



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

**ANÁLISIS DE CABLES SUPERFICIALMENTE DAÑADOS EN FORMA
ASIMÉTRICA CON GEOMETRÍA MULTICAPA: MODELOS NUMÉRICOS EN
ELEMENTOS FINITOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ISMAEL CRISTIÁN SILVA VIGNEAUX

**PROFESOR GUÍA:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAFAEL RUIZ GARCÍA
RICARDO HERRERA MARDONES**

**SANTIAGO DE CHILE
2017**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: ISMAEL SILVA VIGNEAUX
FECHA: 13 DE NOVIEMBRE DE 2017
PROFESOR GUÍA: JUAN FELIPE BELTRÁN

ANÁLISIS DE CABLES SUPERFICIALMENTE DAÑADOS EN FORMA ASIMÉTRICA CON GEOMETRÍA MULTICAPA: MODELOS NUMÉRICOS EN ELEMENTOS FINITOS

El trabajo de esta memoria tiene por finalidad analizar el impacto del daño y la geometría de un cable en la resistencia residual que éste presente. Los cables son elementos estructurales ampliamente usados y es importante caracterizarlos apropiadamente y validar ecuaciones analíticas que se han planteado hasta ahora.

Para poder realizar este trabajo se realizan ocho modelos 3D en el programa ANSYS de elementos finitos (EF) que representarán una misma configuración geométrica de cable para dos diámetros con tres niveles de daño distintos cada uno, además del caso no dañado. El nivel de daño se cuantifica en función del índice de asimetría (IA) de la sección y la pérdida porcentual de área neta. La configuración geométrica de los cables analizados es 1x19 (1+6+12: una fibra en el núcleo, seis en la segunda capa, doce en la tercera) y los diámetros son 3,5 y 22,22 mm. Los cables se someten a un desplazamiento axial monotónico incremental en uno de sus extremos, los que están restringidos al giro. Para elaborar los modelos en EF se utilizaron elementos cúbicos de ocho nodos con interpolaciones lineales entre ellos como mallado de los componentes. Se utilizó coeficiente de fricción de 0,115 entre fibras. Para simular el daño se eliminaron los alambres de la sección que presentarían rotura en la realidad.

Se validó el análisis seccional, es decir, alejado una cierta distancia de las condiciones de apoyo, la distribución de tensiones y deformaciones se comporta invariante a lo largo del resto del eje del cable. Las interacciones de contacto juegan un rol fundamental a la hora de cuantificar la carga y capacidad de deformación última de los cables, además de disminuir su rigidez, comparado con modelos simplificados que no incorporan estos efectos. Se observó que la asimetría del daño impacta directamente en la capacidad última de deformación del cable, disminuyendo ésta al aumentar el IA. Es posible aproximar la rigidez de un cable a través de modelos simplificados o del modelo EF sin daño de manera satisfactoria. Existen efectos de flexión local en las fibras externas producto del contacto entre capas. Además, se presenta una deformación por flexión global de forma radial en los casos que presentan asimetría de daño. El cálculo de capacidad a través de las ecuaciones analíticas de área neta sobreestima la carga última de los cables. En líneas similares, la resistencia residual de los cables disminuye en mayor tasa que la pérdida de área neta. Los resultados muestran mayores presiones inter-fibra y mayores gradientes de tensiones y deformaciones cuando el cable posee un mayor diámetro de sus componentes.

DEDICATORIA

A todos.

AGRADECIMIENTO

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

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.2.1	<i>OBJETIVO GENERAL</i>	2
1.2.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	2
1.3	METODOLOGÍA.....	3
1.4	ALCANCE DE LOS CAPÍTULOS.....	4
2	CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	ESTUDIOS PREVIOS DE CABLES.....	5
2.2	CRITERIOS DE DESCARTE EN LA INDUSTRIA.....	16
3	CAPÍTULO 3: GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LOS CABLES	20
3.1	CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS CABLES DE ACERO.....	20
3.2	GEOMETRÍA DE LOS CABLES A ESTUDIAR.....	21
3.3	MODELO ESTRUCTURAL.....	23
3.4	ÍNDICE DE ASIMETRÍA DE LA SECCIÓN.....	24
3.5	IMPACTO DEL DAÑO ASIMÉTRICO.....	25
3.6	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	26
4	CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO DE CABLES EN ANSYS	28
4.1	DEFINICIONES GENERALES EN ANSYS.....	28
4.1.1	<i>DEFINICIÓN DEL MATERIAL</i>	28
4.1.2	<i>INTERACCIONES DE CONTACTO</i>	28
4.1.3	<i>ELEMENTOS FINITOS</i>	33
4.1.4	<i>MALLADO</i>	35
4.2	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS.....	38
4.2.1	<i>GEOMETRÍA DEL MODELO</i>	38
4.2.2	<i>CONDICIONES DE BORDE DE LOS MODELOS</i>	39
4.2.3	<i>SIMULACIÓN DEL DAÑO EN LOS MODELOS</i>	40
4.2.4	<i>MALLADO DE LOS MODELOS</i>	41
4.2.5	<i>CRITERIO DE FALLA</i>	43
5	CAPÍTULO 5: RESULTADOS MODELOS EN ANSYS	44
5.1	VALIDACIÓN HIPÓTESIS DE ANÁLISIS SECCIONAL.....	44
5.2	DEFORMADA DEL CABLE.....	49
5.3	CAPACIDAD DE CARGA.....	57
5.4	RIGIDEZ ELÁSTICA Y PLÁSTICA.....	64
5.5	TENSIONES Y DEFORMACIONES.....	67
5.5.1	<i>TENSIONES Y DEFORMACIONES TOTALES</i>	67
5.5.2	<i>INICIO DE PLASTIFICACIÓN POR CAPA</i>	76
5.5.3	<i>PRESIONES DE CONTACTO</i>	79
5.5.4	<i>GRADIENTES DE TENSIONES Y DEFORMACIONES ÚLTIMOS</i>	80
6	CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	88
7	BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3-1: CONFIGURACIÓN DE CABLE GALGO DE DIÁMETRO 3,5 MM.	23
TABLA 3-2: CONFIGURACIÓN DE CABLE RETENIDAS DE DIÁMETRO 7/8".	23
TABLA 3-3: IA Y DAÑO DE LAS SECCIONES DAÑADAS A ESTUDIAR.	24
TABLA 3-4: DISTANCIA AL CENTRO DE RIGIDEZ PARA CADA SECCIÓN DAÑADA.	25
TABLA 3-5: RESULTADOS ENSAYO MATERIAL PARA LEY CONSTITUTIVA.	27
TABLA 4-1: PROPIEDADES DEL ACERO ESTRUCTURAL A UTILIZAR EN MODELOS EF.	28
TABLA 4-2: RESUMEN DE LAS MÉTRICAS DEL MALLADO.	38
TABLA 4-3: CALIDAD DE MALLADO DE LOS MODELOS.	42
TABLA 5-1: TASA DE DESPLAZAMIENTO RADIAL NORMALIZADA PARA CADA DIÁMETRO Y EL PROMEDIO DE AMBOS, PARA CADA ÍNDICE DE ASIMETRÍA.	54
TABLA 5-2: DEFORMACIÓN AXIAL PARA LA QUE SE SUPERA EL GAP SEGÚN ISO4309.	56
TABLA 5-3: CAPACIDADES ÚLTIMAS CABLE D=3,5 MM.	59
TABLA 5-4: CAPACIDADES ÚLTIMAS CABLE D=22,22 MM.	59
TABLA 5-5: PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE CARGA SEGÚN PORCENTAJE DE DAÑO.	61
TABLA 5-6: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA CABLE D=3,5 MM.	66
TABLA 5-7: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA CABLE D=22,22 MM.	66
TABLA 5-8: RIGIDEZ ELÁSTICA Y PLÁSTICA PARA CASOS DAÑADOS POR FEM Y POR ANM, CABLE D=3,5 MM.	67
TABLA 5-9: RIGIDEZ ELÁSTICA Y PLÁSTICA POR FEM Y POR ANM, CABLE D=22,22 MM.	67
TABLA 5-10: DEFORMACIÓN AXIAL DEL CABLE AL PUNTO DE APARICIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EQUIVALENTES EN FIBRAS DE CADA CAPA.	78
TABLA 5-11: PRESIONES DE CONTACTO MÁXIMAS ENTRE FIBRAS PARA CASOS DE ESTUDIO.	79
TABLA 5-12: GRADIENTE DE TENSIONES ÚLTIMAS CABLE D=3,5 MM.	83
TABLA 5-13: GRADIENTE DE TENSIONES ÚLTIMAS CABLE D=22,22 MM.	83
TABLA 5-14: GRADIENTE DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS CABLE D=3,5 MM.	87
TABLA 5-15: GRADIENTE DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS CABLE D=22,22 MM.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE CABLE 1X19.	3
FIGURA 2.1: RIGIDEZ AXIAL, $k_{\epsilon\epsilon}$, VERSUS ÁNGULO DE HÉLICE, α , (GOREISHI, 2007).	7
FIGURA 2.2: REDUCCIÓN EN CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN (A) Y GRADIENTE DE TENSIONES (B) EN LOS CABLES ANALIZADOS (BRAVO ET AL., 2016).	9
FIGURA 2.3: ESQUEMA DE LA “REBANADA” Y LOS PUNTOS DE LAS CONDICIONES DE BORDE (JIANG ET AL., 1998).	10
FIGURA 2.4: CONCENTRACIONES DE TENSIONES POR FLEXIÓN LOCAL DE LAS FIBRAS (JUDGE ET AL., 2010).	12
FIGURA 2.5: HEBRA DE LA CUERDA WS (A) Y CUERDA WS COMPUESTA POR LAS HEBRAS Y EL NÚCLEO POLIMÉRICO (B) (FONTANARI ET AL., 2014).	14
FIGURA 2.6: CARGA AXIAL VS DESPLAZAMIENTO, LARGO DE CABLE $L = 192,503$ MM (FEDORKO ET AL., 2014).	15
FIGURA 2.7: CARGA AXIAL V/S DEFORMACIÓN AXIAL PARA CABLE DE 7 FIBRAS (A) Y CABLE DE 120 FIBRAS (B) (LALONDE ET AL., 2017).	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURA 2.8: DIAGRAMA QUE MUESTRA LOS PARÁMETROS A CONSIDERAR AL ESTUDIAR EL DESCARTE DE CABLES POR ONDULAMIENTO (ISO4309, 2010).	18
FIGURA 2.9: REDUCCIÓN DE CAPACIDAD VERSUS REDUCCIÓN DE ÁREA (ZYL, 2000) A LA QUE SE LE TRAZÓ LA RECTA CON RAZÓN 1:1.	19
FIGURA 3.1: CONFIGURACIÓN GENERAL DE UN CABLE (VARGAS, 2010).	20
FIGURA 3.2: DISPOSICIÓN DE LANG (IZQUIERDA) Y REGULAR (DERECHA) (SITIO WEB VEROPE.CO).	21
FIGURA 3.3: PARÁMETROS LONGITUDINALES DE UN CABLE (BELTRÁN, 2006).	22
FIGURA 3.4: SECCIÓN TRANSVERSAL CABLES A ESTUDIAR.	22
FIGURA 3.5: MODELO ESTRUCTURAL A ANALIZAR (DE VICO, 2013).	24
FIGURA 3.6: (A) FUERZAS RADIALES SOBRE EL NÚCLEO, (B) DEFLEXIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL Y (C) DEFLEXIÓN DEL EJE DEL CABLE (MACDOUGALL Y BARTLETT, 2006). .	25
FIGURA 3.7: ENSAYO LEY CONSTITUTIVA MATERIAL (BRAVO, 2017).	26
FIGURA 4.1: ESQUEMA REFERENCIAL DE LAS INTERACCIONES DE CONTACTO (ANSYS REFERENCE).	29
FIGURA 4.2: MODELO FRICCIONAL (ANSYS REFERENCE).	30
FIGURA 4.3: MODELO DE DECAIMIENTO DEL COEFICIENTE FRICCIONAL (ANSYS REFERENCE). .	31
FIGURA 4.4: ELEMENTO SOLID186 (ANSYS REFERENCE).	33
FIGURA 4.5: ELEMENTO ESQUEMÁTICO DEL CONTA173 (ANSYS REFERENCE).	34
FIGURA 4.6: INTERACCIÓN ENTRE CONTA174 Y TARGE170 (ANSYS REFERENCE).	34
FIGURA 4.7: RAZÓN DE ASPECTO PARA CUADRILÁTEROS (ANSYS REFERENCE).	35
FIGURA 4.8: RAZONES JACOBIANAS PARA CUADRILÁTEROS LINEALES (ANSYS REFERENCE)...	36
FIGURA 4.9: FACTORES DE TORSIÓN PARA CÁSCARAS (A) Y PARA TETRAEDROS (B) (ANSYS REFERENCE).	36
FIGURA 4.10: DESVIACIÓN PARALELA PARA CUADRILÁTEROS (ANSYS REFERENCE).	36
FIGURA 4.11: MÁXIMOS ÁNGULOS DE ESQUINA PARA CUADRILÁTEROS (ANSYS REFERENCE)...	37
FIGURA 4.12: CUADRILÁTERO IDEAL Y OBLICUO (ANSYS REFERENCE).	37
FIGURA 4.13: VECTORES UTILIZADOS PARA COMPUTAR LA CALIDAD ORTOGONAL DE UNA CELDA (ANSYS REFERENCE).	37

