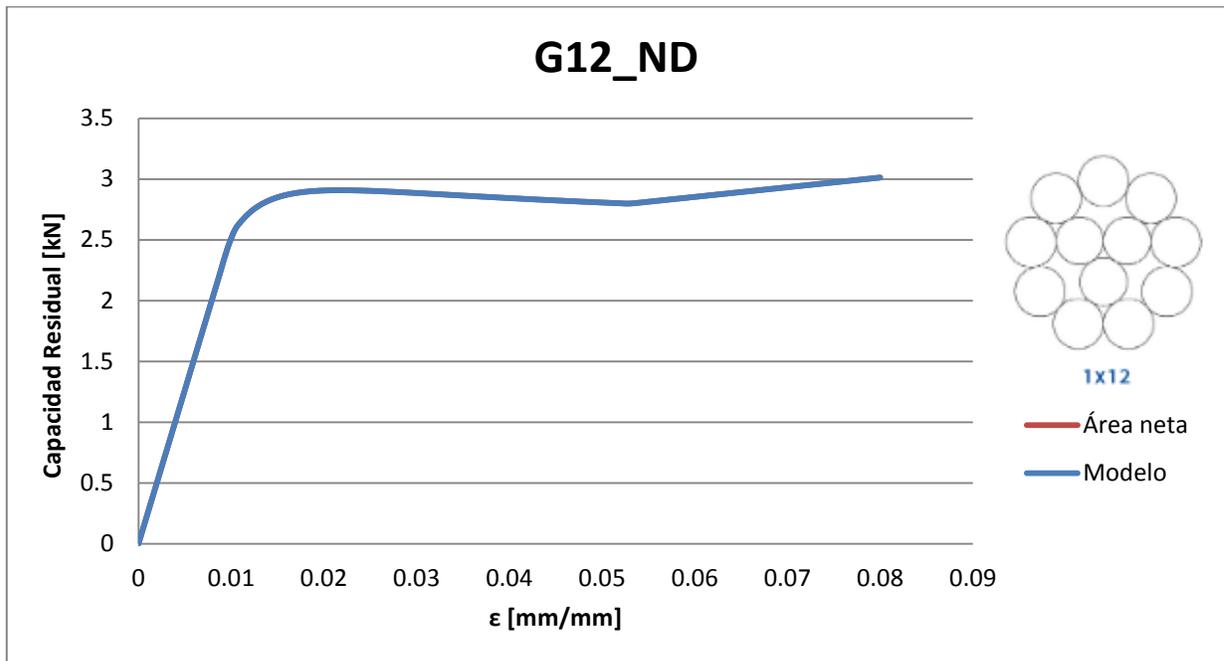


Grafico A-1: Capacidad residual para configuración G12_ND: Área neta v/s modelo propuesto

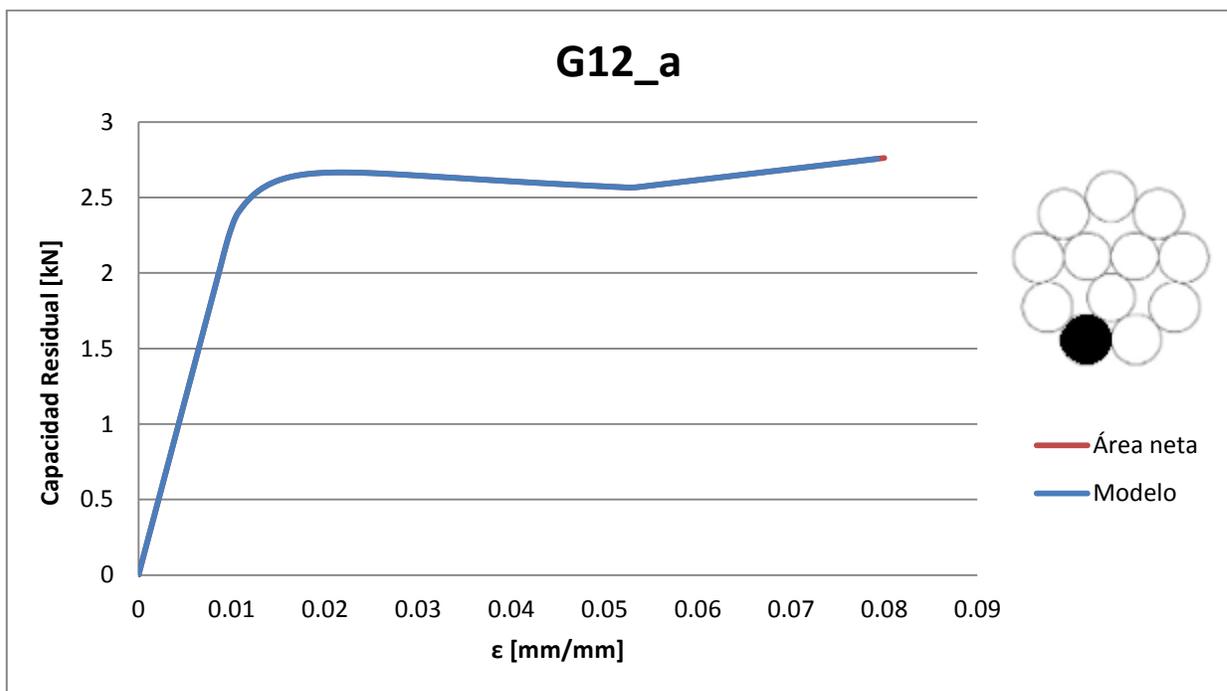


Grafico A-2: Capacidad residual para configuración G12_a: Área neta v/s modelo propuesto

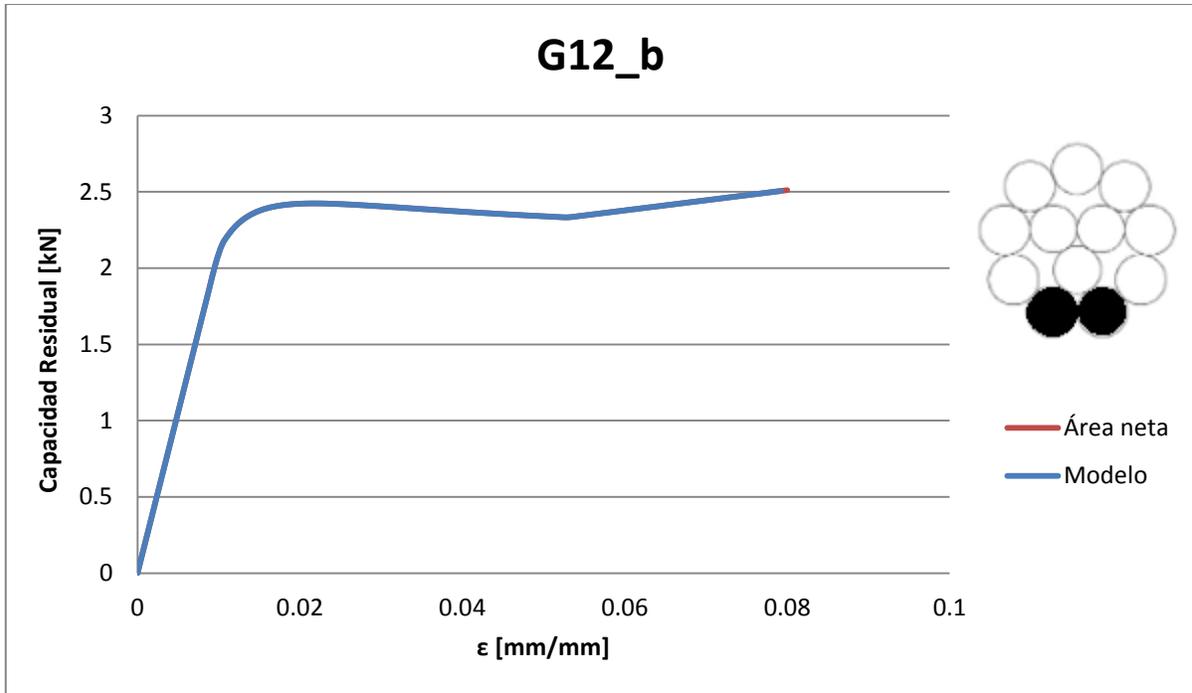


Grafico A-3: Capacidad residual para configuración G12_b: Área neta v/s modelo propuesto

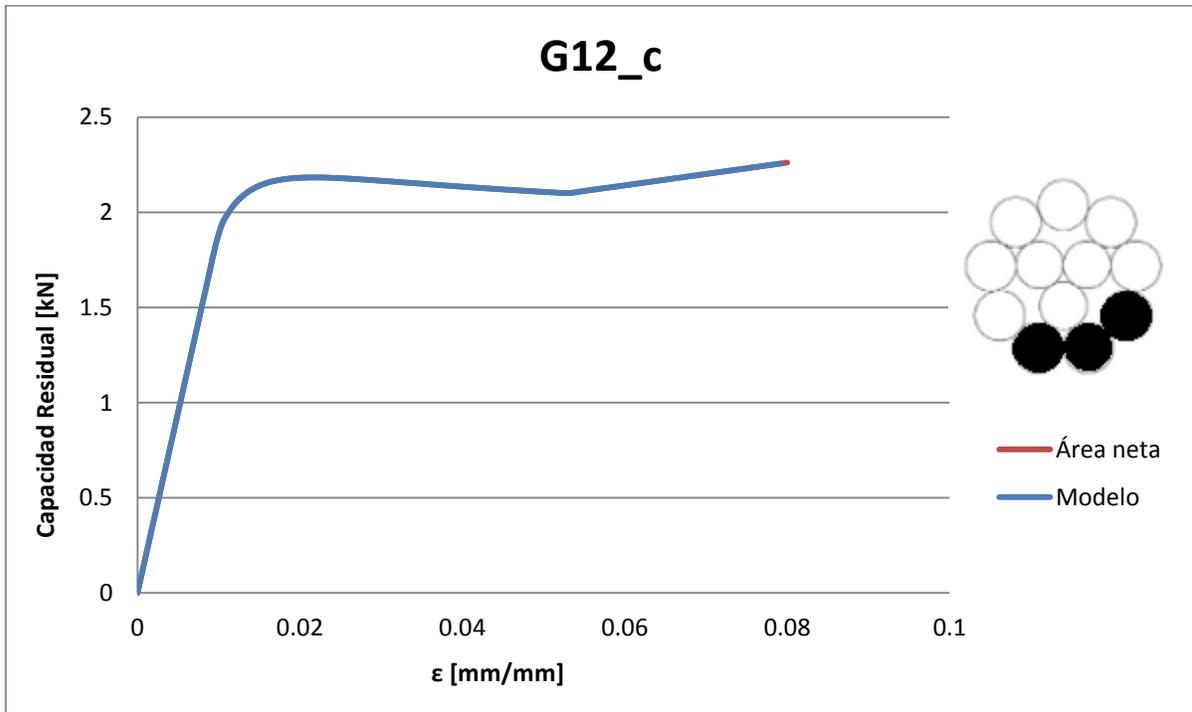


Grafico A-4: Capacidad residual para configuración G12_c: Área neta v/s modelo propuesto

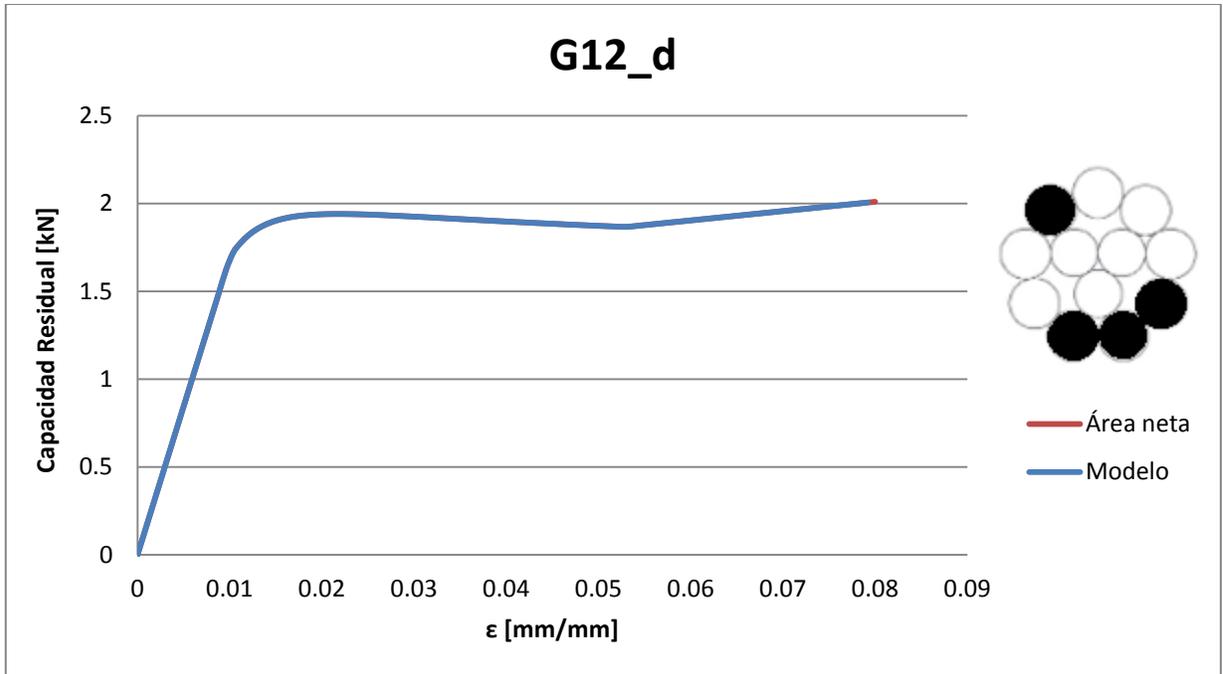


Grafico A-5: Capacidad residual para configuración G12_d: Área neta v/s modelo propuesto