FIGURA 4.14: GEOMETRÍA DE UN CABLE GENERADA EN AUTOCAD.	38
FIGURA 4.15: COMPORTAMIENTO DE CABLE CON 2 ELEMENTOS DAÑADOS A DEFORMACIÓN AXIAL DE (A) 0,46%, (B) 2,1% Y (C) 4,9%.	40
FIGURA 4.16: DEFORMACIONES PLÁSTICAS DE CABLE CON 2 ELEMENTOS DAÑADOS A DEFORMACIÓN AXIAL DE 1,19% PARA (A) ELEMENTOS DAÑADOS PRESENTES EN MODELO Y (B) ELEMENTOS DAÑADOS OMITIDOS DEL MODELO.....	41
FIGURA 4.17: MALLADO DE LOS MODELOS.....	42
FIGURA 5.1: SECCIONES TRANSVERSALES ESTUDIADAS PARA VERIFICACIÓN DE ANÁLISIS SECCIONAL.	44
FIGURA 5.2: TENSIONES EQUIVALENTES PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=3,9\%$ EN SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) PARA ZONA 1/4 L_0 CABLE $D=3,5$ MM SIN DAÑO.	45
FIGURA 5.3: TENSIONES EQUIVALENTES PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=3,9\%$ EN SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) PARA ZONA 2/4 L_0 CABLE $D=3,5$ MM SIN DAÑO.	45
FIGURA 5.4: TENSIONES EQUIVALENTES PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=3,9\%$ EN SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) PARA ZONA 3/4 L_0 CABLE $D=3,5$ MM SIN DAÑO.	45
FIGURA 5.5: TENSIONES EQUIVALENTES EN CAPA EXTERNA DE FIBRAS PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=3,9\%$ DE CABLE $D=3,5$ MM SIN DAÑO.....	46
FIGURA 5.6: TENSIONES EQUIVALENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA SECCIONES A 1/4, 2/4 Y 3/4 DE LARGO DE CABLE A VARIACIÓN DE DEFORMACIÓN AXIAL DEL ESPÉCIMEN SIN DAÑO.....	46
FIGURA 5.7: TENSIONES EQUIVALENTES PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=2,7\%$ EN SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) PARA ZONA 1/4 L_0 CABLE $D=3,5$ MM CON DOS FIBRAS DAÑAS ASIMÉTRICAMENTE.	47
FIGURA 5.8: TENSIONES EQUIVALENTES PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=2,7\%$ EN SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) PARA ZONA 2/4 L_0 CABLE $D=3,5$ MM CON DOS FIBRAS DAÑAS ASIMÉTRICAMENTE.	47
FIGURA 5.9: TENSIONES EQUIVALENTES PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=2,7\%$ EN SECCIÓN LONGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) PARA ZONA 3/4 L_0 CABLE $D=3,5$ MM CON DOS FIBRAS DAÑADAS.....	47
FIGURA 5.10: TENSIONES EQUIVALENTES EN CAPA EXTERNA DE FIBRAS PARA DEFORMACIÓN AXIAL $\varepsilon=2,7\%$ DE CABLE $D=3,5$ MM CON DOS FIBRAS DAÑAS ASIMÉTRICAMENTE.	48
FIGURA 5.11: TENSIONES EQUIVALENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PARA SECCIONES A 1/4, 2/4 Y 3/4 DE LARGO DE CABLE A VARIACIÓN DE DEFORMACIÓN AXIAL DEL ESPÉCIMEN CON DAÑO.	48
FIGURA 5.12: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=3,5$ MM SIN DAÑO (SD).....	49
FIGURA 5.13: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=3,5$ MM CON UNA FIBRA DAÑADA (D1).	50
FIGURA 5.14: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=3,5$ MM CON DOS FIBRAS DAÑADAS (D2).	50
FIGURA 5.15: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=3,5$ MM CON SEIS ELEMENTOS DAÑADOS (D6).	50
FIGURA 5.16: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=22,22$ MM SIN DAÑO (SD). ...	51
FIGURA 5.17: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=22,22$ MM CON UN ELEMENTO DAÑADO (D1).	51
FIGURA 5.18: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE $D=22,22$ MM CON DOS ELEMENTOS DAÑADOS (D2).	52

FIGURA 5.19: DEFORMACIÓN RADIAL [MM] ÚLTIMA DE CABLE D=22,22 MM CON SEIS ELEMENTOS DAÑADOS (D6).....	52
FIGURA 5.20: DESPLAZAMIENTO RADIAL MÁXIMO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN AXIAL DE CASOS DAÑADOS D=3,5 MM.....	53
FIGURA 5.21: DESPLAZAMIENTO RADIAL MÁXIMO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN AXIAL DE CASOS DAÑADOS D=22,22 MM.	53
FIGURA 5.22: TASA DE DESPLAZAMIENTO RADIAL NORMALIZADA, PROMEDIO DE AMBOS CABLES, EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE ASIMETRÍA.	54
FIGURA 5.23: GAP PARA CABLE D=3,5 MM.	55
FIGURA 5.24: GAP PARA CABLE D=22,22 MM.....	56
FIGURA 5.25: CARGA V/S DEFORMACIÓN AXIAL PARA CABLE D=3,5 MM.....	57
FIGURA 5.26: CARGA V/S DEFORMACIÓN AXIAL PARA CABLE D=22,22 MM.	58
FIGURA 5.27: RAZONES DE CAPACIDAD DE CARGA EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE ASIMETRÍA.	60
FIGURA 5.28: RAZONES DE CAPACIDAD DE CARGA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE DAÑO.	60
FIGURA 5.29: CURVA DE CAPACIDAD PARA FEM Y ANM, CABLE D=3,5 MM.	61
FIGURA 5.30: CURVA DE CAPACIDAD PARA FEM Y ANM, CABLE D=22,22 MM.....	62
FIGURA 5.31: CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN AXIAL ÚLTIMA EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE ASIMETRÍA.....	62
FIGURA 5.32: BRAZO A PUNTO DE MÁXIMA TRACCIÓN DE LA SECCIÓN DAÑADA, CABLE D=3,5 MM.	63
FIGURA 5.33: BRAZO A PUNTO DE MÁXIMA TRACCIÓN DE LA SECCIÓN DAÑADA, CABLE D=22,22 MM.....	63
FIGURA 5.34: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA SD D=3,5 MM.	64
FIGURA 5.35: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA 1D D=3,5 MM.....	64
FIGURA 5.36: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA 2D D=3,5 MM.	65
FIGURA 5.37: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA 6D D=3,5 MM.	65
FIGURA 5.38: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA SD D=22, 22 MM.	65
FIGURA 5.39: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA 1D D=22,22 MM.	65
FIGURA 5.40: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA 2D D=22,22 MM.....	66
FIGURA 5.41: RIGIDEZ AXIAL ELÁSTICA 6D D=22,22 MM.	66
FIGURA 5.42: TENSIONES EQUIVALENTES (MPa) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE E=0,2% Y E=0,4% (RANGO ELÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, D=3,5 MM. ...	68
FIGURA 5.43: TENSIONES EQUIVALENTES (MPa) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE E=1% Y E=4% (RANGO PLÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, D=3,5 MM.	69
FIGURA 5.44: DEFORMACIONES TOTALES EQUIVALENTES (MM/MM) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE E=0,2% Y E=0,4% (RANGO ELÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, D=3,5 MM.	70
FIGURA 5.45: DEFORMACIONES TOTALES EQUIVALENTES (MM/MM) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE E=1% Y E=4% (RANGO PLÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, D=3,5 MM.	71
FIGURA 5.46: TENSIONES EQUIVALENTES (MPa) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE E=0,2% Y E=0,4% (RANGO ELÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, D=22,22 MM.....	72
FIGURA 5.47: TENSIONES EQUIVALENTES (MPa) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE E=1% Y E=4% (RANGO PLÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, D=22,22 MM.....	73

FIGURA 5.48: DEFORMACIONES TOTALES EQUIVALENTES (MM/MM) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE $E=0,2\%$ Y $E=0,4\%$ (RANGO ELÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, $D=22,22$ MM.	74
FIGURA 5.49: DEFORMACIONES TOTALES EQUIVALENTES (MM/MM) PARA DEFORMACIONES AXIALES DE $E=1\%$ Y $E=4\%$ (RANGO PLÁSTICO DEL CABLE) EN LAS CUATRO CONFIGURACIONES, $D=22,22$ MM.	75
FIGURA 5.50: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,31\%$, (B) F2 A $E=0,4\%$ Y (C) F3 $E=0,59\%$, CABLE SD $D=3,5$ MM.	77
FIGURA 5.51: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,33\%$, (B) F2 A $E=0,46\%$ Y (C) F3 $E=0,53\%$, CABLE D1 $D=3,5$ MM.	77
FIGURA 5.52: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,32\%$, (B) F2 A $E=0,43\%$ Y (C) F3 $E=0,48\%$, CABLE D2 $D=3,5$ MM.	77
FIGURA 5.53: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,43\%$, (B) F2 A $E=0,52\%$ Y (C) F3 $E=0,59\%$, CABLE D6 $D=3,5$ MM.	77
FIGURA 5.54: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,31\%$, (B) F2 A $E=0,4\%$ Y (C) F3 $E=0,59\%$, CABLE SD $D=22,22$ MM.	78
FIGURA 5.55: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,33\%$, (B) F2 A $E=0,46\%$ Y (C) F3 $E=0,53\%$, CABLE D1 $D=22,22$ MM.	78
FIGURA 5.56: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,32\%$, (B) F2 A $E=0,43\%$ Y (C) F3 $E=0,48\%$, CABLE D2 $D=22,22$ MM.	78
FIGURA 5.57: DEFORMACIONES PLÁSTICAS INICIALES PARA (A) F1 A $E=0,43\%$, (B) F2 A $E=0,52\%$ Y (C) F3 $E=0,59\%$, CABLE D6 $D=22,22$ MM.	78
FIGURA 5.58: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE SD $D=3,5$ MM.	81
FIGURA 5.59: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D1 $D=3,5$ MM.	81
FIGURA 5.60: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D2 $D=3,5$ MM.	81
FIGURA 5.61: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D6 $D=3,5$ MM.	82
FIGURA 5.62: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE SD $D=22,22$ MM.	82
FIGURA 5.63: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D1 $D=22,22$ MM.	82
FIGURA 5.64: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D2 $D=22,22$ MM.	83
FIGURA 5.65: GRADIENTES DE ESFUERZOS ÚLTIMOS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D6 $D=22,22$ MM.	83
FIGURA 5.66: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE SD $D=3,5$ MM.	84
FIGURA 5.67: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D1 $D=3,5$ MM.	84
FIGURA 5.68: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D2 $D=3,5$ MM.	85

FIGURA 5.69: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D6 D=3,5 MM.	85
FIGURA 5.70: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE SD D=22,22 MM.	85
FIGURA 5.71: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D1 D=22,22 MM.	86
FIGURA 5.72: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D2 D=22,22 MM.	86
FIGURA 5.73: GRADIENTES DE DEFORMACIONES ÚLTIMAS (A) EQUIVALENTES Y (B) AXIALES, CABLE D6 D=22,22 MM.	86

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Los cables son elementos estructurales ampliamente usados en el mundo de la construcción. Algunos de sus usos más comunes son como parte estructural de grúas, puentes, elevadores o anclajes de plataformas. Su geometría puede ser muy variada, al igual que el material usado para su elaboración. Se pueden presentar con distintos niveles y capas de fibras que los compongan y pueden ser de acero, aluminio o materiales sintéticos, como el poliéster, por ejemplo. La conformación geométrica de estas fibras generalmente es helicoidal.

La razón por la que los cables sean un elemento estructural fundamental para ciertas estructuras y mecanismos es que poseen cualidades únicas que los hacen ideales para algunos usos en particular: poseen una alta resistencia y rigidez axial, sin poseer tener un peso tan elevado; su rigidez flexural es muy baja en comparación con la axial, lo que los hace muy flexibles, manipulables y de fácil transporte, sobre todo cuando se requieren largas extensiones de éstos ([1]).

Otra gran característica de los cables es la aislación del daño dentro de una sección transversal. Mientras que en una sección de acero continua una grieta produce una singularidad que concentra tensiones haciendo que la misma fisura se propague con incrementos de carga, en un cable el daño o rotura de una fibra no genera singularidades que concentren tensión en el resto de los componentes sino sólo una redistribución de esfuerzos y reacomodamiento de los miembros a lo largo del elemento, lo que los hace sumamente dúctiles ([2]–[4]).

Uno de los desafíos que se presentan actualmente es poder comprender el comportamiento último de un cable una vez que presenta roturas en uno o varios de sus componentes. Esto supondría un ajuste de los criterios de descarte que existen hoy en día en la industria [5], donde se observa que, en la gran mayoría de los casos, los únicos parámetros a considerar al momento de decidir si un cable requiere reparación o recambio es el cambio en el área neta o ondulamiento de su eje. De acuerdo a los estudios realizados en los últimos años, factores como la distribución del daño en la sección transversal o el diámetro de los elementos juegan un rol importante a la hora de determinar cuanta resistencia residual dispone el cable una vez que comienza a perder su integridad ([2], [4], [6]–[9]).

Desde el punto de vista del análisis estructural, los cables son siempre considerados como elementos que sólo trabajan ante cargas axiales y se desprecian todos los demás esfuerzos. Sin embargo, el hecho de que los cables se configuren que con fibras helicoides que rotan en torno a su eje central, hace que los efectos de corte, flexión, fricción y presión de contacto dejen de ser despreciables, en particular cuando algunas de las hebras se encuentran dañadas. En esos casos, el análisis puramente axial no representa de manera realista las tensiones y esfuerzos a los que se somete el espécimen ([1], [6], [10]).