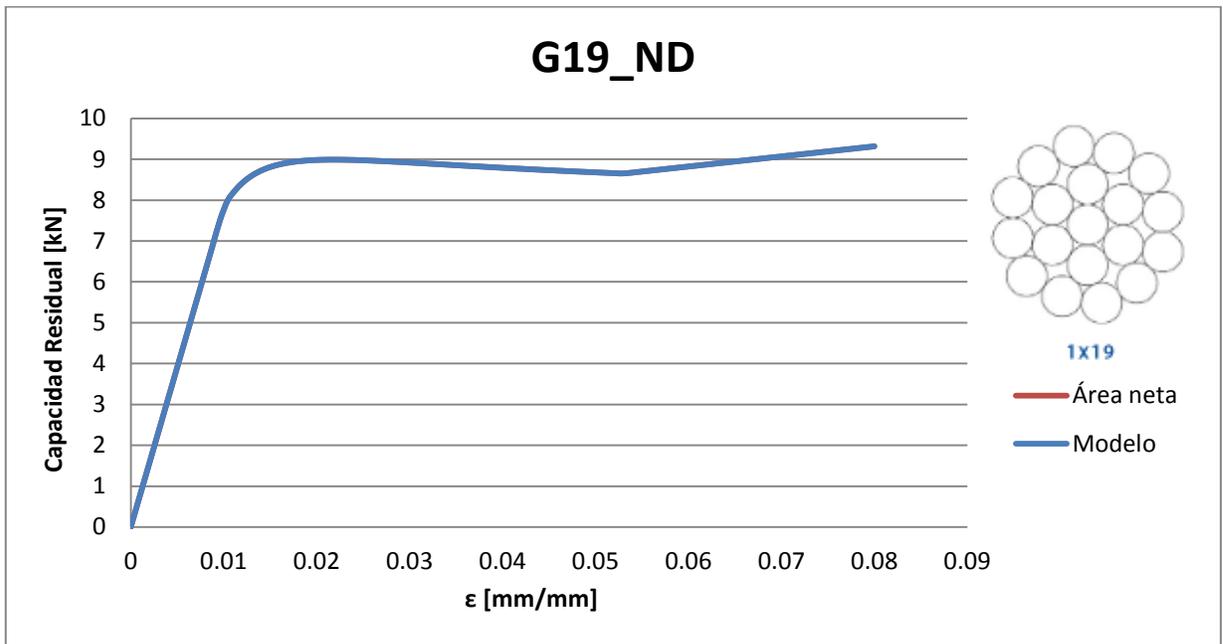


Grafico A-6: Capacidad residual para configuración G19_ND: Área neta v/s modelo propuesto

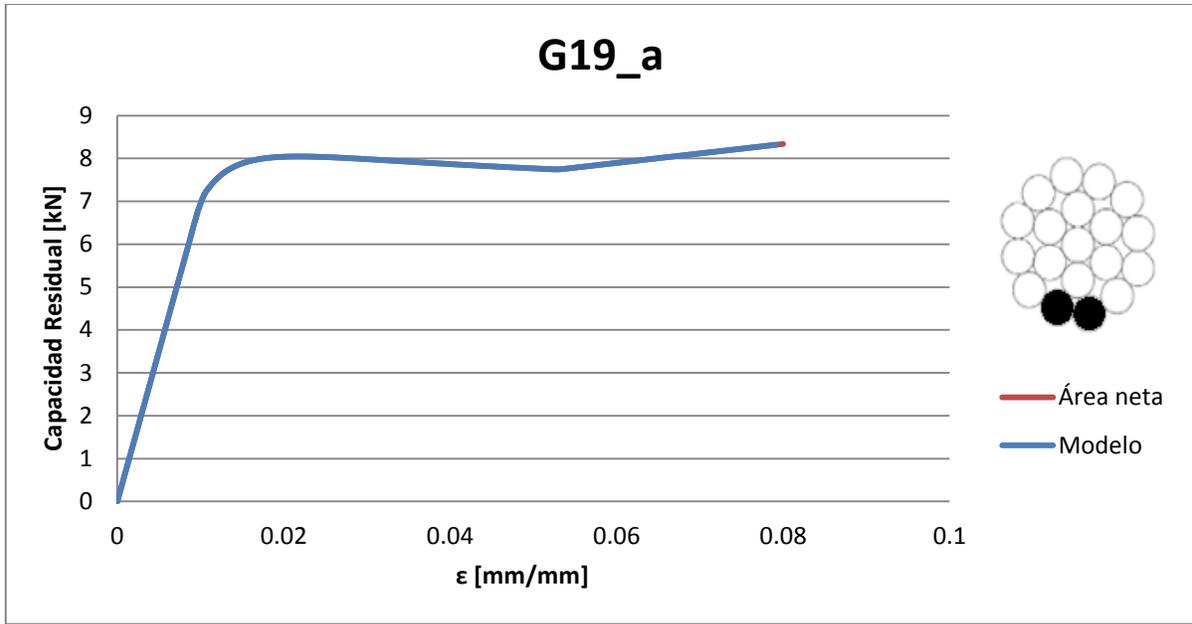


Grafico A-7: Capacidad residual para configuración G19_a: Área neta v/s modelo propuesto

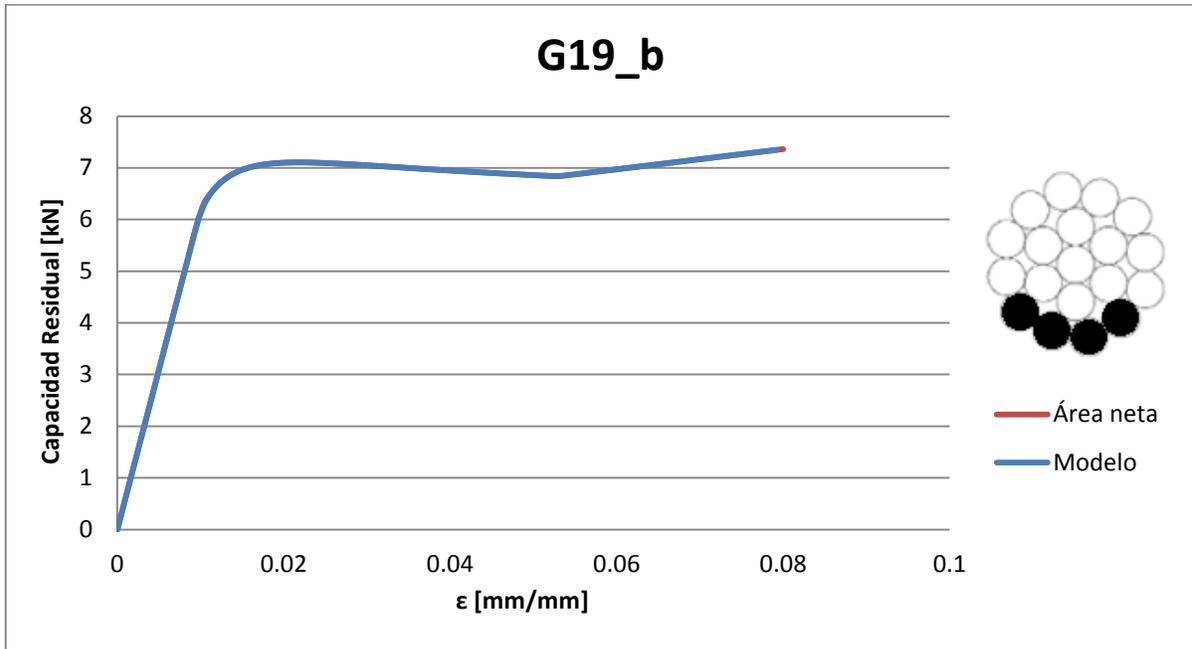


Grafico A-8: Capacidad residual para configuración G19_b: Área neta v/s modelo propuesto

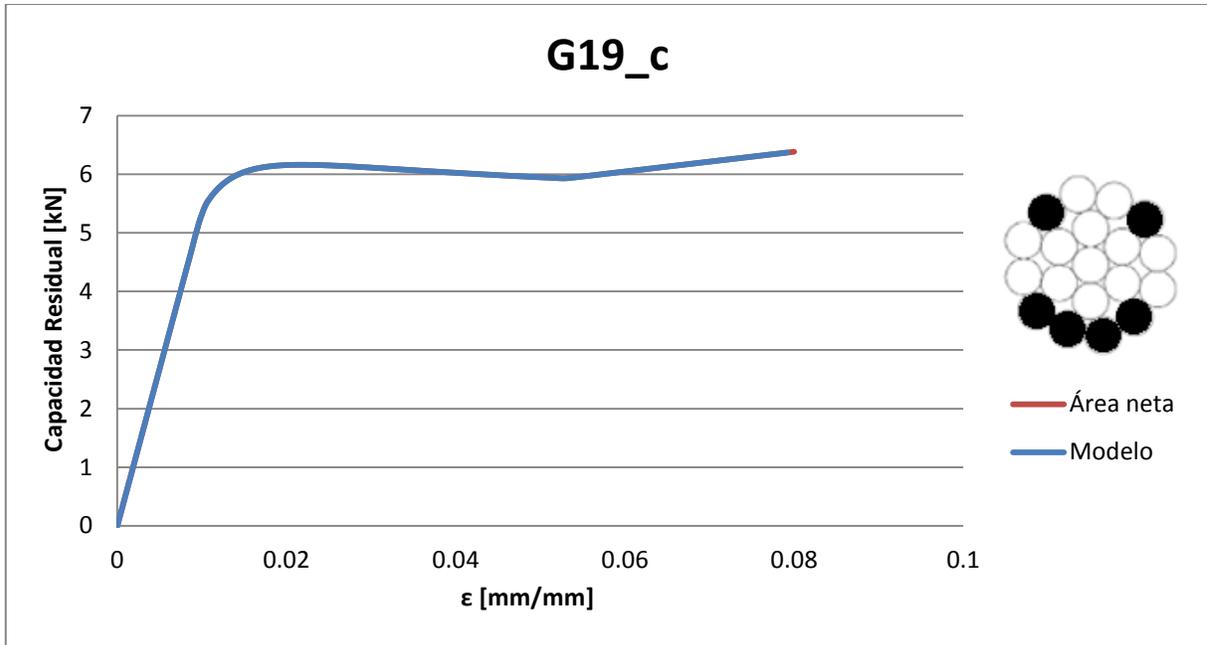


Grafico A-9: Capacidad residual para configuración G19_c: Área neta v/s modelo propuesto

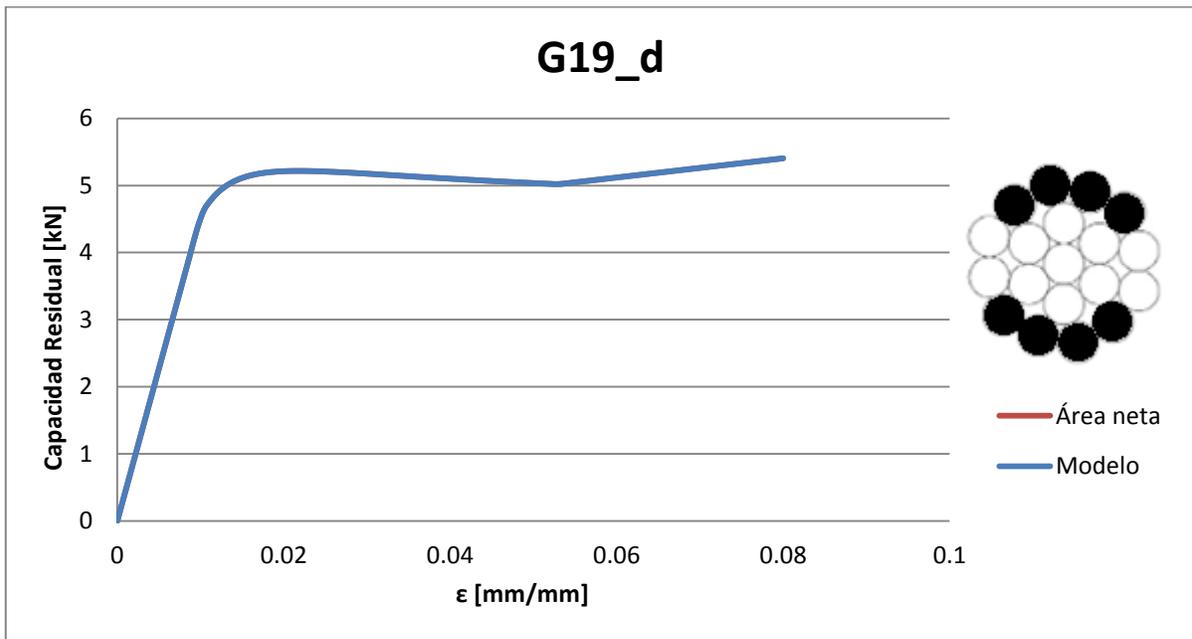


Grafico A-10: Capacidad residual para configuración G19_d: Área neta v/s modelo propuesto

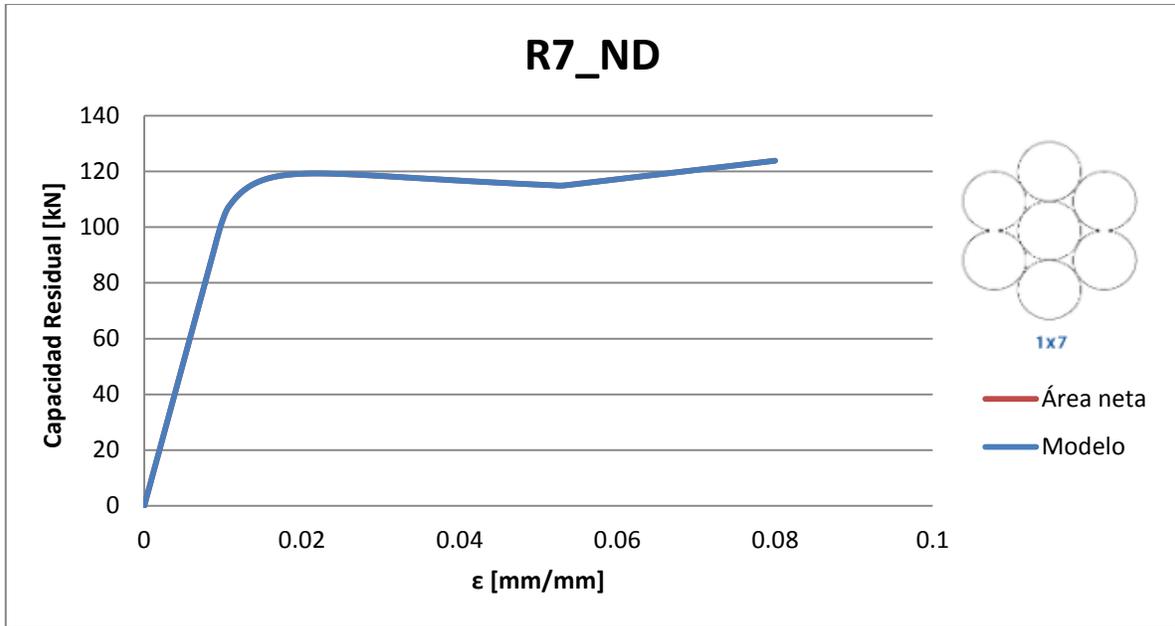


Grafico A-11: Capacidad residual para configuración R7_ND: Área neta v/s modelo propuesto