De lo anterior se desprende que el comportamiento de los cables es una materia que todavía se estudia puesto que, hasta el momento, no se comprende del todo. Existen algunos modelos analíticos que pretenden explicarlo tanto para casos de cables vírgenes como con elementos dañados, sin embargo, la validación experimental de estos modelos es escasa.

La resolución analítica que existe hasta ahora proviene principalmente de abordar el problema del cable de manera 2D (sección transversal del cable), tanto de manera lineal como no lineal. Para esto se toma en consideración su sección transversal y las características del material. Las variaciones en cuanto a los resultados obtenidos a través de estos modelos provienen principalmente de las condiciones de borde, la geometría y los diferentes esfuerzos e interacciones de y entre las fibras que se consideran o desprecian al momento de plantear las ecuaciones ([2], [3], [6], [8], [10]).

El análisis a través de elementos finitos (EF), si bien numérico, simplificado e idealizado, entrega resultados robustos que se acercan al comportamiento real de los objetos estudiados, siempre que el modelo que se elabore y los parámetros que se utilicen estén ajustados de manera correcta. Es importante tener en consideración los recursos computacionales finitos con lo que se cuenta; un modelo más fiel a la realidad, con mallados más pequeños, significa una necesidad muy alta de recursos, lo que podría significar que el programa no pudiese lograr completar el análisis requerido. Así es como se busca lograr una configuración óptima que arroje buenos resultados sin ser tan costosa computacionalmente. Por esto mismo es que se pretende utilizar esta metodología tecnológica para simular los cables y sus niveles de daño ante un desplazamiento monotónico impuesto (obtención de curva de capacidad).

A modo general, se modelará una misma geometría de cable, pero variando el diámetro de sus elementos y se le impondrá a cada uno de ellos distintas configuraciones de daño. Con esto también se podrán contrastar los resultados con los criterios aplicados actualmente en la industria para evaluar el desempeño de estos elementos estructurales ante el daño y considerar su eventual reemplazo y/o reparación.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar cuatro configuraciones de cables de dos diámetros distintos mediante modelos 3D de EF utilizando el software *ANSYS* [11],[12]. Estos cables tienen una geometría multicapa (tres capas, según se explica más adelante) y presentan una distribución del daño variable y asimétrica en su superficie.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el impacto del diámetro en la respuesta de cables dañados superficialmente.
- Estudiar si el daño superficial induce una dependencia longitudinal en la distribución de tensiones/deformaciones.

- Estudiar la distribución de tensiones y deformaciones en la sección de un cable dañado asimétricamente en su superficie.
- Contrastar resultados con modelo mecánico analítico en rango lineal elástico.

1.3 METODOLOGÍA

Se comenzará por hacer una revisión bibliográfica de los distintos modelos analíticos y numéricos que se han hecho con el fin de estudiar el comportamiento de cables. Además, se revisarán los criterios de descarte de cables que se utilizan actualmente en la industria, de manera de conocer qué variables se consideran, bajo qué supuestos y con qué finalidad se aplican.

Con el fin de acotar el estudio y los alcances del presente trabajo, se elige una configuración en particular de cables para analizar. En este caso es una geometría denominada 1x19 o 1+6+12 (una fibra central, seis fibras en la segunda capa y doce en la tercera capa) (Figura 1.1).

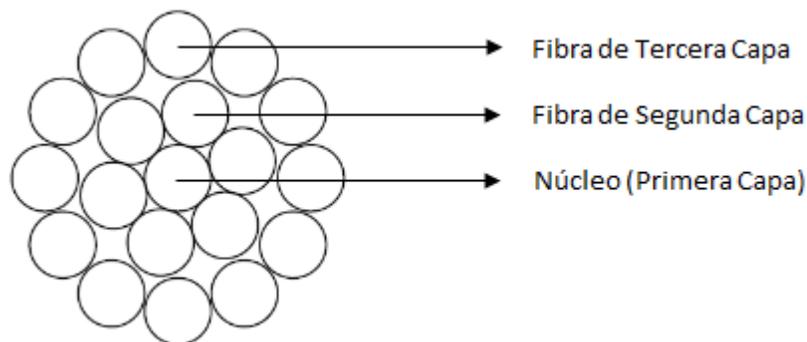


Figura 1.1: Configuración geométrica de cable 1x19.

Puesto que el estudio pretende tener impacto en la industria, se eligen dos diámetros de cable comerciales: 3,5 mm y 22,22 mm. Esto permitiría eventualmente interpolar resultados para diámetros dentro de ese rango. A su vez, se seleccionan tres configuraciones de daño distintas que permitan tener tres niveles de índice de asimetría de daño distintos, además de modelar el espécimen virgen.

Luego, se generan los modelos 3D para cada cable y cada configuración de daño (en total ocho) utilizando el programa ANSYS para EF. En un principio, para obtener la geometría del modelo, se utiliza AutoCAD para el diseño geométrico de los cables y luego se importa a ANSYS.

Se empotra cada cable en uno de los extremos y se genera un apoyo deslizante en el extremo opuesto, donde se impone un desplazamiento monotónico incremental que se lleva hasta el punto en que alguno de los componentes del cable cumpla con el criterio de falla definido para el estudio.

Los resultados de deformación, carga y distribución de tensiones en los cables se contrastan entre ellos y modelos analíticos propuestos previamente por otros autores.

1.4 ALCANCE DE LOS CAPÍTULOS

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión pretende mostrar al lector los estudios previos que se han realizado en cables que han permitido caracterizar su comportamiento estático. Estos trabajos abarcan tanto modelos mecánico analíticos como numéricos. También se incluye una revisión de los criterios de descarte de cables en la industria.

CAPÍTULO 3: GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LOS CABLES

El Capítulo 3 es de utilidad para el lector que no está familiarizado con los cables – en particular de acero-, en cuanto a su geometría y configuración, además de la caracterización del daño. Se incluyen también las características del material.

CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO DE CABLES EN ANSYS

El Capítulo 3 explica todas las variables y parámetros que entran en juego en los modelos de EF en ANSYS, mostrando también las configuraciones dentro del programa y el funcionamiento de éste. Se detallan las características de cada uno de los modelos a estudiar.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS DE LOS MODELOS EN ANSYS

Se presentan los resultados obtenidos para los ocho modelos analizados, con gráficos y tablas comparativas que permitan contrastar los resultados entre los distintos modelos.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Se analizan todos los resultados que se obtuvieron de manera de buscar correlaciones en los distintos parámetros que varían para cada cable. Se intenta validar o refutar la hipótesis inicial del presente trabajo.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estudios Previos de Cables

La funcionalidad y utilidad de los cables es incuestionable. Ya sea en mecanismos como en estructuras estáticas, su versatilidad y resistencia los hacen elementos imprescindibles en la industria. Sin embargo, las propiedades físicas que rigen su conducta no se conocen a cabalidad, por lo que estudiarlas se vuelve un aspecto fundamental puesto que dicho conocimiento permitiría predecir su comportamiento en variados escenarios, ya sean ciclos de carga complejos o factores externos que dañen al cable y hagan que éste pierda parte de su resistencia ([13], [14]).

Desde un principio, el enfoque siempre ha sido poder distinguir cuáles son los parámetros que rigen el comportamiento del cable, ya sea en su estado íntegro, como cuando éste pierde sus cualidades geométricas iniciales, es decir, cuando presenta algún tipo de daño. En particular, son las interacciones de contacto entre los elementos, y el nivel de daño y la distribución de éste dentro de la sección transversal los factores que se consideran más importantes al momento de realizar los análisis y estudios, como se verá en la presente sección.

Diversos autores han realizado ensayos experimentales que luego contrastan con modelos mecánicos para el análisis de los cables, tanto de acero como también de poliéster (fibra sintética). Li et al. [15] ensayaron varias cuerdas de poliéster de dimensiones pequeñas (6 a 13 mm), con especial énfasis en estudiar la tolerancia al daño de éstas (relacionada con la capacidad de carga, deformación del material y torque al punto de falla). Para esto, se cortaron elementos y subcuerdas que componían dichos cables. Luego, basados en la teoría de mecánica de cuerdas, desarrollaron un método analítico aproximado que desprecia el efecto de los elementos cortados (sólo considera el área neta) para evaluar la fuerza residual de las cuerdas dañadas y no dañadas. Los resultados experimentales y analíticos fueron contrastados, mostrando que estos últimos pueden proveer una descripción aproximada de primer orden de la transferencia de cargas de las muestras estudiadas. Además, concluyen que el daño asimétrico genera gradientes de tensiones en la sección transversal de las cuerdas.

Otros autores, como Beltrán y Williamson [8], [9] se han enfocado en el desarrollo de modelos mecánicos predictivos del comportamiento de cuerdas sintéticas. Computacionalmente resolvieron ecuaciones analíticas que incorporan no linealidades geométricas y de material, además de un índice de daño (D) - definido en base a una función de daño escalar acumulativo - el que se formuló según tres parámetros, los que fueron respectivamente calibrados: la razón del módulo secante se utilizó para calibrar una ley de potencia; la desviación de la energía de deformación calibró las leyes de daño polinomial; finalmente, el “ablandamiento” de la cuerda se simuló a través de un método de perturbación. Las comparaciones con datos experimentales y modelos en EF muestran que el modelo predice de buena manera el comportamiento de los cables de poliéster, tanto en casos dañados como no dañados, sobreestimando levemente las cargas máximas

de los especímenes. Además, fue posible notar que se generan concentraciones de tensión en las cercanías de la sección dañada.

En una línea similar, MacDougall y Bartlett [6], en 2005, extendieron un modelo realizado por Machida y Durelli [10], en este caso, para cables de acero de una capa de fibras, enfocados en el estudio de tendones para losas postensadas, con siete fibras (1+6: una central y seis helicoidales), que presentaban daño con distribución simétrica en algunos de sus elementos, con la intención de caracterizar la fricción inter-fibra y las fuerzas de contacto con el hormigón circundante. Este modelo asume que, una vez dañada una de las fibras, ésta se mantiene en contacto con la central, logrando una recuperación de tensiones en los alambres dañados a medida que se distancia del punto de falla, gracias a la fricción inter-elemento. Para desarrollar el modelo, los autores realizan los siguientes pasos: la resolución de la ecuación diferencial de la variación de la fuerza axial y del cálculo de las deformaciones unitarias en los elementos no dañados; la derivación de la variación de la fuerza en los dañados; la computación del largo afectado; y finalmente de la derivación de los pre-esfuerzos remanentes después del corte de los elementos. El modelo luego es validado a través de ensayos experimentales. La principal conclusión del trabajo es que un coeficiente de fricción de 0,164 se puede utilizar para predecir el comportamiento de cables no corroídos con fibras cortadas de manera simétrica.

Posteriormente, también MacDougall y Bartlett [7], el año 2006, extendieron su estudio realizado en 2005 al caso en que existe daño asimétrico, gracias a la pérdida de una de las fibras de su espécimen. Los autores presentaron ecuaciones que permiten cuantificar la deformación unitaria a lo largo de cada uno de los alambres sin romper, calcular el largo afectado (tramo del cable en que la fuerza del alambre roto no se ha igualado, producto de la recuperación, con la del resto de los de la segunda capa), y las pretensiones remanentes después de que el quiebre ocurre. Para validar estas ecuaciones analíticas, MacDougall y Barlett realizaron ensayos con tendones de acero de 18,3 m de largo y 9, 13, y 15 mm de diámetro. Utilizando el mismo factor de fricción obtenido en su estudio anterior [6], $\mu = 0,16$, obtuvieron valores de deformación máxima en las fibras vírgenes con una diferencia de un 5% con respecto a lo obtenido experimentalmente, observando que existe un gradiente de deformaciones en la sección transversal del cable, donde las fibras vecinas al daño son más elongadas, mientras que la opuesta al daño presenta menores deformaciones. Por otra parte, las pretensiones remanentes fueron predichas con un margen de error de $\pm 3\%$. Además, el modelo es capaz de predecir la existencia de mayores deformaciones la fibra cortada a medida que se aleja del punto de rotura, mostrando que existe recuperación de carga en este alambre producto de la fricción con el núcleo.

Los trabajos antes mencionados suponen una complejidad en el planteamiento y resolución analítica del problema de cables bastante alta, que se ha estudiado en profundidad en las últimas décadas. Sin embargo, el estudio de los cables se remonta a más de medio siglo atrás, donde diversos autores comenzaron a proponer ecuaciones simplificadas que permitieran comprender el comportamiento de estos elementos estructurales de mejor manera. Es así como Ghoreishi et al. [16] realizaron una

recopilación de nueve modelos analíticos que abarcan trabajos desde el año 1951 hasta 1998. A través de una resolución computacional de dichos modelos, los autores hacen una comparación de los valores obtenidos con modelos numéricos en EF en 3D, estudiando el caso de un cable con configuración 1+6, sujetos a cargas axiales estáticas, con ángulos de disposición de hélice de hasta 35°. Los resultados del estudio muestran que dichos modelos analíticos entregan estimaciones satisfactorias de las constantes de rigidez elásticas para ángulos de disposición menores a 20° (Figura 2.1). El autor recomienda que, para ángulos mayores, simulaciones en 3D en EF sean utilizados. También concluye que el comportamiento del cable no se ve afectado por las condiciones de borde para casos entre dos y diez pasos de hélice.

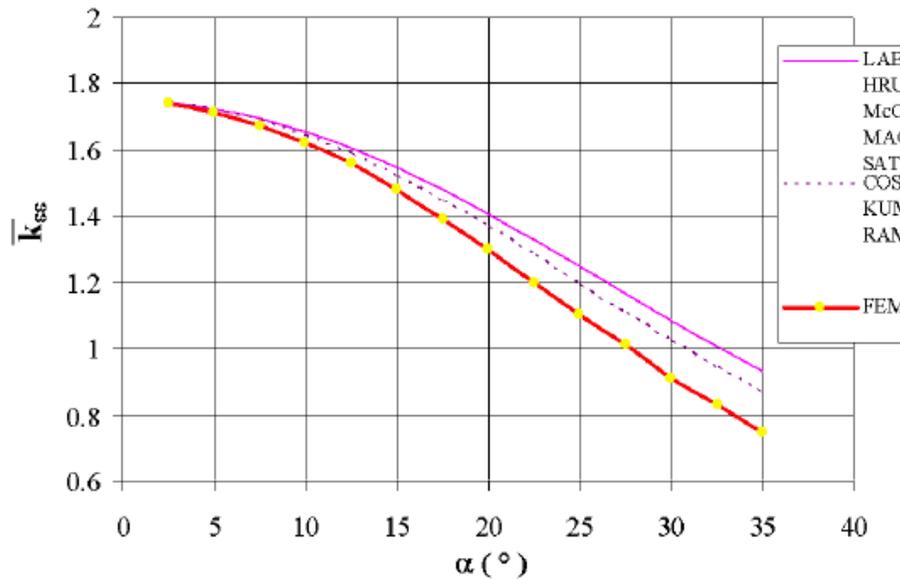


Figura 2.1: Rigidez axial, $\bar{k}_{\epsilon\epsilon}$, versus ángulo de hélice, α , (Goreishi, 2007).

También, Vargas [2] realizó una validación y un análisis de ciertos modelos matemáticos 2D, previamente estudiados por Gysling (2006), mediante la comparación con modelos de EF en 3D y ensayos experimentales (Machida y Durelli [10]), con el fin de conocer sus limitaciones, estudiando el defecto del daño tanto simétrico como asimétrico, incorporando un índice de asimetría (IA) y su impacto en la distribución de esfuerzos internos y en la respuesta global de los cables. Vargas compara con dos casos bidimensionales (estudiados por Gysling): “Modelo Lineal con Efecto Poisson”, de Jelicoeur y Cardou (1991), y el “Modelo No Lineal”, de Beltrán (2006). Con este trabajo llega a la conclusión de que, para cables sin daño, la diferencia porcentual entre los modelos en EF y los 2D, para el caso de la fuerza máxima, es de un 6%, mientras que es incluso menor si se compara con los ensayos. Además, dice que la distribución de tensiones y de deformaciones es casi simétrica (variación de 5%). En el caso de existir elementos dañados, si el daño es simétrico, la fuerza axial se reduce en prácticamente la misma manera que la reducción de área (variación de un 1%) mientras que, para el caso asimétrico, esta reducción es mayor que la de área (por hasta un 4,5%). En esta configuración de daño es posible ver que la deformación de falla se reduce entre un 15 y

30%, siendo mayor esta reducción mientras más alto es el índice de asimetría. Además, es posible ver una distribución de tensiones asimétrica en la sección, siendo más alta en la vecindad del daño. Finalmente comenta que se observa contacto tanto radial como circunferencial cuando el cable se encuentra dañado.

Por su parte, De Vico [3] (2013) y Ramírez [17] (2015), elaboraron nuevos modelos mecánicos 2D para estudiar los cables analíticamente. De Vico realizó primero un modelo de viga no lineal con pequeñas deformaciones que considera la hipótesis de Bernoulli, con una carga axial y una fuerza de corte uniforme a lo largo del elemento, producto del desbalance de las cargas radiales, debido a la asimetría del daño. Planteando la ecuación diferencial de la deformada, es posible obtener la deformación del cable junto con sus tensiones y fuerzas. Este modelo además incorpora una rigidez a flexión efectiva (EI)*, basada en la relación entre la carga axial y la variación del radio del elemento (propuesto por M. Raoof y T.J. Davies en 2004). Ramírez, luego, extendió el modelo de De Vico, que sólo era capaz de analizar cables de dos capas y un nivel, a geometrías multi-capas y multi-nivel. Los resultados de ambos investigadores muestran que el modelo mecánico propuesta se asemeja de buena forma a lo que muestran los ensayos y los modelos de EF, sin embargo, magnifican y sobreestiman tanto la capacidad residual como la deformación de fractura (13,6% y 3% respectivamente, según De Vico). Lo mismo ocurre con los gradientes de tensiones, que, si bien muestran un rango similar al de los modelos EF, sus valores son superiores. Ramírez hace hincapié en que, a pesar de que la asimetría de daño no juega un rol importante en cuanto a la rigidez del cable, sus parámetros últimos de capacidad y deformación de rotura claramente se ven afectados por ésta. Así también, cabe mencionar que en ambos casos la reducción de capacidad es mayor al incorporar la asimetría del daño, cuando se compara con la resistencia última sólo considerando la reducción de área neta del cable.

Utilizando el modelo desarrollado por Ramírez, Bravo et al. [4] realiza un análisis comparativo considerando diversas secciones, diámetros y configuraciones de daño para cinco cables que se utilizan en la industria. Con una ley constitutiva correspondiente a un acero galvanizado (obtenida de datos experimentales), el autor obtiene tanto la capacidad última, como la deformada del cable y el gradiente de tensiones y deformaciones que presenta la sección transversal de éste. La finalidad es estudiar cómo impacta la asimetría del daño, el diámetro del cable y el porcentaje de componentes fracturados en la deformación de fractura y en la resistencia residual de los cables.

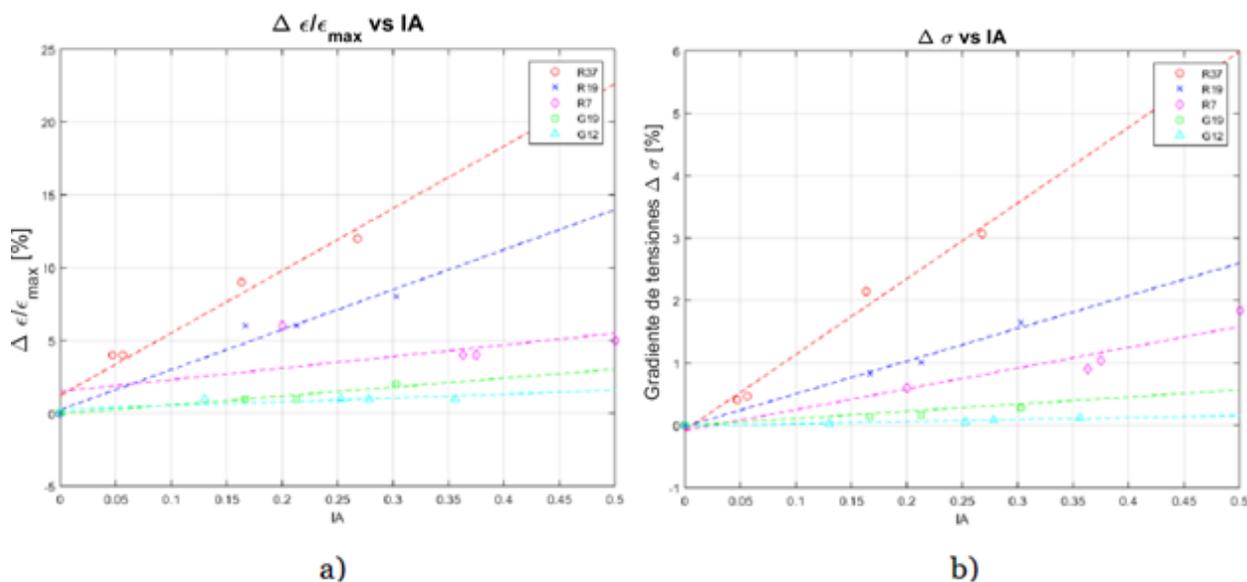


Figura 2.2: Reducción en capacidad de deformación (a) y gradiente de tensiones (b) en los cables analizados (Bravo et al., 2016).

En la Figura 2.2 se puede apreciar el efecto tanto del IA como del radio de los cables. Siendo el cable R37 el con mayor diámetro y G12 el con menor, es posible notar que, a medida que el IA crece, la capacidad de deformación axial se ve reducida, mientras que el gradiente de tensiones aumenta, llegando a valores de un 3% de diferencia entre las tensiones máximas y mínimas en la sección transversal. Además, se aprecia cómo impacta el radio en el comportamiento de los cables: mientras mayor es su dimensión, el efecto que tiene el IA se ve potenciado, reduciendo aún más la capacidad de deformación y aumentando el gradiente de tensiones. Los resultados del trabajo también muestran que la rigidez calculada por el modelo no difiere de la del modelo de área neta, lo que implica que la asimetría del daño no rigidiza ni flexibiliza el cable, mas tiene un impacto en la capacidad y deformación última de éste, si se compara con el modelo que calcula la rigidez simplemente en función de los elementos no dañados.

Por otro lado, diversos autores han desarrollado modelos 3D en EF con el fin de encontrar procedimientos y metodologías de modelación que permitan predecir de mejor manera el comportamiento real de los cables, conociendo como se distribuyen internamente las tensiones y deformaciones, gracias a las herramientas que entrega el modelamiento en este tipo de softwares. De esta manera es posible conocer el detalle de la respuesta de un cable y sus componentes; concentraciones de esfuerzos o deformaciones, puntos de contacto y deslizamiento, y efectos locales que se generan por las diversas interacciones entre fibras son fáciles de visualizar y analizar gracias a las herramientas que ofrecen las simulaciones 3D, cuando éstos se elaboran correctamente.

Jiang et al. [18] (1998) desarrolló lo que él llama un “modelo conciso de elementos finitos” para cables de tres capas y 19 elementos (1+6+12), considerando dos condiciones de apoyo: extremo libre de rotación y extremo empotrado. Éste toma en consideración tanto el contacto como la fricción entre fibras ($\mu = 0,115$), incluyendo también la plastificación del material. Además, considera un núcleo central con mayor diámetro que

los de la segunda y tercera capa, y un paso de hélice tal que sólo existe contacto radial entre los elementos, pero no circunferencial. Aprovechándose de estas condiciones y de la geometría simétrica de los cables, Jiang toma una “rebanada” (Figura 2.3) de un cable para ser analizado, ahorrando recursos computacionales. El mallado de los elementos se realiza utilizando ladrillos de ocho nodos con tres grados de libertad traslacionales cada uno, considerando una densidad más grande de EF (menor tamaño de éstos) en las zonas de eventual contacto entre los cuerpos. La parte fundamental de este trabajo es definir las condiciones de borde que se aplican a ciertos puntos del modelo, de manera de compatibilizar deformaciones, desplazamientos y simetrías; de esta manera logra que este modelo conciso logre representar la realidad de un modelo a escala completa.

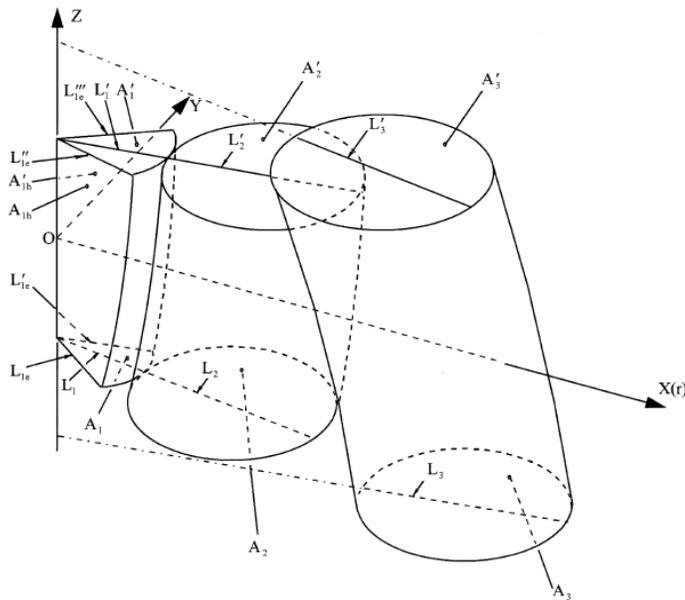


Figura 2.3: Esquema de la “rebanada” y los puntos de las condiciones de borde (Jiang et al., 1998).

En su trabajo, Jiang impuso una deformación axial de 0,012 para ambas condiciones de apoyo, logrando incursionar en el rango plástico, pero no lo suficiente para llegar a la deformación teórica de ruptura del cable. Sus resultados arrojaron una gran concordancia con los ensayos realizados por Utting y Jones (1988) tanto en las curvas de carga versus deformación axial, como en las de carga-torque (caso extremo empotrado) y carga-rotación (caso extremo libre). Los resultados muestran singularidades de tensiones en los puntos de contacto entre las fibras: la tensión axial es menor (en relación al resto de la fibra) en la vecindad de los contactos, mientras que la tensión equivalente de Von-Mises aumenta significativamente para la misma zona. Además, en el caso empotrado, es posible notar el efecto de flexión local que se produce en las fibras más externas, debido al contacto de éstas con los elementos de la capa subyacente.