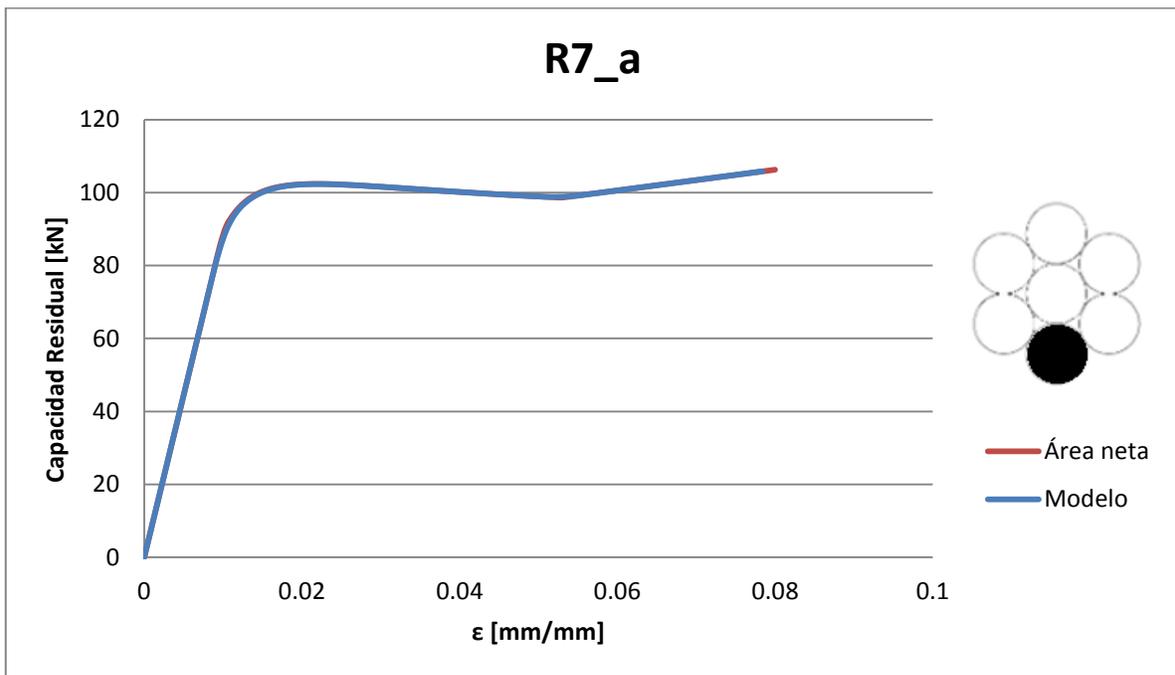


Grafico A-12: Capacidad residual para configuración R7_a: Área neta v/s modelo propuesto

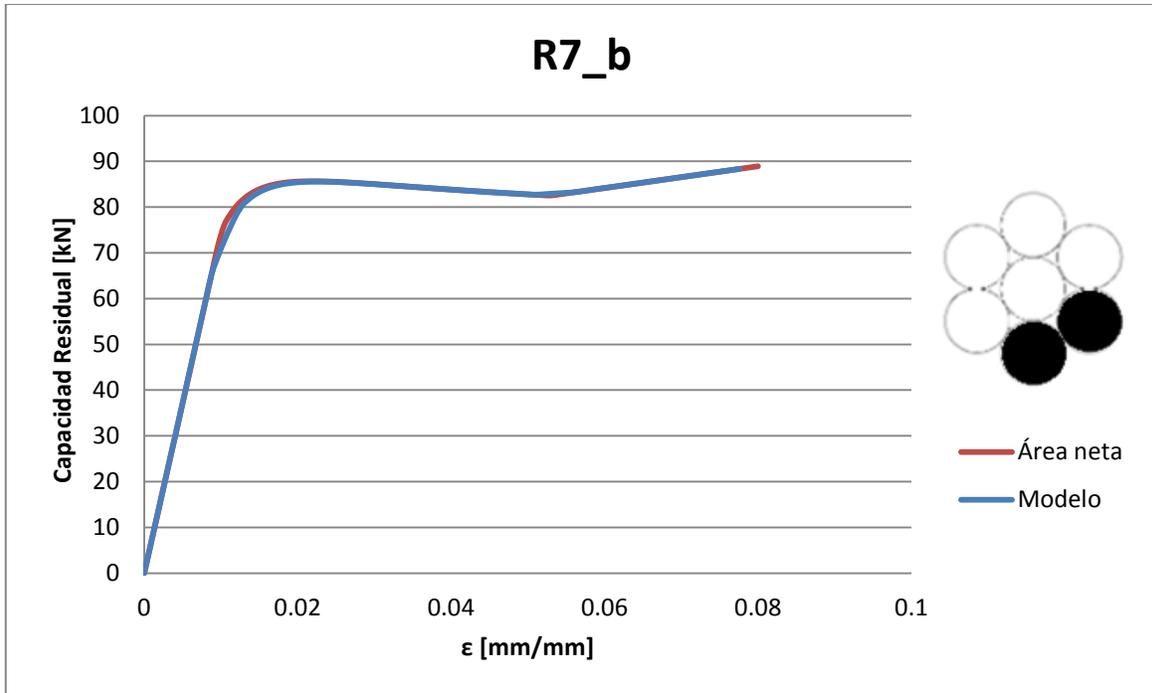


Grafico A-13: Capacidad residual para configuración R7_b: Área neta v/s modelo propuesto

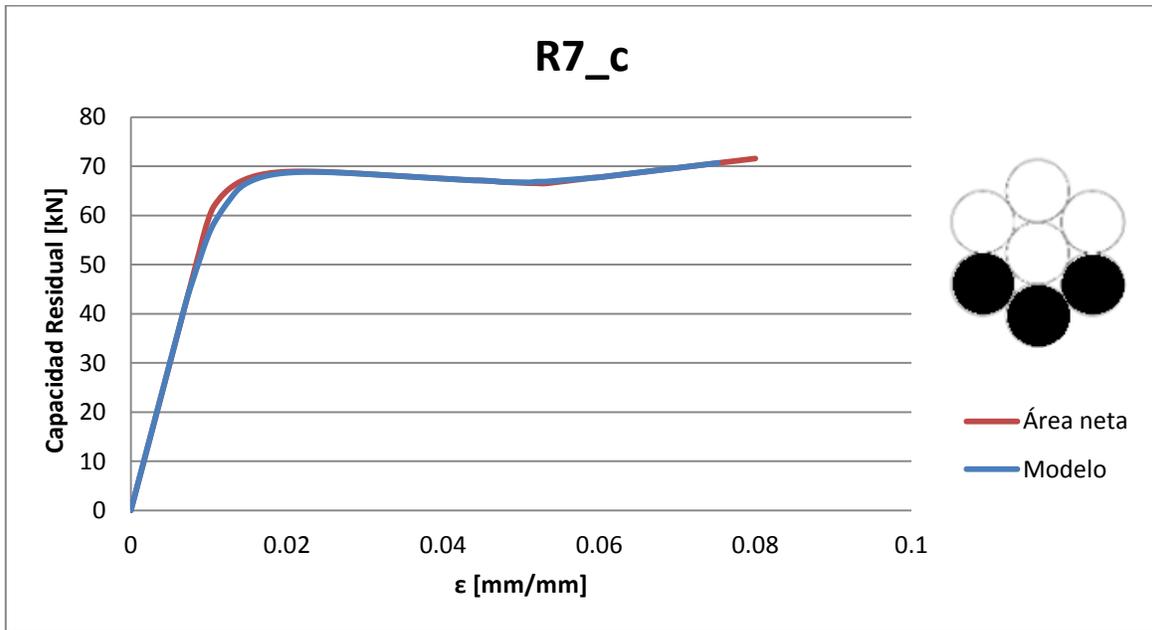


Grafico A-14: Capacidad residual para configuración R7_c: Área neta v/s modelo propuesto

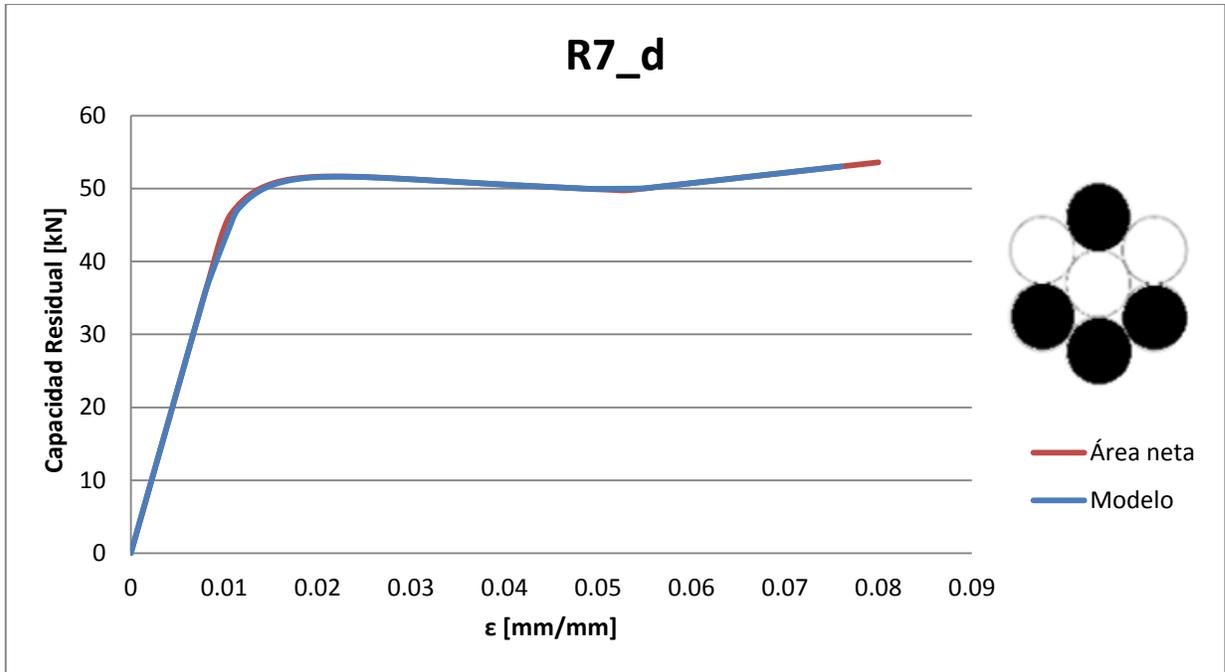


Grafico A-15: Capacidad residual para configuración R7_d: Área neta v/s modelo propuesto

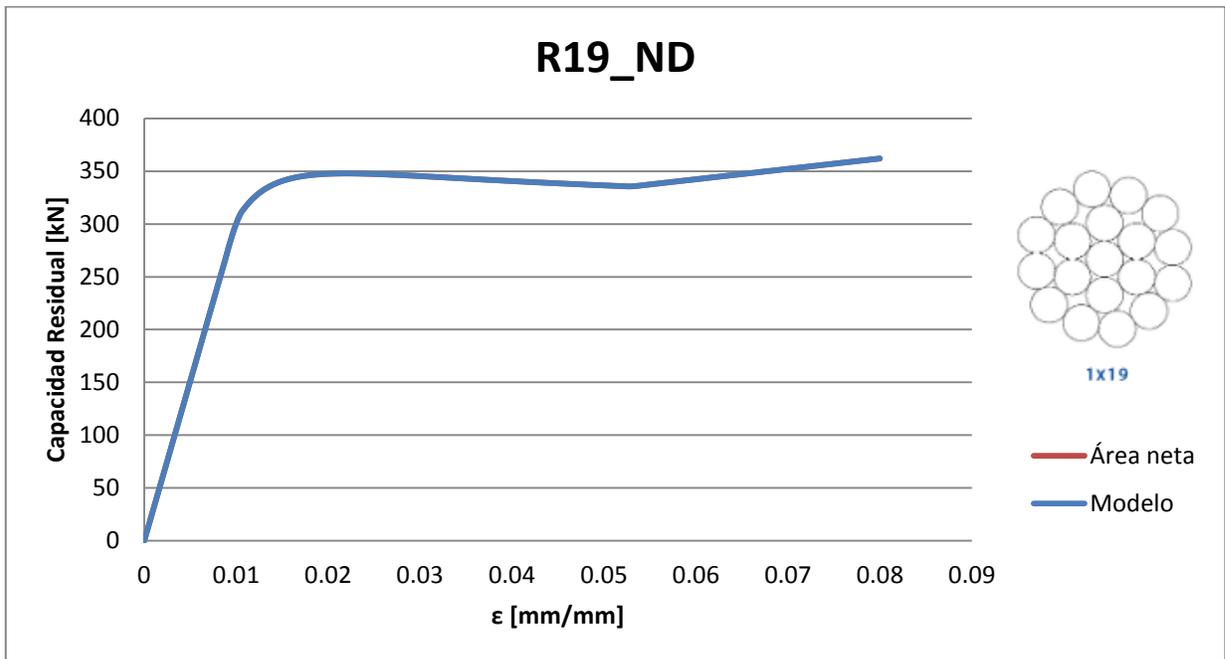


Grafico A-16: Capacidad residual para configuración R19_ND: Área neta v/s modelo propuesto