Posteriormente Jiang y Henshall [19] realizaron un nuevo modelo simplificado en EF para estudiar el caso de un cable de 2 capas (1+6) con una geometría tal que, en la configuración no deformada, las fibras externas tocan tanto al elemento central como a las helicoides vecinas de su capa, generando interacciones de contacto tanto radiales como

laterales, convirtiendo el análisis en un problema de contactos estáticamente indeterminado. Para lograr esta configuración de contactos simultáneos Jiang utiliza la ecuación definida por Costello (1998), la que considera cuatro variables (Ec. 2.1): radio de la fibra central R_c , radio hélice segunda capa R_h , ángulo de hélice α y número de elementos en la segunda capa n .

$$R_h \sqrt{1 + \frac{\tan^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n}\right)}{\text{sen}^2(\alpha)}} = R_c + R_h \quad (2.1)$$

Al igual que en su modelo de rebanadas conciso anterior, Jiang considera la simetría axial de los cables para tomar una sección representativa (al que llama “sector básico”) del cable a estudiar e impone las condiciones de borde que apropiadas para que su modelo reducido represente cabalmente un cable en su totalidad. El mallado se realizó con elementos lineales y el coeficiente de fricción utilizado fue $\mu = 0,12$. Los resultados del análisis mostraron que sí es posible que existan esfuerzos de contacto radiales y laterales de manera simultánea, siempre que se cumplan las condiciones geométricas de radio de los elementos y paso de la hélice que generan que todos elementos se toquen en la condición inicial. Las tensiones equivalentes por contacto radial (núcleo con hélices) son aproximadamente un 20% mayor que las por contacto lateral (entre hélices). Además, es posible observar que el área de contacto aumenta a medida que se incrementa la deformación axial. Al comparar un análisis que considera el factor de fricción con otro que no lo incorpora, se observa un comportamiento histerético para cargas cíclicas, pero su impacto en el comportamiento global de la fibra es muy bajo. Si se comparan las presiones de contacto entre modelos en que se varían los ángulos de las hélices se ve que, a medida que disminuye el ángulo de éstas (cada vez más paralelas al eje central) las presiones disminuyen cuasi proporcionalmente.

Por su parte, Judge et al. [20] realizaron dos modelos 3D en EF completos, es decir, representando la geometría real de los elementos, sin simplificaciones. El primer modelo consiste en un cable de dos capas (1+6), con el radio de la fibra recta mayor que el de las hélices, y modelando seis ángulos de hélice distintos. El segundo corresponde a uno de 120 fibras, compuesto por siete capas, con cinco diámetros de fibra distintos y ángulos de hélice variables para cada una de ellas. Todas las fibras helicoidales se encuentran en contacto sólo con las capas interiores, no existiendo contacto lateral en la configuración inicial. El perímetro de las fibras se divide en 20 elementos finitos, considerado relativamente alto por el autor, para capturar de mejor manera los contactos radiales. Se utilizó también un factor de fricción $\mu = 0,115$. Además, Judge define una deformación de falla del material de 0,05 para el cable de 7 fibras y de 0,1 para el de 120, de acuerdo al fabricante de los cables simulados, mientras que la deformación de fluencia es de 0,0082.

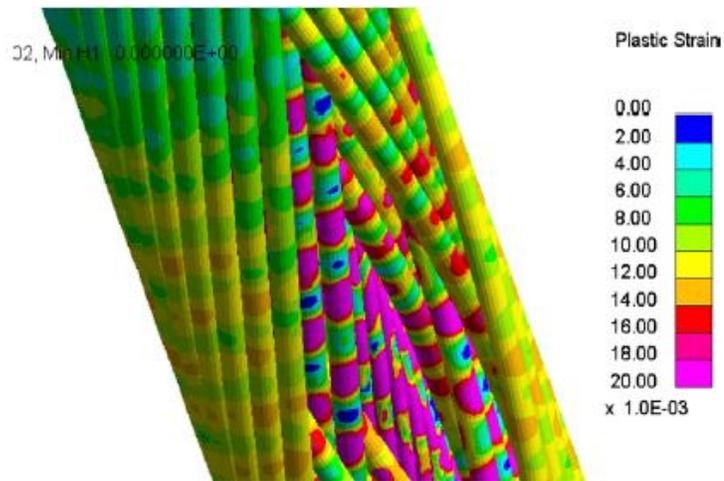


Figura 2.4: Concentraciones de tensiones por flexión local de las fibras (Judge et al., 2010).

Con el análisis es posible observar que las fibras de los cables comienzan a fluir localmente para deformaciones axiales menores que la de fluencia del material: en el caso del cable de 7 elementos, a una deformación de 0,006 se observa fluencia local; para el cable de 120 fibras, se alcanza fluencia puntual en los elementos de la primera y segunda capa para una deformación axial de 0,007 y rotura para deformaciones de 0,08. Lo anterior se atribuye a los efectos del contacto entre elementos. En particular, para el cable pequeño, las condiciones de borde juegan un rol importante tanto en la rigidez como en las tensiones y deformaciones de los alambres: al restringir el giro del modelo, el cable se rigidiza, tomando mayores cargas a menores deformaciones y alcanzando la fluencia antes que los modelos sin restricción de giro. Con respecto al comportamiento global, el análisis muestra que la capacidad máxima del cable pequeño se alcanza a una deformación axial de 3 a 3,4% (dependiendo del paso de las hélices), muy por debajo del 5% definido para el material, mientras que, para el cable de 120 fibras, la deformación máxima no supera el 7% (en contraste con la teórica del material de 10%). Es posible observar también que a menores ángulos de hélice se genera una distribución menos uniforme en la sección transversal del cable; puesto de otra manera, pasos de hélices más grandes distribuyen más uniformemente las tensiones dentro de la sección. Lo anterior genera, a su vez, que la fibra central falle antes cuando el paso de las hélices es más corto puesto que recibe más carga que los elementos helicoidales. A su vez, al contrastar la capacidad última del cable de 7 fibras con resultados experimentales se aprecia una gran concordancia entre los valores, variando en un 1,8% éstos. Por otra parte, en el cable de 120 elementos se puede apreciar una rigidez mayor del modelo versus los ensayos experimentales, aunque casi idéntica a la nominal del fabricante. Sin embargo, la resistencia última del modelo difiere en un 4,8% con respecto al resultado experimental y un 1,3% con las especificaciones del fabricante. Se logró capturar, gracias a los EF, el efecto de flexión local que se produce en las fibras helicoidales producto del contacto con la capa subyacente, denominado efecto de *trellis* (*enrejado*, en inglés), donde un elemento de una capa superior se apoya (y genera presión) en los elementos de la capa que lo antecede, produciendo concentraciones de tensiones que se pueden apreciar en la Figura 2.4. Lo anterior se observa siempre y cuando el sentido de las hélices de capas contiguas sea contrario y sus pasos distintos.

Con el fin de acortar la distancia que separa las respuestas experimentales de las predicciones por modelos analíticos, Shibu [21] desarrolló un modelo en EF 3D para un cable de tres capas 1x19, enfocado en estudiar la respuesta lineal elástica de éste para una pequeña deformación axial y material isotrópico, considerando tanto el caso de restricción al giro en ambos extremos como la libertad de éste en uno. Las relaciones cinemáticas utilizadas para los resultados analíticos fueron obtenidas a partir de las ecuaciones derivadas por Sathikh (1996), quien se basó en los trabajos de Ramsey (1988,1990), considerando el concepto de deformaciones generalizadas en las direcciones normal, binormal y tangencial. El modelo en EF se realizó con un mallado de 26 elementos en la sección transversal, dividiendo el perímetro de cada fibra en 14 partes, mientras que los elementos, a lo largo del eje del cable, se aprecian con una extensión de aproximadamente dos diámetros de la fibra. Todos los elementos finitos utilizados fueron lineales. Además, de acuerdo a un análisis de sensibilidad hecho por los autores, un largo del modelo equivalente a un paso de la capa externa (y dos de la segunda) es suficientes para que las condiciones de borde no influyan en los resultados. Al momento de comparar la capacidad del cable con extremo empotrado se aprecia que una diferencia de 20% con los valores teóricos (Sathikh) y un 0,7% con los ensayos hecho por Utting & Jones (1988). Para el caso con extremo no restringido al giro, la misma comparación entrega valores de 12,5% y 5%, respectivamente. Adicionalmente, se aprecian distribuciones de tensiones en la sección transversal del cable que dan cuenta de cómo el hecho de restringir el giro, además de rigidizar el sistema, distribuye de manera más equitativa las tensiones entre todos los elementos. Además, es posible observar en los diagramas el efecto de *trellis* (por contactos) que se produce en la capa externa de helicoides.

Fontanari et al. [22] realizaron un modelo en EF de una cuerda Warrington-Seale y sus respectivas hebras. Este cable posee dos niveles, siendo el primero compuesto por un núcleo central de fibra polimérica y seis hebras de cables de acero (Figura 2.5). El segundo nivel corresponde a las hebras que se componen por un núcleo de acero y tres capas de fibras helicoidales de variados diámetros. Con el fin de ahorrar recursos computacionales, considerando la geometría compleja del cable, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de encontrar un largo de modelo tal que los efectos de borde no jugasen un rol fundamental en los resultados. Este análisis mostró que para un largo equivalente a 1/20 del paso de la hebra estos efectos son despreciables, por lo que, de manera más conservadora, consideraron un largo de 1/16 del paso. El mallado se realizó con elementos de forma cúbica que utilizan interpolaciones lineales, de ocho nodos, con una dimensión transversal de 1/12 del radio del alambre y 1/10 de la longitud del modelo, axialmente.

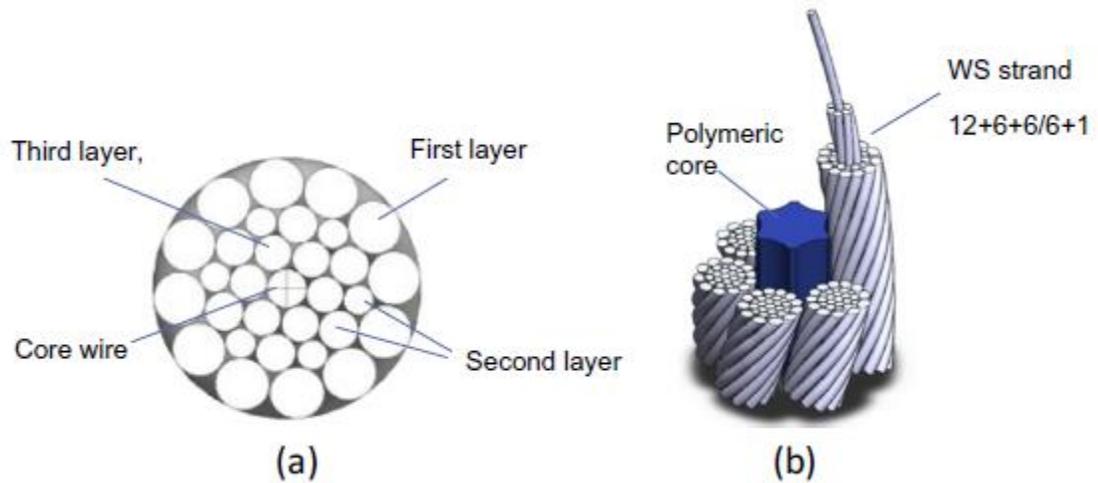


Figura 2.5: Hebra de la cuerda WS (a) y cuerda WS compuesta por las hebras y el núcleo polimérico (b) (Fontanari et al., 2014).

Se consideró un factor de fricción igual a 0,15. En un extremo se restringieron los desplazamientos axiales y circunferenciales, dejando libre los radiales, mientras que en el otro se aplicó un desplazamiento axial, replicando las condiciones circunferenciales y radiales que en primer extremo. Los resultados del modelo mostraron una gran aproximación con los experimentales, al comparar las curvas de esfuerzo nominal versus curvas de deformación de las hebras, obteniendo una diferencia de un 1% de su rigidez y de su límite de proporcionalidad; en el caso de la tensión axial en función de la elongación relativa, la diferencia fue de un 4%. Se observó también que, si bien el aporte a la rigidez por parte del núcleo polimérico (módulo elástico casi dos órdenes de magnitud que el de las hebras) es casi despreciable, éste sirve como soporte radial para el resto de los componentes del cable. El modelo muestra que todas las fibras presentan un comportamiento elástico hasta una elongación de un 0,5%, luego de la cual comienzan a aparecer deformaciones plásticas en los puntos de contacto con otros alambres, que luego se extienden a medida que aumenta la elongación del cable. Esta propagación de las deformaciones plástica ayuda a equiparar la distribución de cargas entre fibras.

Fedorko et al. [23] elaboró un modelo completo en EF de un cable de acero con forma triangular compuesto por 27 fibras (3+9+15) circulares de igual diámetro. La finalidad principal de este trabajo fue proponer un modelo geométrico matemático 3D para hebras en espiral triangulares, por lo que no se validó experimentalmente. La modelación se hizo con elementos lineales de 8 nodos, con un tamaño aproximado de 0,2 mm de lado, considerando un diámetro de cada fibra de 1,18 mm, logrando un mallado de la sección transversal de cada alambre con 44 elementos. Se utilizó un factor de fricción de 0,2. La resistencia nominal del cable es de 4,13 tonf, sin embargo, el modelo se llevó hasta una carga máxima de 2,4 tonf, lo que supone un análisis del comportamiento elástico del espécimen. Los resultados muestran que las tensiones máximas se concentran en las tres fibras centrales y que, a medida que aumenta la fuerza axial sobre el cable, las tensiones aumentan desde afuera hacia el centro del sistema. Además, es posible observar un campo de tensiones no homogéneo producto de las presiones de contacto en las fibras externas.

Se observa también que el cable presenta una rigidez axial más baja que la teórica (para su rango elástico) durante el comienzo de la deformación (hasta un 0,4% aproximadamente), como se puede ver en la Figura 2.6.