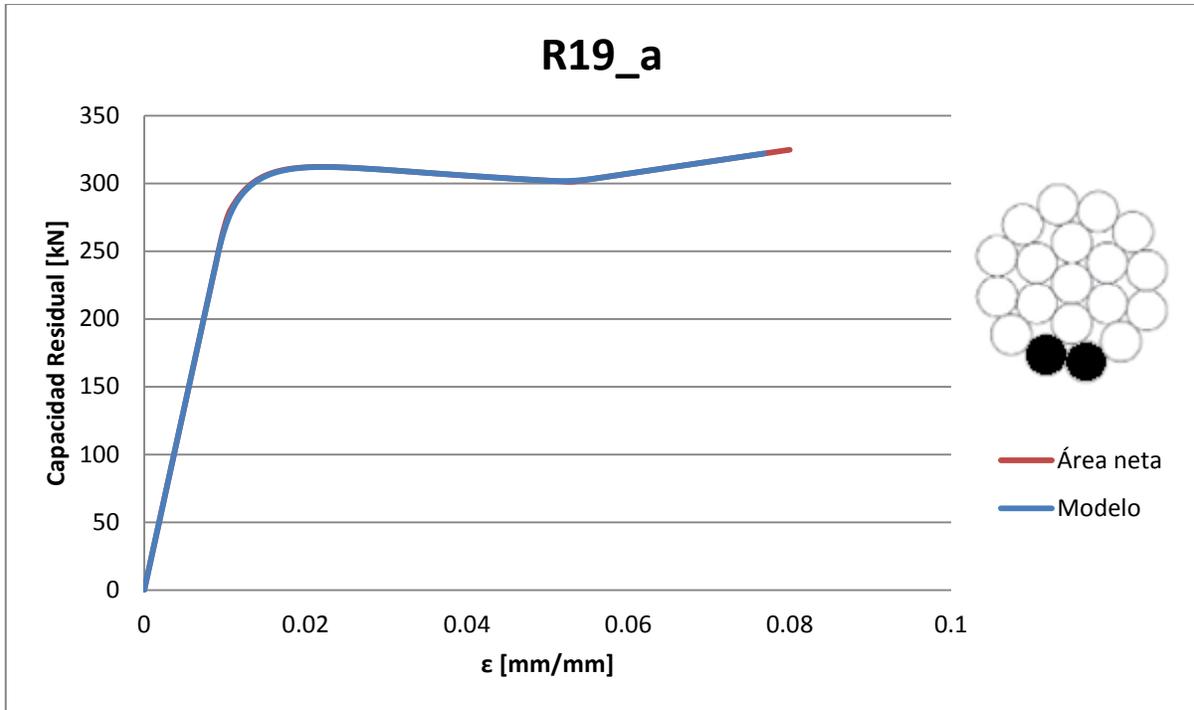


Grafico A-17: Capacidad residual para configuración R19_a: Área neta v/s modelo propuesto

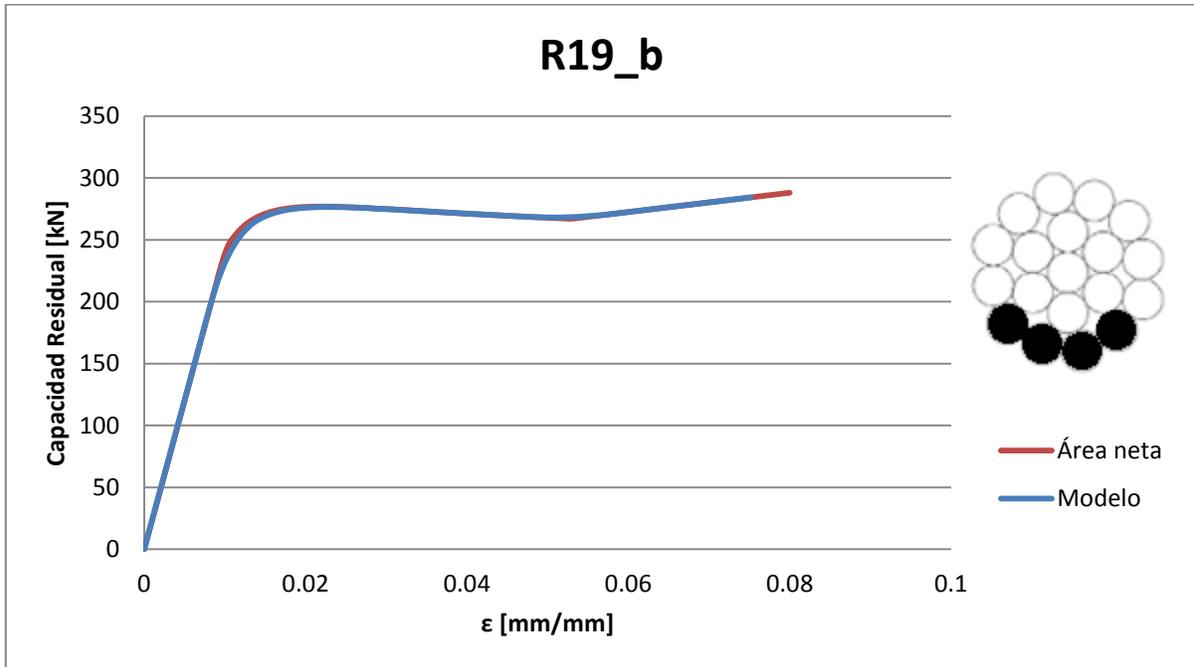


Grafico A-18: Capacidad residual para configuración R19_b: Área neta v/s modelo propuesto

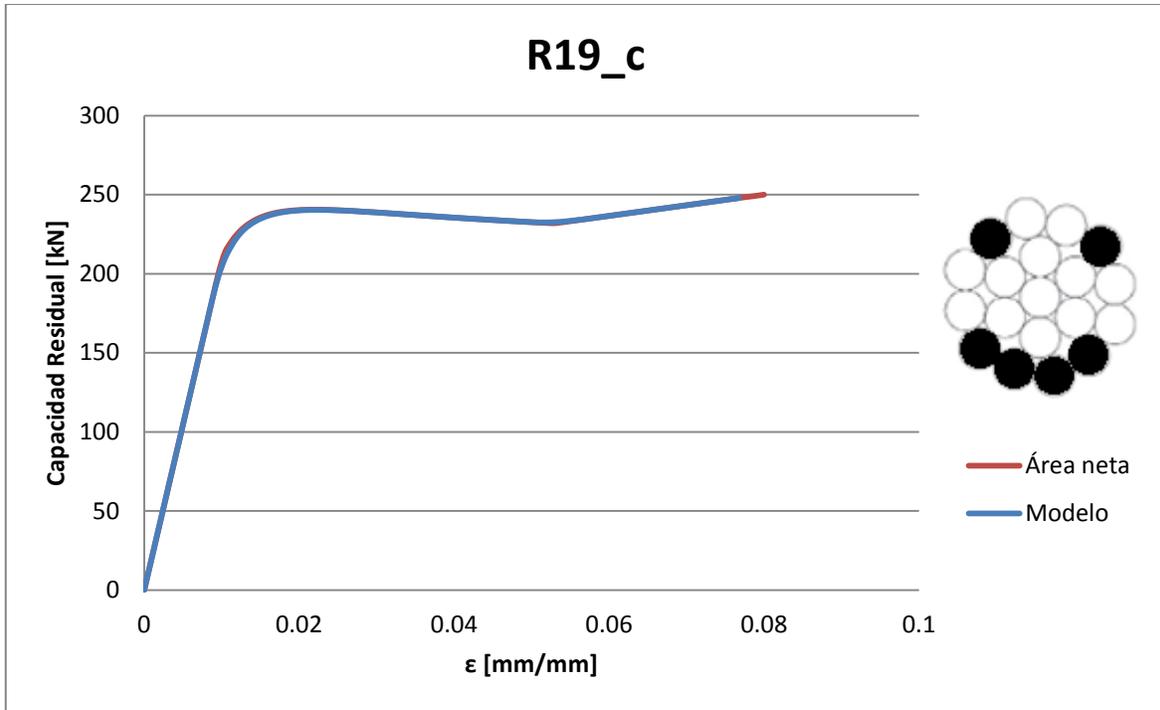


Grafico A-19: Capacidad residual para configuración R19_c: Área neta v/s modelo propuesto

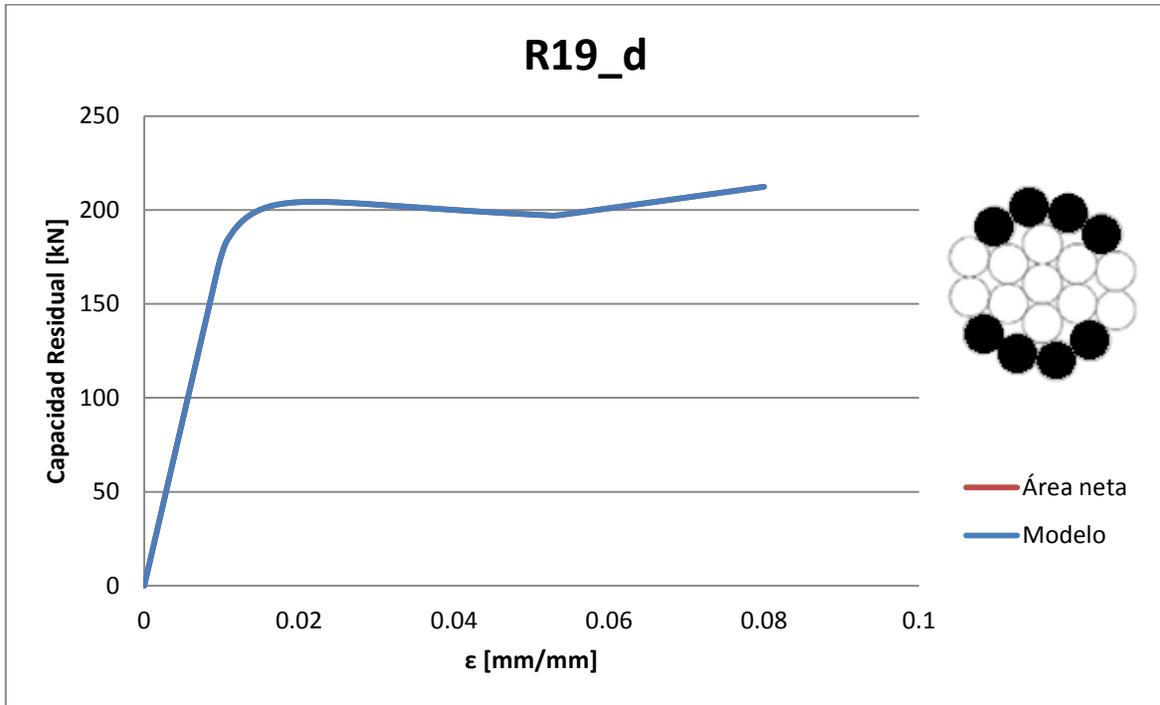


Grafico A-20: Capacidad residual para configuración R19_d: Área neta v/s modelo propuesto

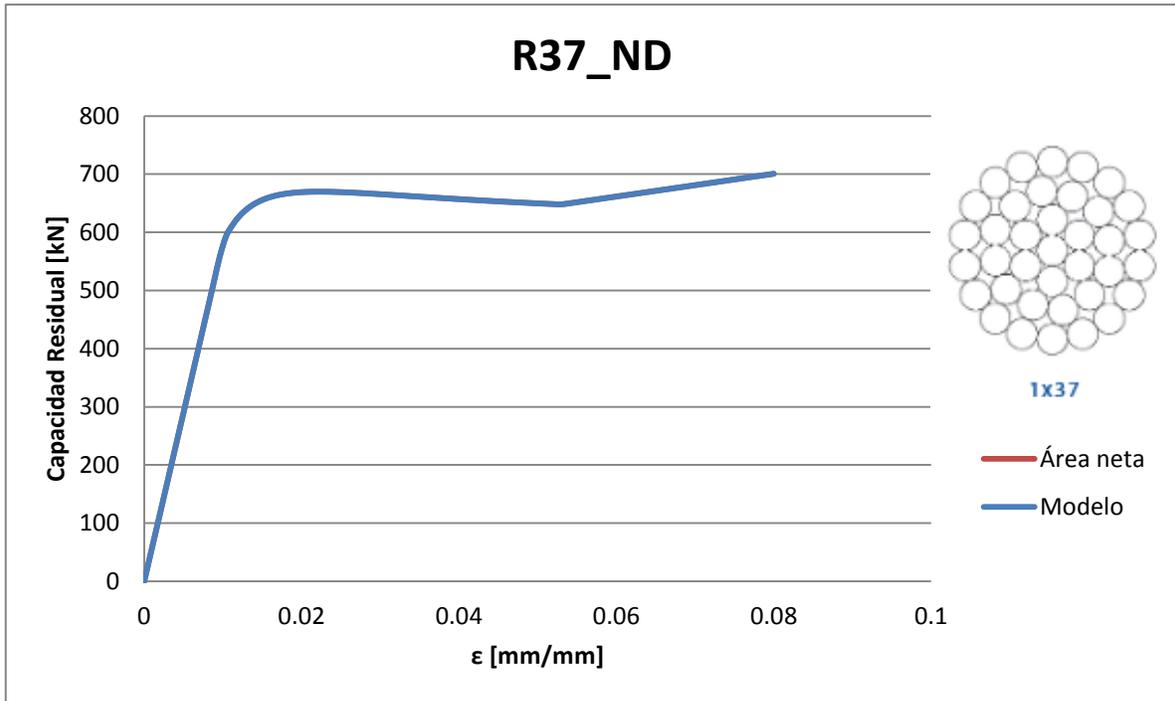


Grafico A-21: Capacidad residual para configuración R37_ND: Área neta v/s modelo propuesto