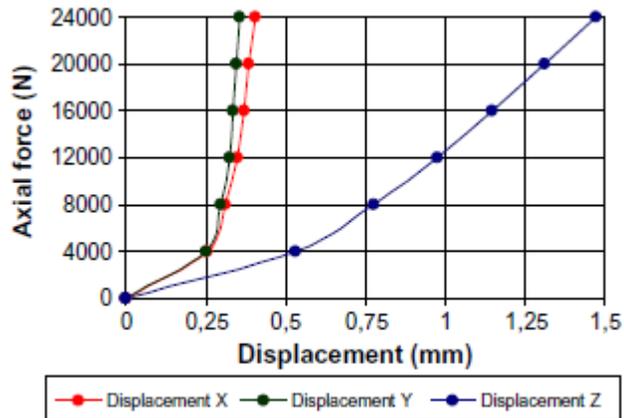


Figura 2.6: Carga axial vs desplazamiento, largo de cable $L = 192,503$ mm (Fedorko et al., 2014).

Una metodología diferente y basada en la teoría de vigas de Timoshenko fue la que desarrollaron autores como Zhou y Tian [24] y Lalonde et al. [25], con el fin de optimizar recursos computacionales a la hora de modelar cables. En ambos casos, cada alambre del cable se modela como un elemento de línea (una dimensión) al que se le asigna una sección transversal circular y discretiza a lo largo utilizando elementos tipo viga de una longitud tal que permita simular de forma apropiada la geometría del cable.

Zhou y Tian (2013) elaboraron un modelo para un cable de 7 fibras (1+6) de acero y de largo equivalente a un paso de hélice, para los casos de tracción pura y flexión pura. Para eso, se creó un modelo matemático de manera de trazar el camino de los ejes lineales que definen los elementos del modelo (núcleo y hélices). El siguiente paso fue definir las restricciones geométricas para los desplazamientos nodales de cada EF que relacionan la interacción entre las hélices y el núcleo del cable e ingresarlas a ANSYS. Estas restricciones toman en consideración el efecto de Poisson y la elasticidad del material, pero no incorporan interacciones de fricción entre los alambres. El modelo fue analizado en el rango lineal para ambos modos de carga (tracción y flexión) y luego contrastado con la teoría de Costello, mostrando una diferencia de un 1,51% en el primer caso y de 6,21% en el segundo, lo que verifica la validez de las hipótesis utilizadas en la modelación.

Los modelos generados por Lalonde et al. (2017) siguen los mismos principios que el de Zhou y Tian pero se extienden a cables multi-capa y además incorporan interacciones de fricción, mediante un coeficiente multi-nivel basado en la ley de Coulomb, el que juxtapone fuerzas de contacto inter-alambre tanto normales como tangenciales al movimiento relativo, permitiendo imponer condiciones de adherencia o deslizamiento dependiendo de la relación entre dichas fuerzas y con el factor de fricción. Los modelos no incorporan el efecto de Poisson en la contracción transversal de las fibras. Se modelaron dos cables distintos: uno de 7 fibras (1+6) y otro de 120 fibras, considerando un $\mu = 0,115$

cuando se analizaron con una deformación axial monotónica solamente. En el caso del cable pequeño, éste se compuso de 343 nodos y 168 elementos viga. Se le impuso un desplazamiento axial para un caso con restricción de giro (extremo fijo) y sin (extremo libre). Los resultados se compararon con los ensayos experimentales de Utting y Jones y el modelo de EF completo de Judge et al., mostrando gran similitud con ambos resultados para las dos condiciones de borde (**Error! Reference source not found.a**). Además, comparó las fuerzas de contacto con los resultados de Jiang y Henshall para un cable con la misma geometría, mostrando una correspondencia de más de un 93%. Por otra parte, los valores obtenidos para el cable de 120 alambres se compararon tanto con la rigidez nominal y los ensayos del fabricante como con el modelo de EF completo de Judge et al. (**Error! Reference source not found.b**). Se puede observar que lo que obtienen ambos modelos en EF se asimila en gran medida con la rigidez nominal en el rango elástico; sin embargo, los resultados difieren con los ensayos experimentales. De todos modos, durante la fase de fluencia, los tres casos (experimental, EF completo y EF de vigas) muestran similitud, siendo más cercano al experimental el caso en que se usan elementos tipo viga. Los autores adicionalmente realizaron un análisis para casos de deformación axial y flexión combinados, además de ciclos histeréticos axiales, ajustando el modelo de fricción propuesto. Como conclusión, se muestra que la alta robustez de los resultados en relación al costo computacional hace de este tipo de modelación una herramienta de diseño muy poderosa.

2.2 Criterios de Descarte en la Industria

Como se mencionó en la motivación de este trabajo, conocer el comportamiento de los cables bajo condiciones de daño podría ayudar a perfeccionar los criterios de descarte que se utilizan actualmente en la industria. Al presente, la inspección y análisis de cables dañados que se hace en terreno no incorpora variables como la asimetría del daño o el diámetro de las fibras, lo que podría significar una subestimación del impacto de la pérdida de alambres en un cable a la hora de predecir su comportamiento último.

Es importante tener en consideración que, de acuerdo *Wire Rope User's Manual* desarrollado por el Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI, por sus siglas en inglés) [26], los cables de acero se deben diseñar con un factor de seguridad de 5 para una operación promedio. En algunos casos, si es que se precisa una economía en espacio o aumentar la movilidad, este factor podría disminuir hasta un valor de 3, mientras que, si es que existen vidas humanas en riesgo, el ponderador puede alcanzar valores de 8 o 9. Factores mayores han sido considerados en algunos casos especiales.

De acuerdo a lo recopilado de diversas especificaciones técnicas de fabricantes y distribuidores de cables de acero, la gran mayoría de los criterios de descarte, reparación o reemplazo de elementos dañados vistos se basan en la norma ISO4309 [5], con su última versión (cuarta) publicada el año 2010. Si bien dicha norma está desarrollada para cables utilizados en grúas, sus especificaciones se han extendido, para bien o para mal, a cables en prácticamente cualquier aplicación. La norma incluye también instrucciones sobre la manipulación y mantención de cables.

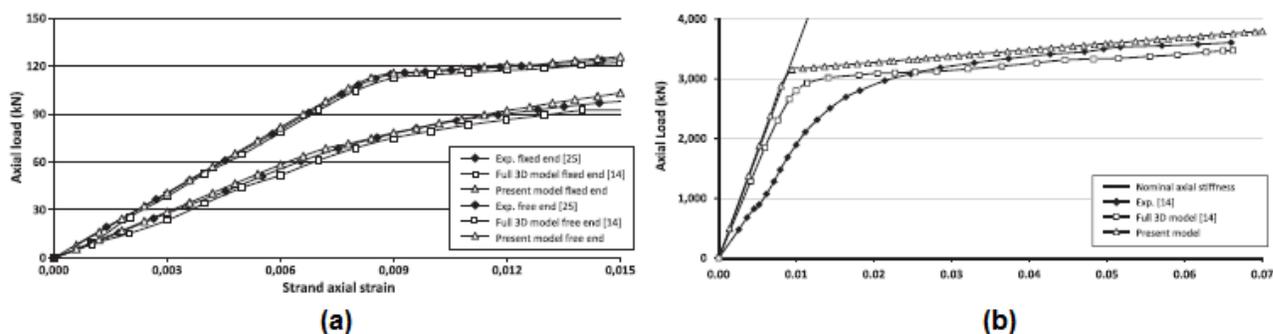


Figura 2.7: Carga axial *v/s* deformación axial para cable de 7 fibras (a) y cable de 120 fibras (b) (Lalonde et al., 2017).

El capítulo 6 de esta norma ISO es “Criterios de Descarte”. Lo primero que hace este apartado es diferenciar en cuatro la naturaleza del daño de los cables: (1) alambres rotos aleatoriamente en cables que pasan por roldanas o se enrollan en tambores; (2) roturas agrupadas en cables que no son enrollados; (3) alambres rotos en el punto de contacto entre hebras de la misma capa; y (4) alambres rotos en la terminación del cable. Para los casos 3 y 4, el cable se descarta si existen dos o más fibras rotas (dentro de un largo de paso, si es en el caso 3). En la situación 2, el descarte ocurre si la agrupación de rotura se concentra en una o dos hebras vecinas. Para el caso 1, existen dos recuadros (Tabla 3 y Tabla 4) que definen criterios de descarte en función del tipo de cable, el número de fibras en la capa externa de las hebras, disposición de las hebras y el número de fibras rotas en un tramo de cierto largo.

Existe también un criterio que considera una disminución porcentual del diámetro del cable, en relación a su medida nominal. Según el valor de esta razón de pérdida de sección transversal, se genera una caracterización de la severidad del daño. Dependiendo del tipo de cable, el descarte del elemento puede suceder entre un 5 y un 10% de la pérdida de diámetro.

El último criterio cuantificable que se menciona es lo que se define como “ondulamiento”, cuando el cable deja de mostrarse recto y presenta una forma sinusoidal. Dependiendo de la relación entre la desviación del cable con su eje recto y el diámetro nominal del espécimen, se debería cambiar el cable (Figura 2.8). Para esto, el valor del espacio o *gap* (g) entre la parte baja de la hélice y la recta que toca el contorno del cable deformado no puede ser mayor al diámetro nominal (d) del cable multiplicado por $1/3$ si es que nunca pasa por poleas o se enrolla en un tambor, o por $1/10$ si es que sí lo hace.

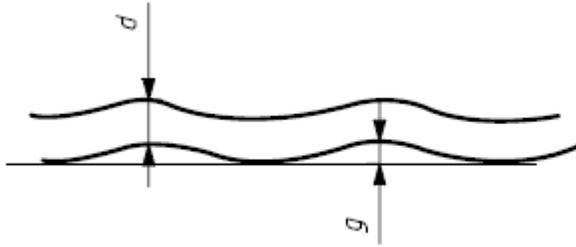


Figura 2.8: Diagrama que muestra los parámetros a considerar al estudiar el descarte de cables por ondulación (ISO4309, 2010).

Por otra parte, y con motivo de refinar los criterios de descarte del SABSo293: Código de Prácticas Estándar de la Oficina Sudafricana para la Verificación de Condiciones de Cuerdas de Alambres de Acero en Carriles Mineros, Zyl [14] realizó un estudio con cables dañados, aplicando los criterios definidos en dicho documento. La finalidad era verificar si las especificaciones en ese código cumplen con los requerimientos mínimos de resistencia exigidos, basados en el criterio de reducción máxima de un 10% de la fuerza del cable. Esto quiere decir que, si se siguieran los criterios definidos en dicho código, ninguna cuerda ensayada debería fallar por debajo del 90% de su carga de rotura nominal.

Los resultados de todos los ensayos llevados a cabo por Zyl mostraron que hebras de cables con fibras rotas dentro de lo “permisible” fallaron a cargas considerablemente menores que el 90% de la resistencia de la cuerda virgen. Además, la carga a la que una hebra debilitada en un cable fallaría dependía del largo del espécimen ensayado, siendo este parámetro un factor importante en la dispersión de fuerzas de roturas observadas (Figura 2.9). Por lo tanto, se concluye que no es posible establecer una relación directa entre la reducción de área de acero en un cable de hebras con fibras cortadas, y la pérdida de capacidad del elemento. Además, la dependencia con el largo de las muestras ensayadas en los resultados hace que el criterio del 10% no sea aplicable para longitudes variables, lo que hace necesario reconsiderar esta condición.

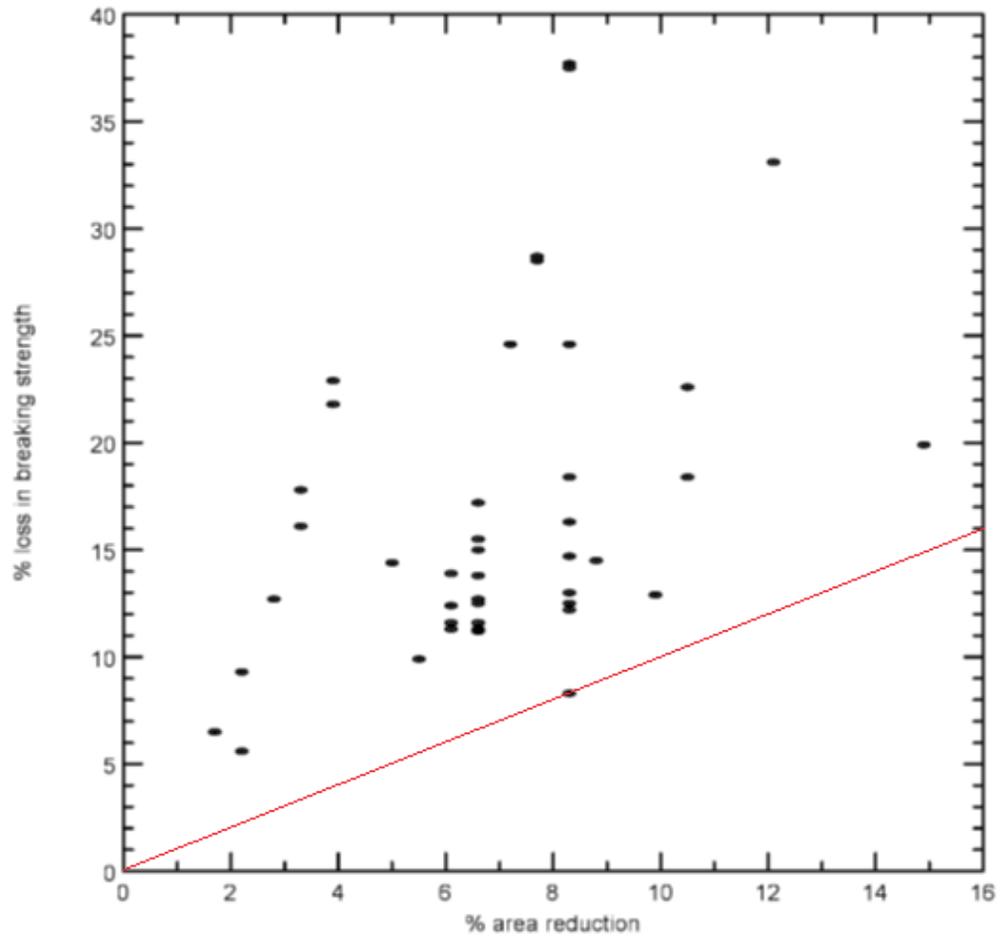


Figura 2.9: Reducción de capacidad versus reducción de área (Zyl, 2000) a la que se le trazó la recta con razón 1:1.

CAPÍTULO 3: GEOMETRÍA Y PROPIEDADES DE LOS CABLES

3.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS CABLES DE ACERO

Un cable es un elemento estructural que se compone de un conjunto de fibras o hilos dispuestos de una forma particular para lograr transmitir cargas, movimientos o incluso energía entre dos puntos. Variando el número de alambres, sus dimensiones y la disposición de éstos al momento de elaborar su estructura, se logra crear un elemento con características únicas para distintos usos dentro de la industria.

Los materiales que se utilizan actualmente son principalmente fibra natural, fibra sintética, acero y aluminio. Qué materia prima para elaborar el cable se utilice dependerá del uso que se le va a dar; el tipo de carga (constante o cíclica) y el medio en donde va a estar inserto el elemento son claves para esta determinación.

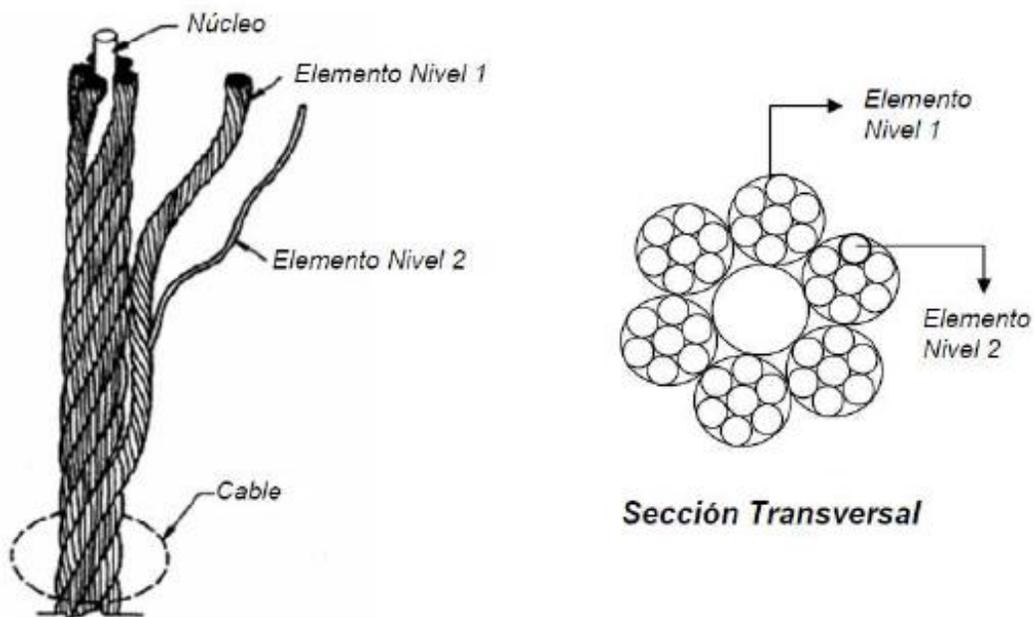


Figura 3.1: Configuración general de un cable (Vargas, 2010).

Desde el punto de vista geométrico (Figura 3.1), un cable se compone de dos estructuras organizacionales básicas (Vargas, 2010):

- **Capa:** Se entiende como capa a un anillo de elementos que rodean un eje central (núcleo), describiendo una geometría helicoidal. Para efectos de

notación en este trabajo, la fibra central recta se considera la primera capa del cable.

- **Nivel:** Conjunto de elementos definido por una estructura central que posee elementos distribuidos helicoidalmente en torno a él. Según esta definición, el nivel 1 un cable es él mismo. En caso de poder definirse un nuevo helicoide entre los componentes del primer nivel, éste se describe como un segundo nivel y así sucesivamente. Es importante mencionar que el nivel j incluye todos los componentes del nivel $j + 1$. De esta misma forma, la geometría helicoidal del nivel j no depende del nivel $j + 1$.

Por otra parte, es posible definir la geometría de un cable según la disposición (*lay*, en inglés) de sus alambres y hebras. En este caso, se habla de dos posibles configuraciones: regular (u ordinaria) y de Lang. La disposición regular supone que la hebra definida en el nivel j se cierra en la dirección opuesta a la disposición de los alambres que la componen (nivel $j + 1$). En cambio, en la disposición de Lang tanto la hebra como sus fibras se cierran en la misma dirección (ver Figura 3.2).



Figura 3.2: Disposición de Lang (izquierda) y regular (derecha) (sitio web Verope.co).

3.2 GEOMETRÍA DE LOS CABLES A ESTUDIAR

Para efectos de este trabajo, el enfoque se pondrá en la geometría particular de un tipo de cables: de tres capas y un nivel. Esta geometría se compone de una fibra central recta (primera capa), una segunda capa de elementos helicoidales en torno a la primera y finalmente una tercera capa de fibras en torno a la segunda. Por ser cables de un nivel, todos sus helicoides se componen de una sola fibra de acero.

La geometría longitudinal de un cable se puede definir en función de tres parámetros: la longitud del cable L , el radio de la hélice R y su paso p . Con estos parámetros es posible definir el ángulo de la hélice θ como el ángulo comprendido entre el eje definido por la fibra central del cable y la trayectoria definida por la fibra helicoidal que rodea al eje (Figura 3.3). Este ángulo se obtiene con la expresión:

$$\tan(\theta) = \frac{2\pi R}{p} \quad (3.1)$$

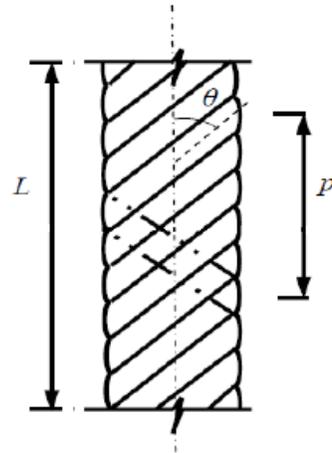


Figura 3.3: Parámetros longitudinales de un cable (Beltrán, 2006).

La geometría transversal se define por los siguientes parámetros: el radio de las fibras r_s , el radio exterior del cable r_o y el ángulo que sustenta la componente helicoidal Ψ (ver Figura 3.4).

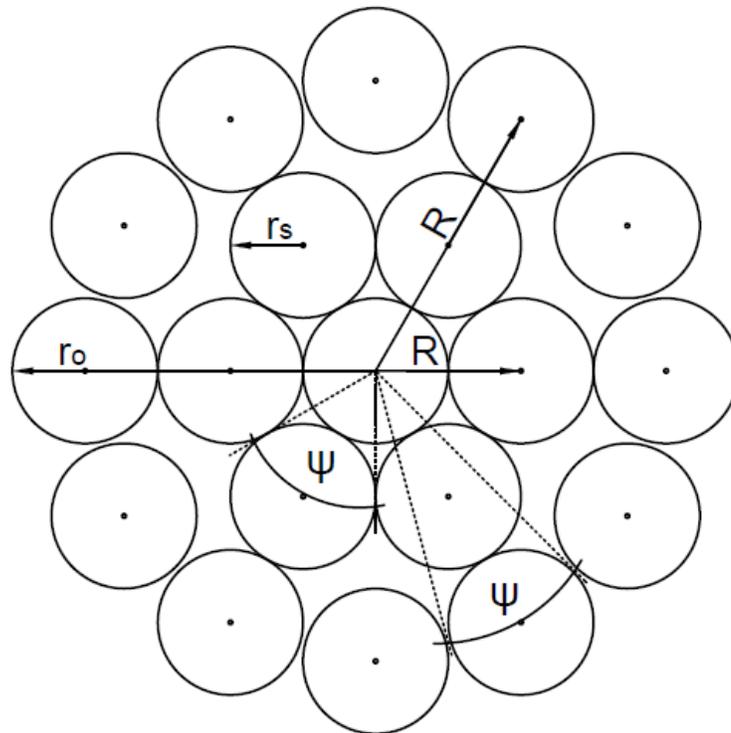


Figura 3.4: Sección transversal cables a estudiar.

Los cables seleccionados para realizar los modelos en EF fueron sacados del catálogo de Prodinsa [27], de manera de estudiar elementos que existieran en el mercado chileno. En particular, se eligió un cable tipo Galgo y tres cables tipo Retenidas. Todos

estos cables tienen una configuración 1x19 (1+6+12), es decir, un elemento central, seis en la segunda capa y doce en la tercera.

A continuación, se presentan los detalles de los cables a analizar:

Tabla 3-1: Configuración de cable Galgo de diámetro 3,5 mm.

Cable Galgo 3,5			
Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
r_0	Radio exterior del cable	1,75	mm
r_s	Radio de cada componente	0,35	mm
R_2	Radio hélice 2° capa	0,7	mm
R_3	Radio hélice 3° capa	1,4	mm
Ψ_2	Ángulo elemento helicoidal 2° capa	60	°
Ψ_3	Ángulo elemento helicoidal 3° capa	29,54	°
p_2	Paso hélice 2° capa	28,57	mm
p_3	Paso hélice 3° capa	42,51	mm
θ_2	Ángulo hélice 2° capa	8,75	°
θ_3	Ángulo hélice 3° capa	11,69	°
l_0	Largo del cable	85,01	mm

Tabla 3-2: Configuración de cable Retenidas de diámetro 7/8”.

Cable Retenidas 7/8”			
Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
r_0	Radio exterior del cable	11,11	mm
r_s	Radio de cada componente	2,22	mm
R_2	Radio hélice 2° capa	4,45	mm
R_3	Radio hélice 3° capa	8,89	mm
Ψ_2	Ángulo elemento helicoidal 2° capa	60	°
Ψ_3	Ángulo elemento helicoidal 3° capa	29,54	°
p_2	Paso hélice 2° capa	181,44	mm
p_3	Paso hélice 3° capa	269,92	mm
θ_2	Ángulo hélice 2° capa	8,75	°
θ_3	Ángulo hélice 3° capa	11,69	°
l_0	Largo del cable	539,84	mm

3.3 MODELO ESTRUCTURAL

El modelo estructural con el que se analizaron los cables equivale a una viga empotrada en un extremo y con un apoyo deslizante en el otro (Figura 3.5). La rotación en torno al eje longitudinal del modelo está restringida en ambos apoyos. La rotación de las caras de los extremos también se encuentra restringida. El largo de cada cable equivale a $L = 2p_3$, es decir, todos los cables tendrán un largo equivalente a dos pasos de su hélice

de la tercera capa. Esto implica que, para todos los cables a analizar, la cantidad de pasos desarrollados por las hélices de la segunda capa serán $N_p = 2,98$.

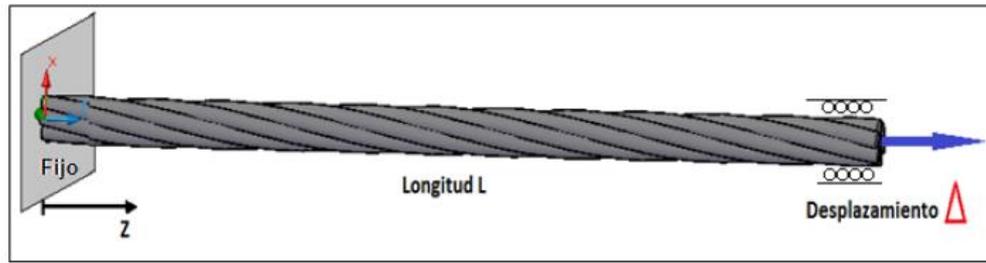


Figura 3.5: Modelo estructural a analizar (De Vico, 2013).

3.4 ÍNDICE DE ASIMETRÍA DE LA SECCIÓN

El índice de asimetría (i.e., IA) se puede definir como la excentricidad del centro de rigidez del cable dañado con respecto a la situación sin daño. Este parámetro se obtiene a partir de la siguiente ecuación [4] (Bravo, 2016, en base a Vargas, 2010):

$$IA = 1 - \frac{r_o - d_s}{r_o + d_s} \quad (3.2)$$

Donde r_o es el radio del cable y d_s la distancia entre el centro de rigidez de la sección dañada y la sección sin daño. En este caso, y debido al material usado, el centro de rigidez se considera indistinto del centro geométrico.

Como se mencionó en un comienzo, se analizaron dos diámetros de cables y, para cada diámetro, tres configuraciones dañadas distintas, además del cable virgen. Las configuraciones de daños se muestran en la Tabla 3-3: IA y daño de las secciones dañadas a estudiar. Tabla 3-3.

Tabla 3-3: IA y daño de las secciones dañadas a estudiar.

Denominación	IA	Sección Dañada	Disminución Área Neta
D1	0,085		5,3%
D2	0,167		10,5%
D6	0,213		31,6%

El valor de d para cada caso se muestra en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Distancia al centro de rigidez para cada sección dañada.