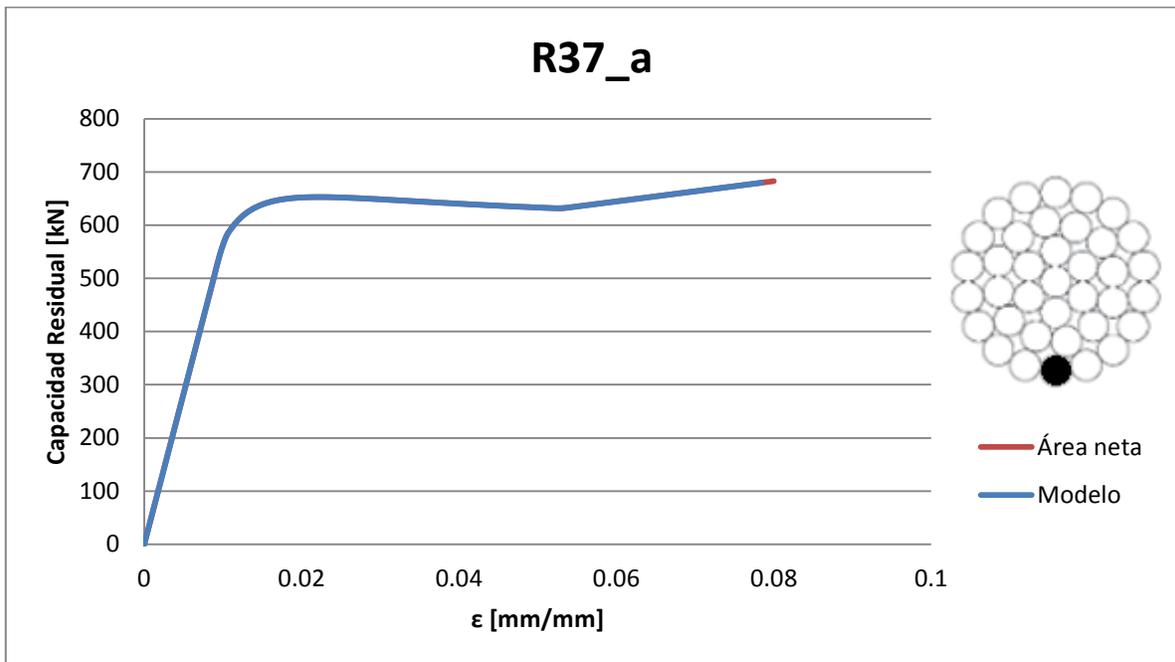


Grafico A-22: Capacidad residual para configuración R37_a: Área neta v/s modelo propuesto

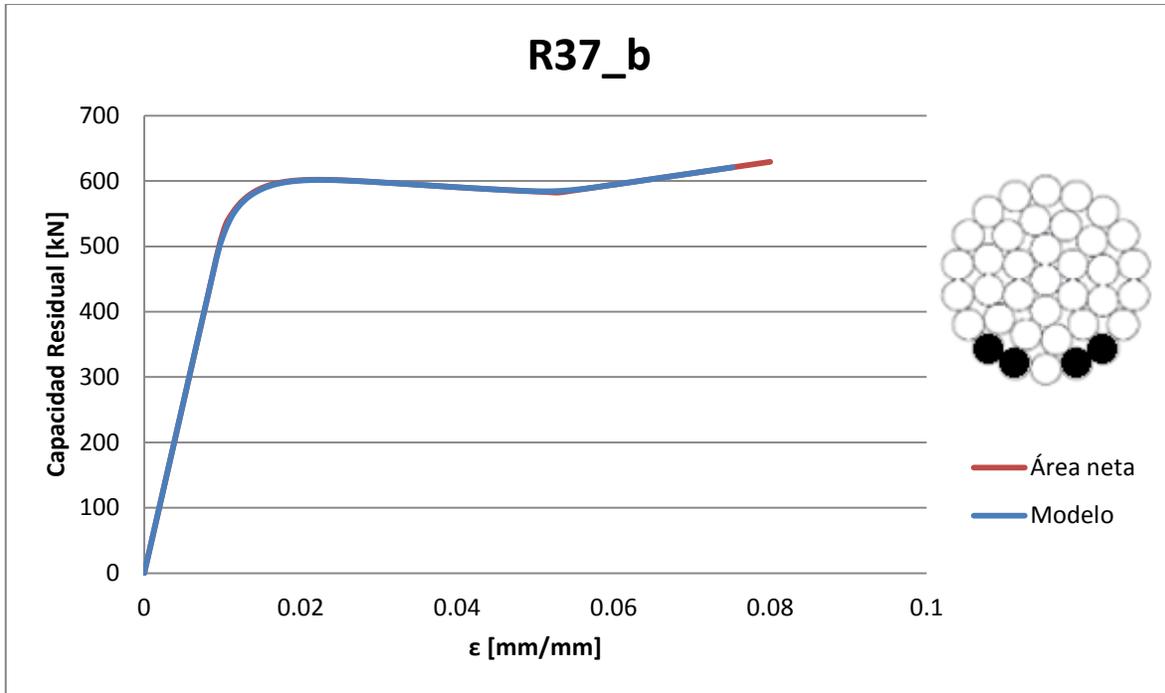


Grafico A-23: Capacidad residual para configuración R37_b: Área neta v/s modelo propuesto

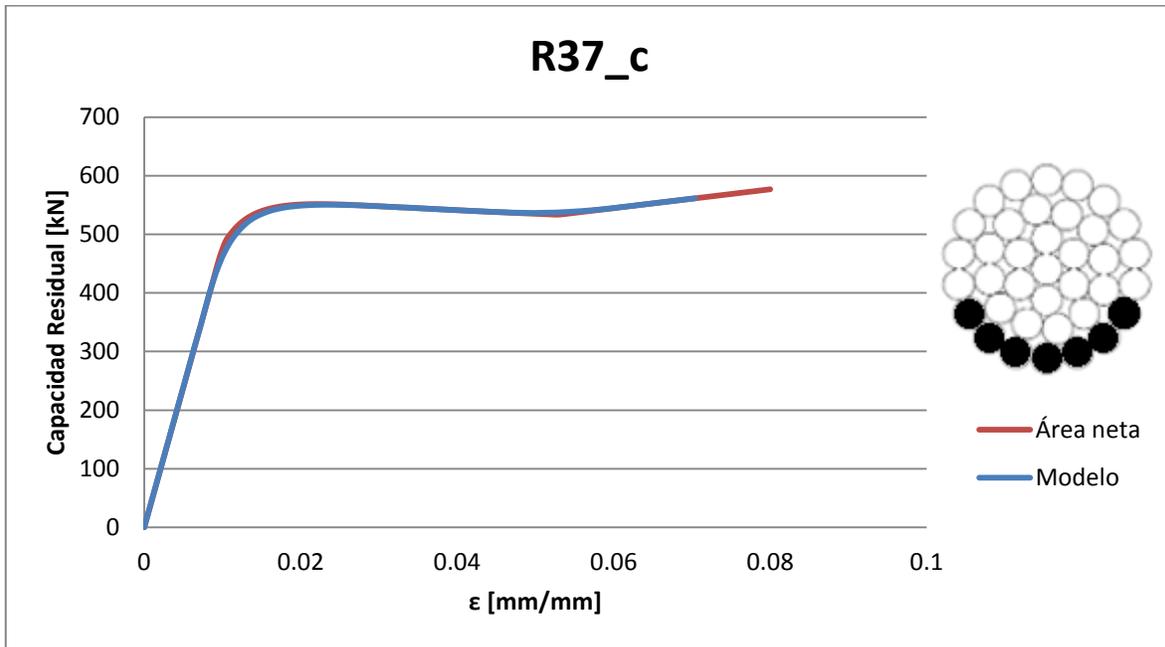


Grafico A-24: Capacidad residual para configuración R37_c: Área neta v/s modelo propuesto

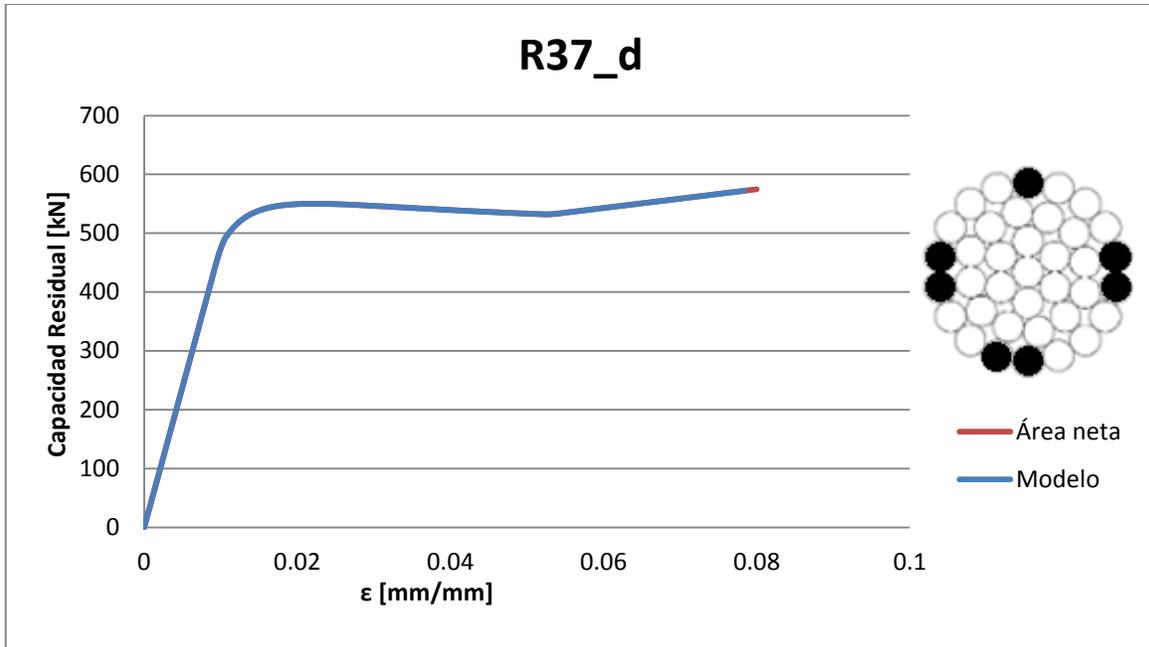


Grafico A-25: Capacidad residual para configuración R37_d: Área neta v/s modelo propuesto

ANEXO B: Curvas tensión-deformación de componentes para caso multinivel

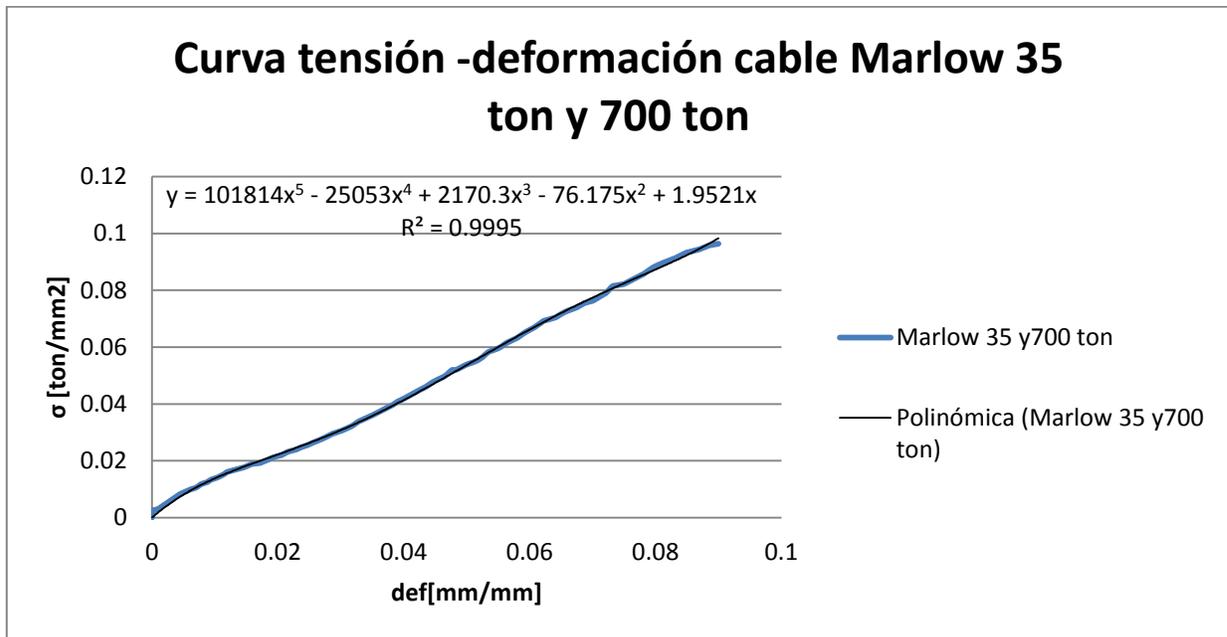


Grafico B-1: Curva tensión-deformación y regresión polinómica para cable Marlow 35 ton y 700 ton

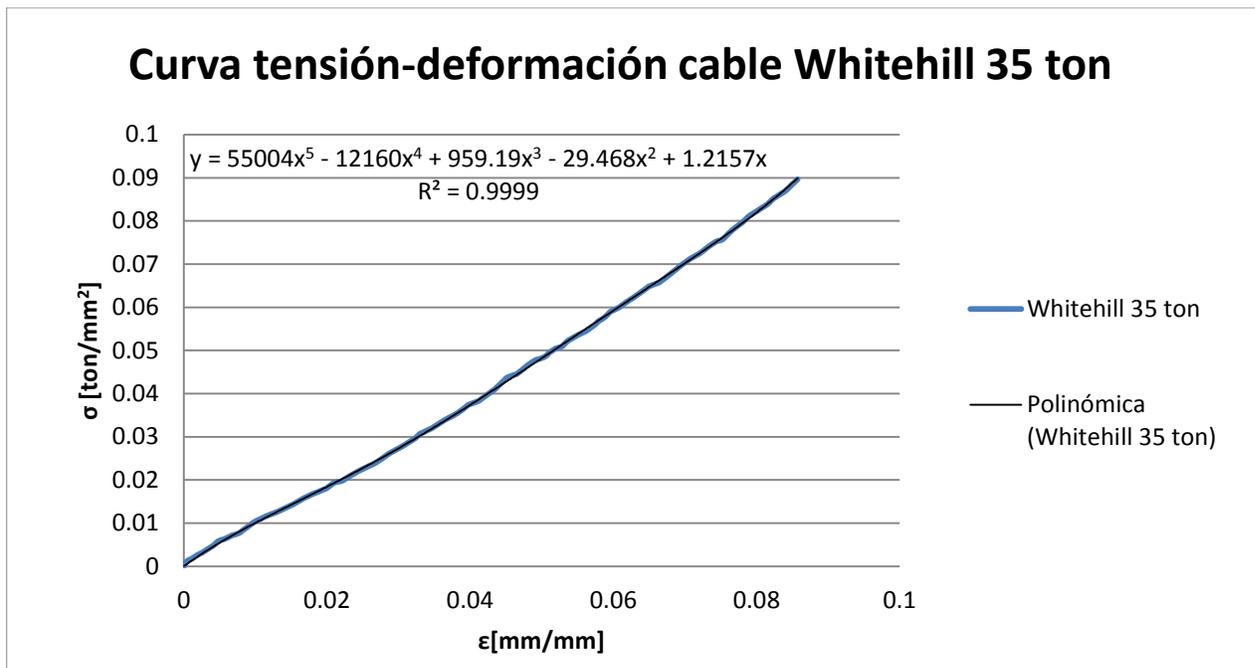


Grafico B-2: Curva tensión-deformación y regresión polinómica para cable Whitehill 35 ton

Curva tensión-deformación cable Whitehill 700 ton

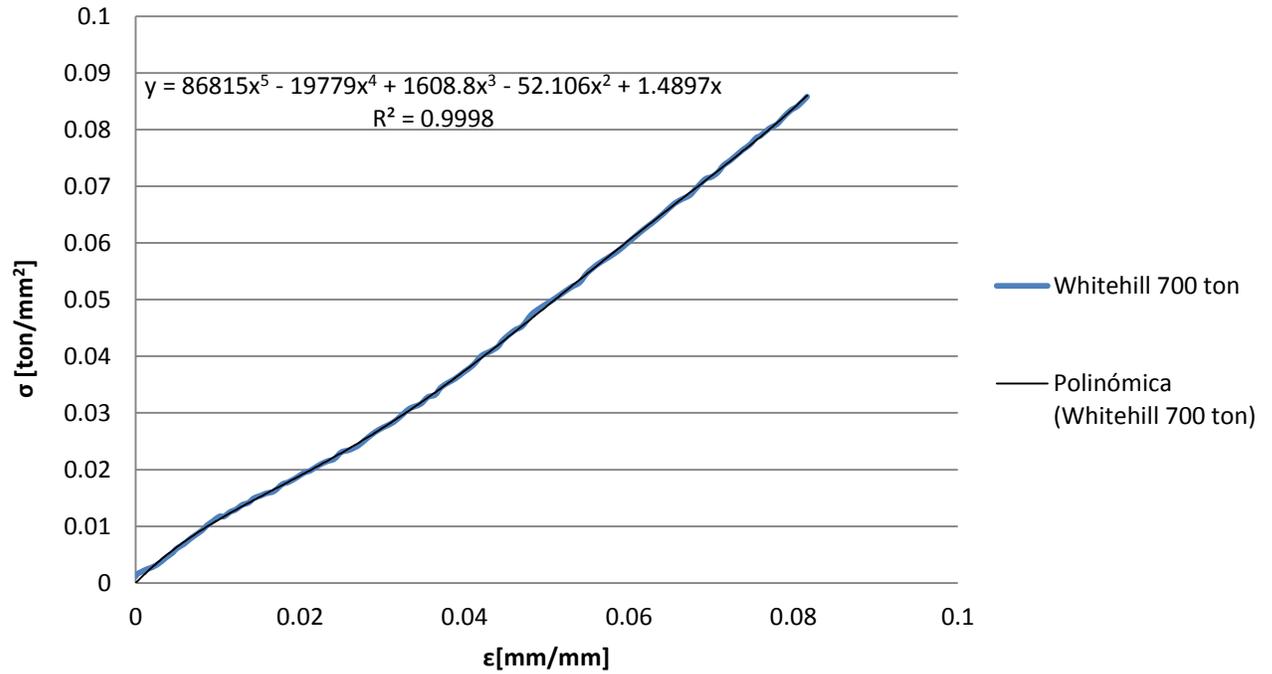


Grafico B-3: Curva tensión-deformación y regresión polinómica para cable Whitehill 700 ton

Curva tensión-deformación cable Bexco 35 ton

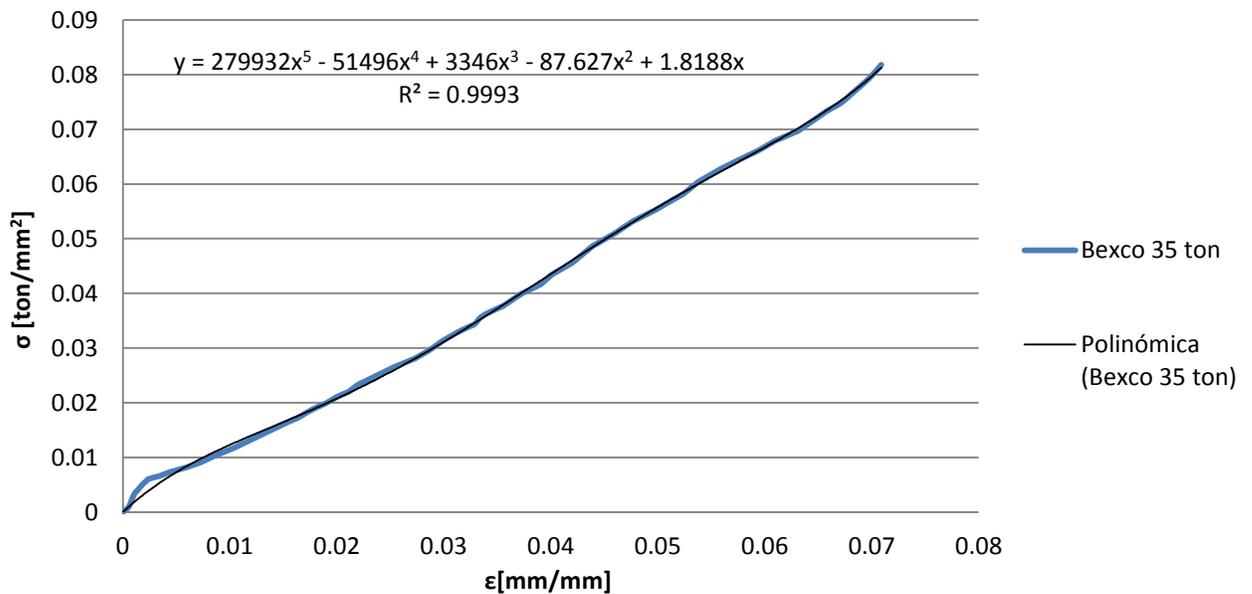


Grafico B-4: Curva tensión-deformación y regresión polinómica para cable Bexco 35 ton

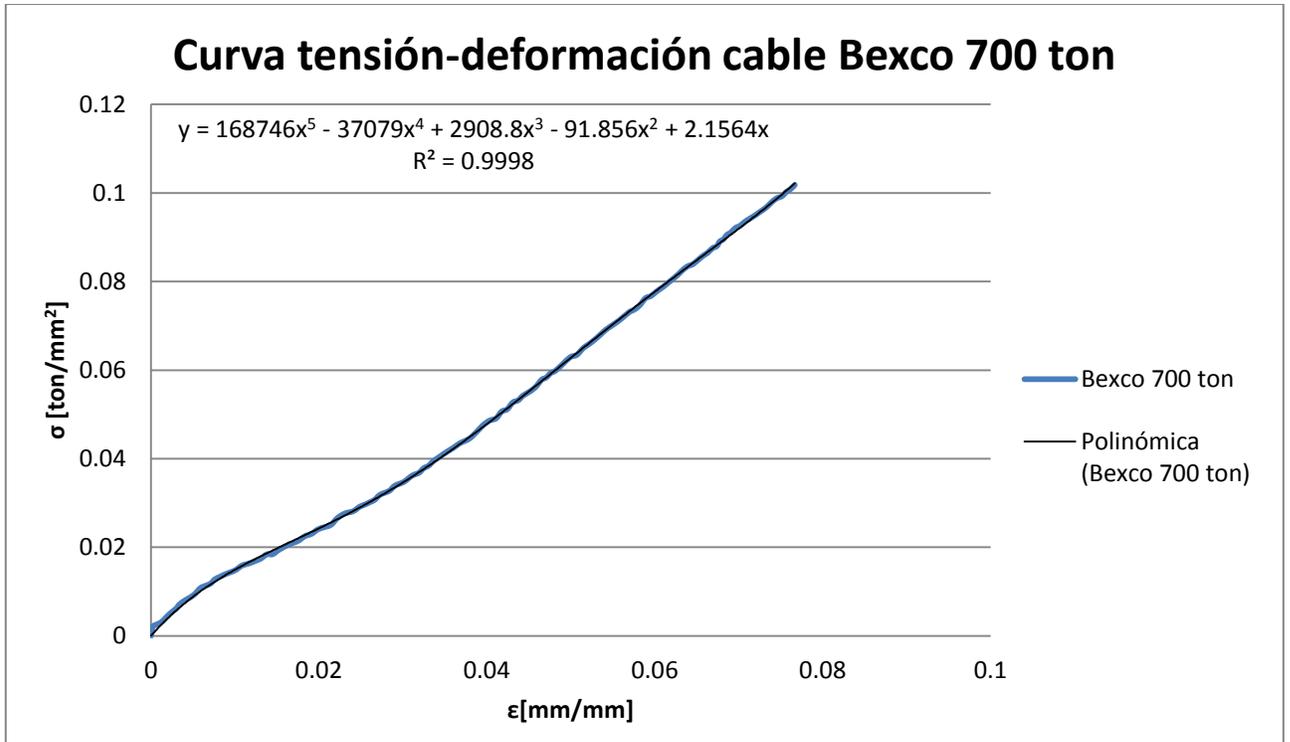


Grafico B-5: Curva tensión-deformación y regresión polinómica para cable Bexco 700 ton

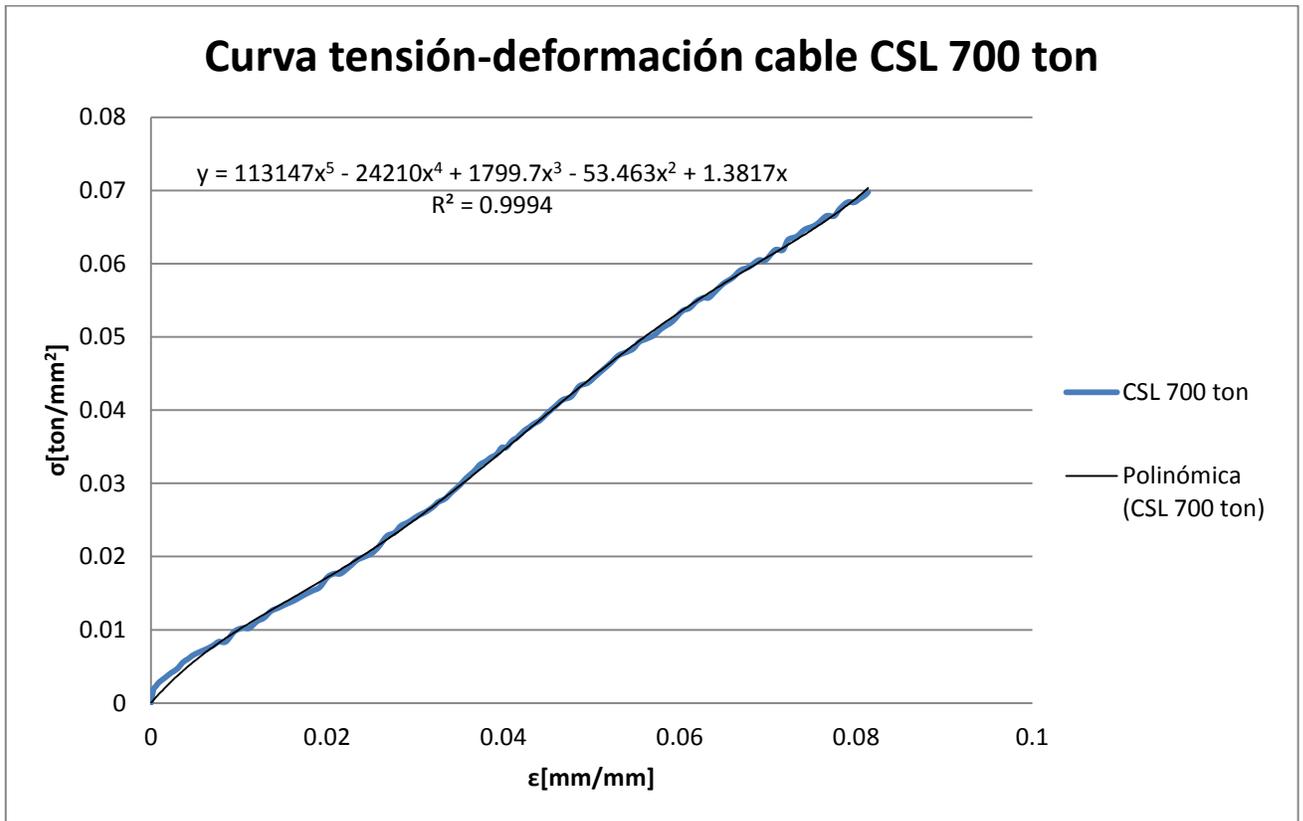


Grafico B-6: Curva tensión-deformación y regresión polinómica para cable CSL 700 ton

ANEXO C: Curvas de capacidad-deformación obtenidas de ensayos realizados en la literatura

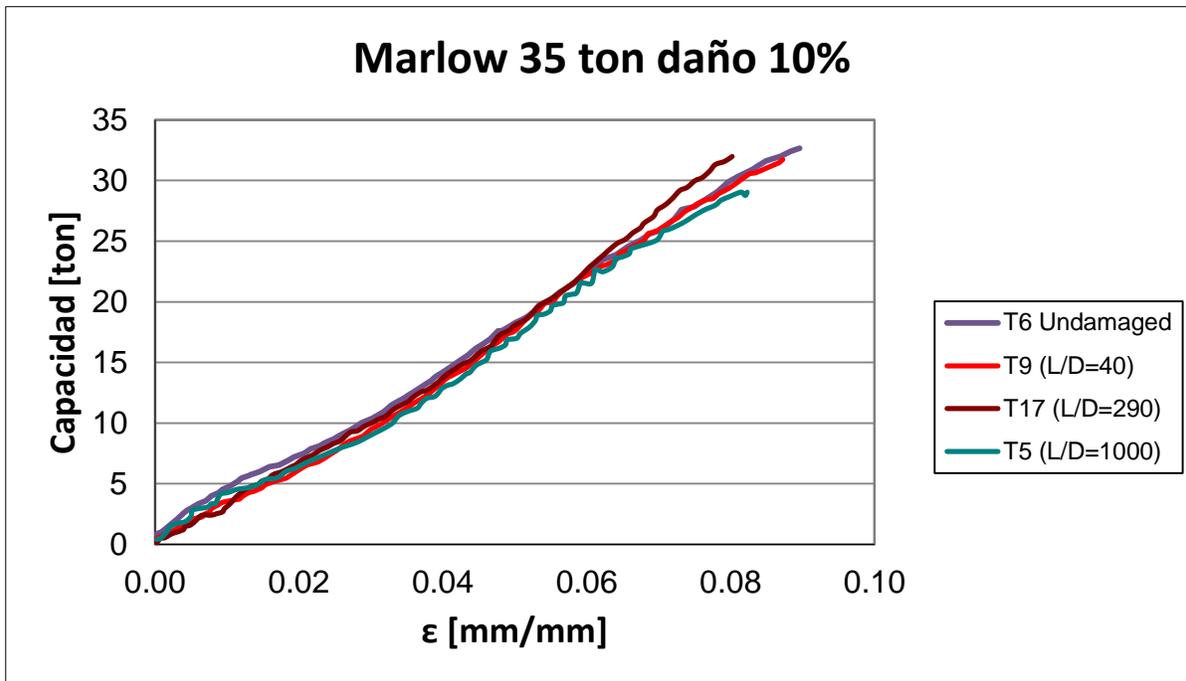


Grafico C-1: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Marlow 35 ton y 10% de daño

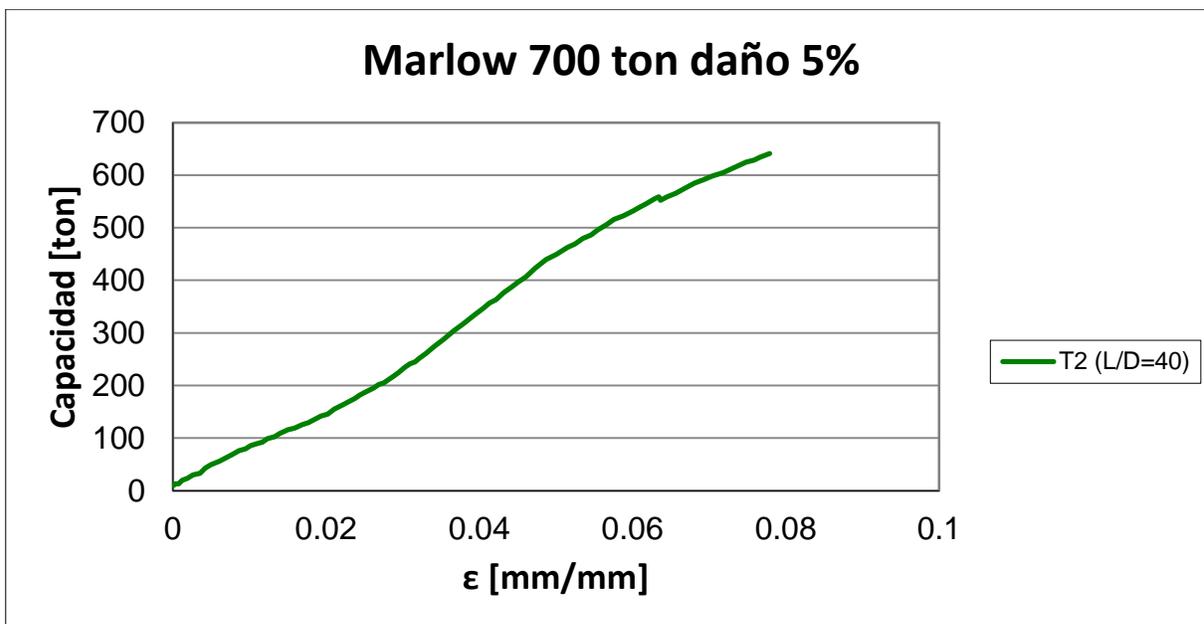


Grafico C-2: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Marlow 700 ton y 5% de daño

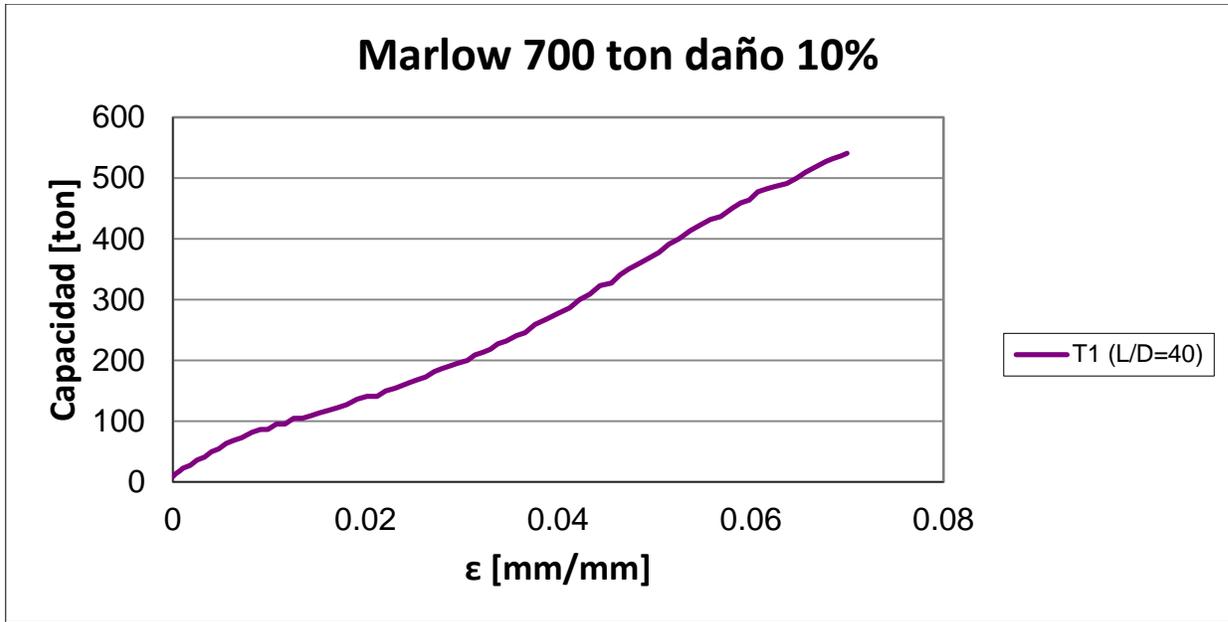


Grafico C-3: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Marlow 700 ton y 10% de daño

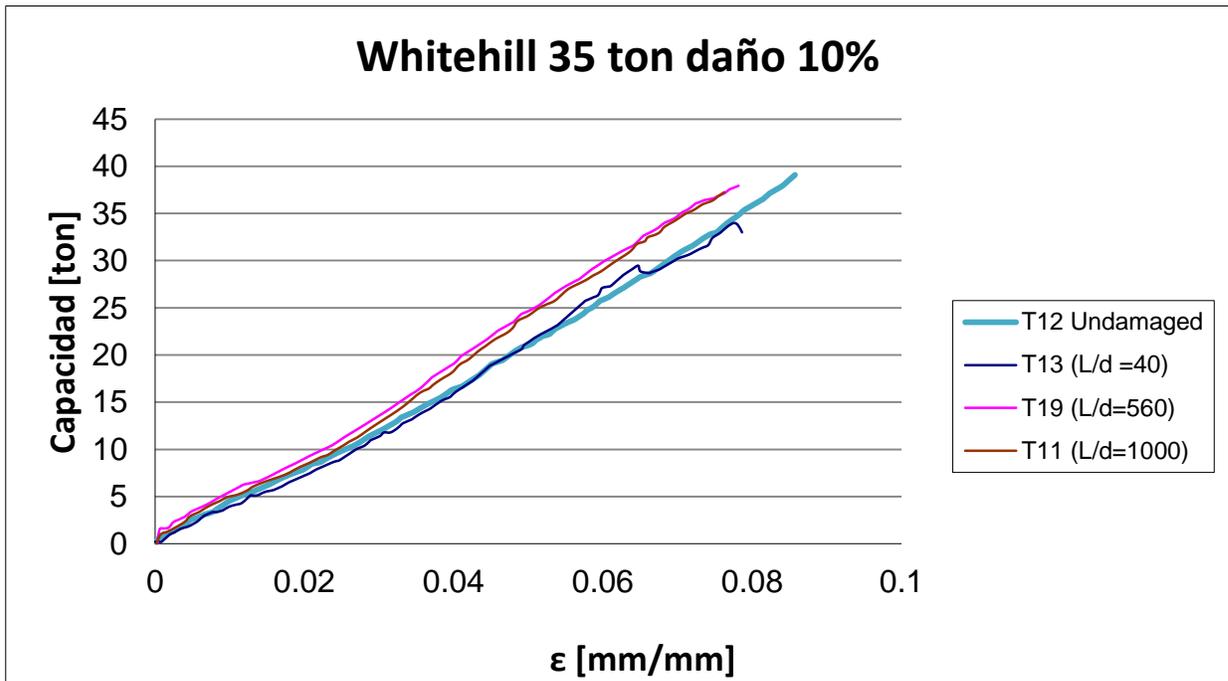


Grafico C-4: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Whitehill 35 ton y 10% de daño

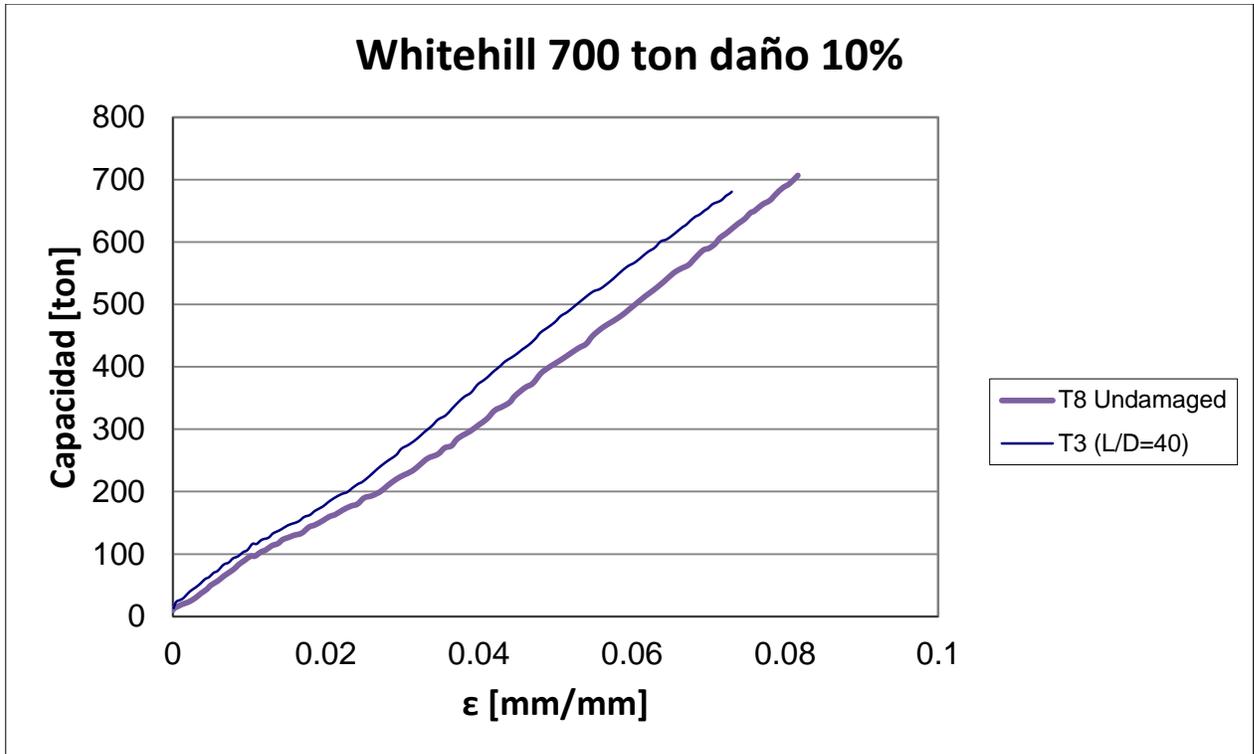


Grafico C-5: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Whitehill 700 ton y 10% de daño

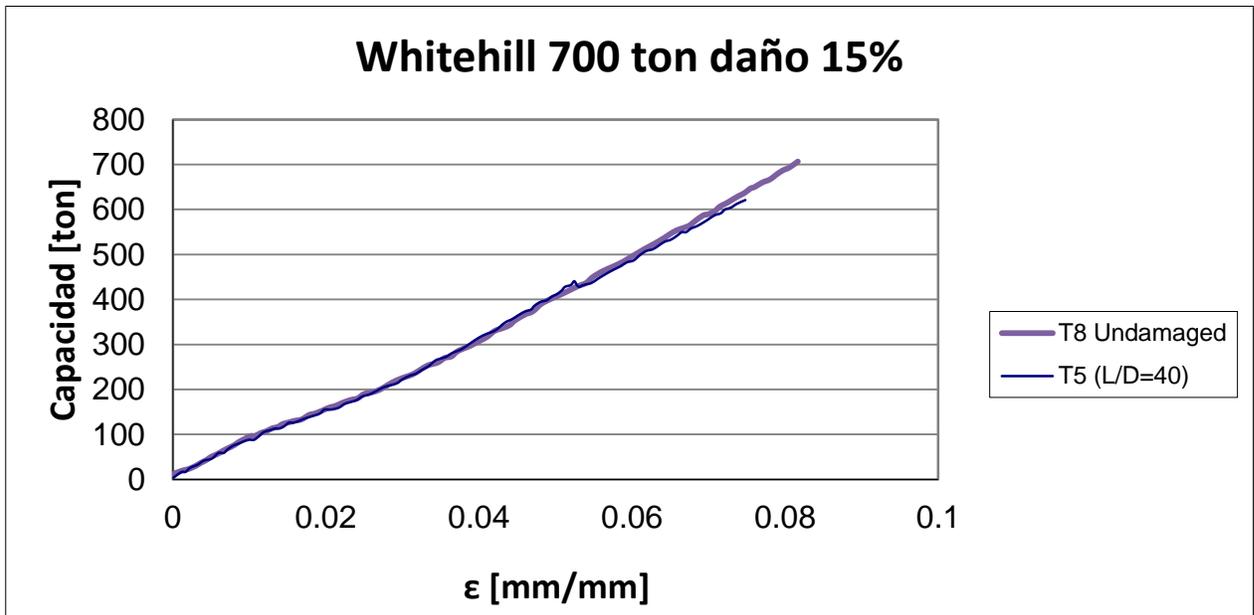


Grafico C-6: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Whitehill 700 ton y 15% de daño

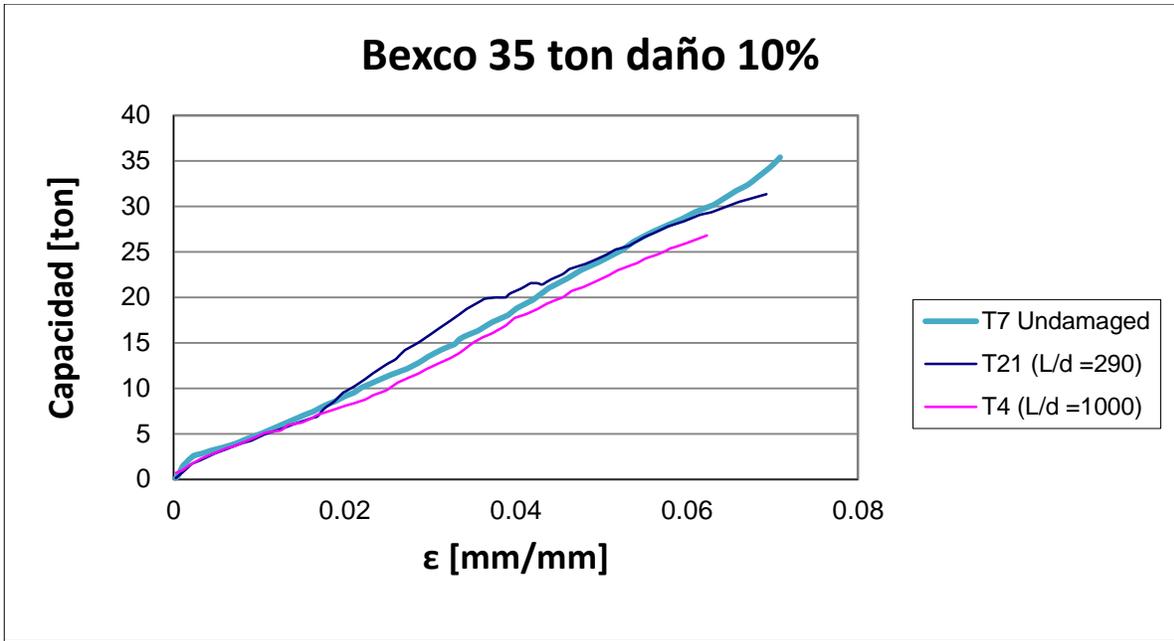


Grafico C-7: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Bexco 35 ton y 10% de daño

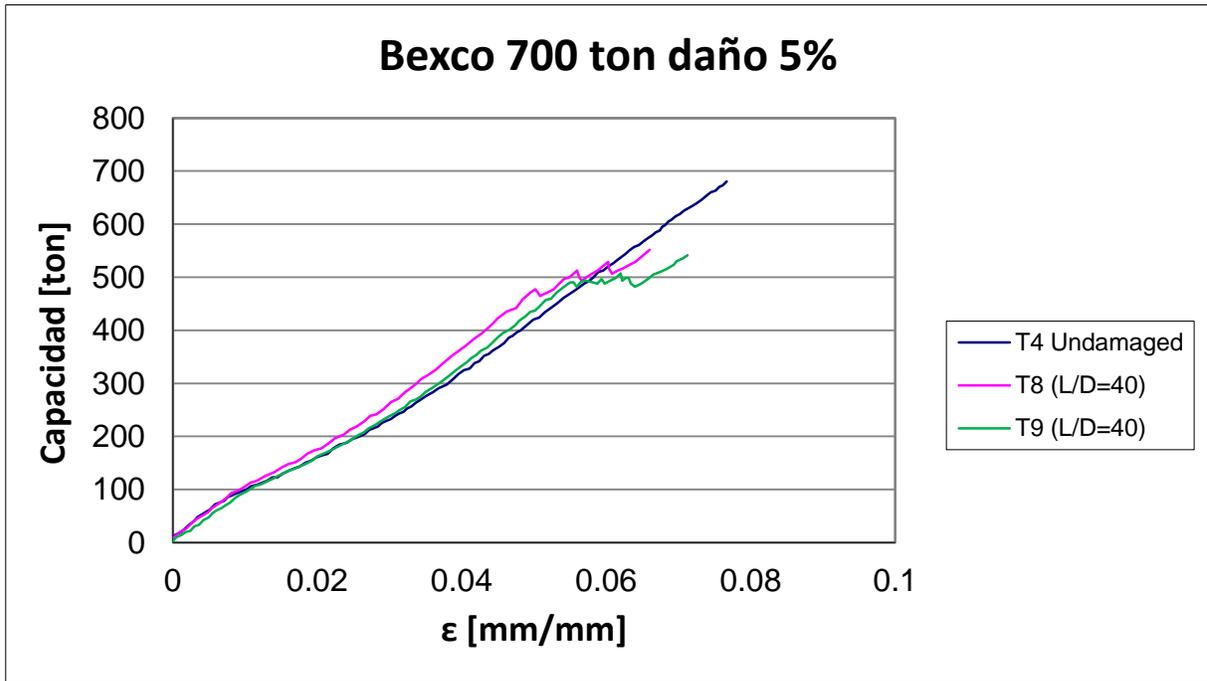


Grafico C-8: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Bexco 700 ton y 5% de daño

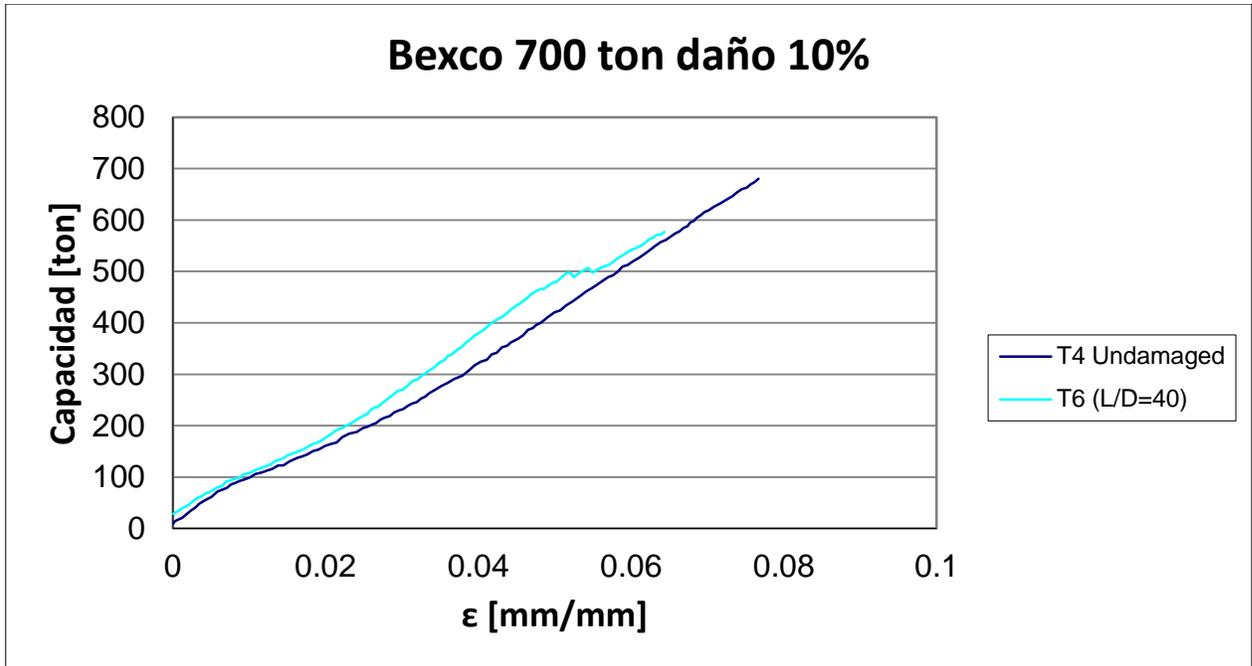


Grafico C-9: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable Bexco 700 ton y 10% de daño

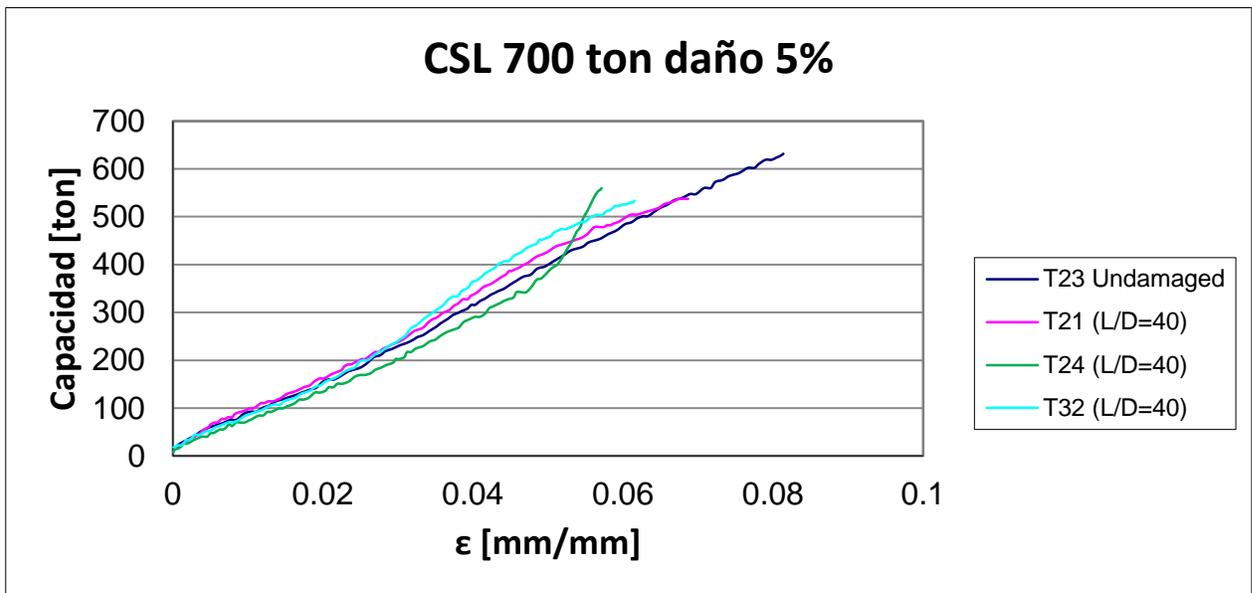


Grafico C-10: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable CSL 700 ton y 5% de daño

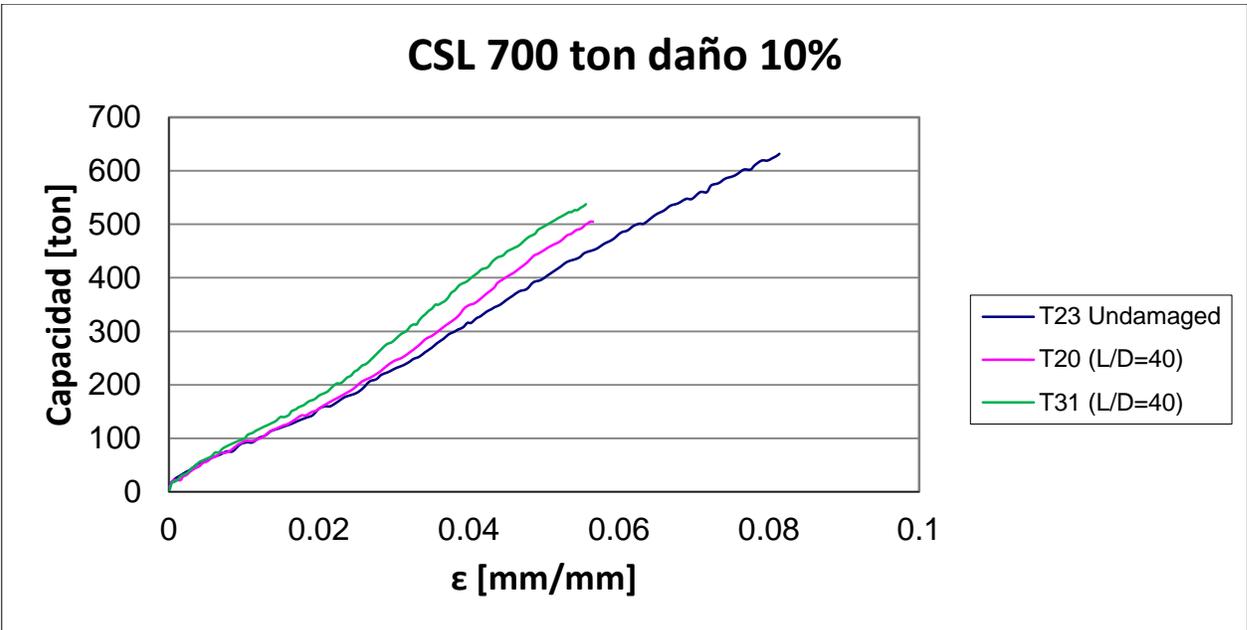


Grafico C-11: Curva Capacidad-deformación ensayo para cable CSL 700 ton y 10% de daño