Diámetro Cable [mm]	Sección	d_s [mm]
3,5	D1	0,078
	D2	0,159
	D6	0,208
22,22	D1	0,494
	D2	1,010
	D6	1,321

Los motivos de estudiar las secciones antes mencionadas son:

- presentan daño en la capa más externa del cable, simulando las condiciones de daño que sufrirían los elementos en terreno, producto de factores del ambiente y demanda mecánica que deterioren las fibras más expuestas,
- presentan una asimetría en la distribución del daño, lo que supone parte fundamental del estudio realizado en el presente trabajo, por las condiciones de tensión y deformación que un daño no simétrico impone en los cables,
- las configuraciones de daño tienen valores de asimetría significativos, sin ser muy altos, de manera que los modelos no se vuelvan muy complejos de resolver,
- y, finalmente, porque dicha geometría de sección y diámetros existen en el mercado actual.

3.5 IMPACTO DEL DAÑO ASIMÉTRICO

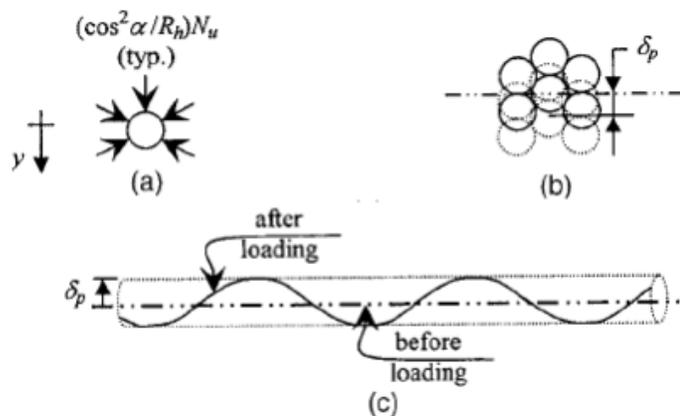


Figura 3.6: (a) Fuerzas radiales sobre el núcleo, (b) deflexión de la sección transversal y (c) deflexión del eje del cable (MacDougall y Bartlett, 2006).

Cuando los cables presentan daño de manera asimétrica se producen desequilibrios de fuerzas radiales (Figura 3.6a), lo que produce un desplazamiento de la sección transversal perpendicular su eje de simetría en dirección al centro del daño (Figura 3.6b) para lograr equilibrar dichas fuerzas. Esto produce una deflexión a lo largo de todo el cable que gira en torno a su eje (Figura 3.6c) de la misma manera en que rota el daño producto de la geometría helicoidal que siguen las fibras que rodean el núcleo [7].

3.6 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El material utilizado para el estudio corresponde a acero estructural. Para obtener la ley constitutiva de dicho acero se realizaron varios ensayos con muestras que corresponden al mismo material con el que se confeccionan los cables.

Se ensayaron seis probetas de acero: tres de cables de 12,7 mm y tres de cables de 9,5 mm. Todas las probetas fueron ensayadas a tracción hasta su punto de falla. En los ensayos se utilizaron *strain gages* para medir las deformaciones unitarias de los elementos.

Los resultados de estos ensayos (Bravo [28]) se muestran en la Figura 3.7.

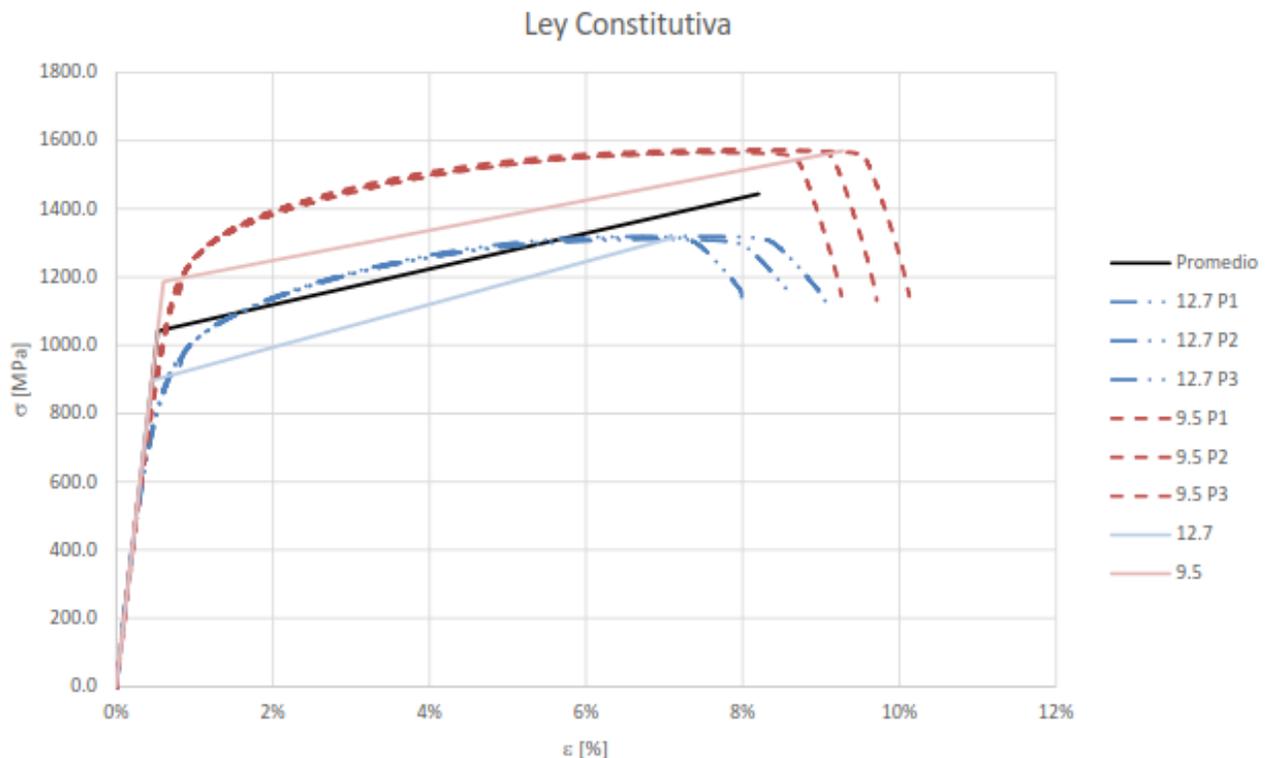


Figura 3.7: Ensayo ley constitutiva material (Bravo, 2017).

Para efectos de los modelos se utilizó la ley constitutiva promedio de los resultados antes mostrados. Éstos, a su vez, arrojan los módulos de elasticidad (E_E) y de endurecimiento plástico (E_p) de la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Resultados ensayo material para ley constitutiva.

Alambre	Fluencia		Rotura		Módulo	
	ε [-]	σ [MPa]	ε [-]	σ [MPa]	Elástico [MPa]	Plástico [MPa]
12,7 mm	0,0046	897,2	0,0713	1316,4	195642,5	18475,7
9,5 mm	0,0061	1186,7	0,0927	1569,6	195501,6	16925
Promedio	0,0053	1042	0,082	1443	195562,2	17598,7

La deformación plástica de la ley constitutiva antes mencionada y utilizada en los modelos es la siguiente:

$$\varepsilon_p = 0,0747$$

CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO DE CABLES EN ANSYS

4.1 DEFINICIONES GENERALES EN ANSYS

4.1.1 DEFINICIÓN DEL MATERIAL

El primer parámetro a definir a la hora de poder generar un modelo en EF es el material que se va a utilizar. ANSYS cuenta con una librería amplia de materiales, a los que es posible modificarle, quitarle o agregarle características según sea necesario.

Para los cables de este estudio se consideró un acero estructural (*Structural Steel* en la librería de ANSYS) al que se le modificó su ley constitutiva de acuerdo a los resultados de los ensayos mencionados en el punto 3.5. De esta manera, al acero estructural que existe en la librería del programa se le agregó una curva de “endurecimiento isotrópico multilineal”, lo que permite definir la ley constitutiva que incorpore la plasticidad del material.

Los parámetros del material utilizado se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 4-1: Propiedades del acero estructural a utilizar en modelos EF.

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de Young (E)	195562	MPa
Módulo de Poisson (ν)	0,3	-
Módulo de Compresión (K)	162970	MPa
Módulo de Corte (G)	75216	MPa
Deformación de Fluencia (ϵ_y)	0,53	%
Tensión de Fluencia (σ_y)	1042	MPa
Deformación de Rotura (ϵ_u)	8,2	%
Tensión de Rotura (σ_u)	1443	MPa

Es importante mencionar que ANSYS define un *plateau* para la ley constitutiva en el punto de rotura. Lo anterior quiere decir que, para cualquier punto del modelo en que la tensión equivalente sea igual a esfuerzo de rotura σ_u definido, el EF puede seguir presentando deformaciones, pero no puede tomar más carga. Esto se vuelve fundamental a la hora de definir un criterio de rotura apropiado para los modelos, como se verá más adelante.

4.1.2 INTERACCIONES DE CONTACTO

Las interacciones de contacto son parte fundamental de cualquier análisis en EF puesto que éstas definen la manera en la que un cuerpo se va a comportar al entrar en contacto con otro cuerpo adyacente. En el caso de los cables a estudiar, todos los contactos

que se generan son producto de la presión radial y del movimiento relativo longitudinal que se da entre las fibras que componen el elemento, siendo estas últimas de carácter friccional.

Una de las grandes dificultades y de la razón de los altos costos computacionales es la no linealidad de estos problemas de contacto, por lo que su correcta comprensión y definición se vuelven fundamentales a la hora de generar modelos que arrojen resultados robustos, pero, a la vez, de manera eficiente en el ámbito del costo computacional.

Dentro de ANSYS es posible definir las interacciones de contacto a través de las “superficies objetivo” y las “superficies de contacto”. Estas superficies actúan como pares que, ante las condiciones propias del problema, están o pueden llegar a entrar en contacto. El comportamiento de este modo de interacción se muestra en la Figura 4.1.

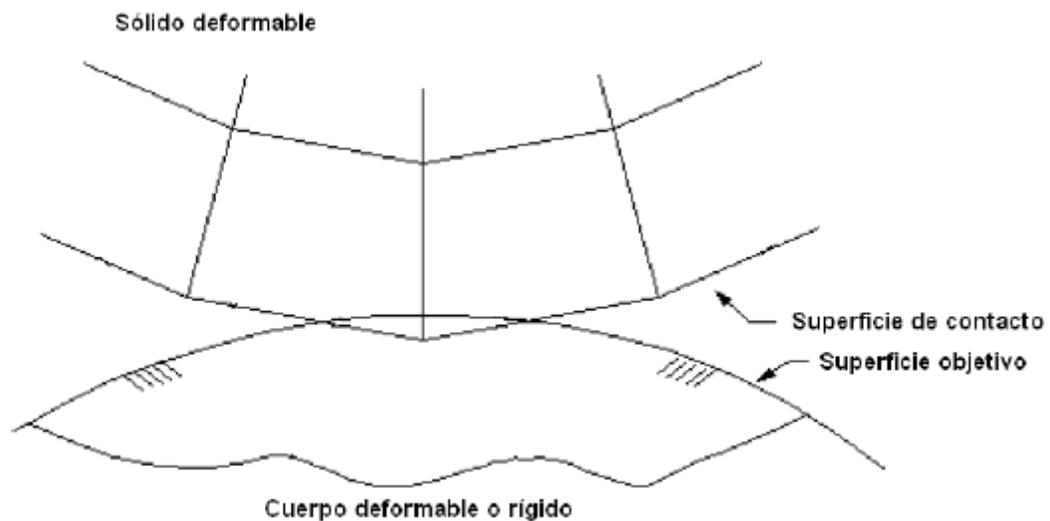


Figura 4.1: Esquema referencial de las interacciones de contacto (ANSYS Reference).

Para el programa, la asignación de una superficie como “de contacto” supone que ésta es la que presenta la menor rigidez normal de deformación, mientras que la “objetivo” en general debería ser igual o más rígida que la “de contacto”. Por otra parte, se definen dos tipos de comportamiento entre las superficies: simétrico y asimétrico.

En el caso asimétrico, la superficie de contacto no puede penetrar a la objetivo. Para el contacto simétrico, el programa define ambas superficies tanto de contacto como objetivo, haciendo primero el análisis considerando una como la de contacto y la otra como objetivo, para luego invertir los roles y volver a analizar. Es posible así notar que un comportamiento simétrico supone un tiempo de análisis mayor y más gasto de recursos computacionales. Por lo anterior es que, para obtener modelos con convergencias en menores tiempos se optó por definir pares de contactos asimétricos. Esta decisión se toma también en función del hecho de que las geometrías y los materiales que entran en contacto son exactamente iguales (los mantos de los cables), por lo que, para el programa, es indistinto, en un par de fibras, cuál es la de contacto y cuál es la objetivo. (Recordar que un contacto simétrico no significa que ambas superficies se comporten igual, sino que el

análisis contacto-objetivo se realiza dos veces, invirtiendo los roles de las superficies en cada caso).

Al momento de configurar los contactos que se considerarán durante el análisis del modelo, es importante mencionar un parámetro dentro de la configuración de ANSYS que permiten un análisis que garanticen convergencia; éste se refiere a la rigidez normal de las superficies.

La rigidez normal no es más que la rigidez que tiene la superficie del material al momento de ser penetrado por otro. En otras palabras, este parámetro mide la resistencia a la penetración que opone un material superficialmente. El programa permite incorporar un factor de rigidez normal (FKN, en su notación ingenieril), que es simplemente un ponderador de la rigidez real de la superficie (de acuerdo a las propiedades de su material). A su vez, se incorpora la opción de actualizar el valor del FKN con cada iteración, de manera de lograr disminuir la penetración de las superficies en cada ciclo, sin poner riesgo la convergencia del problema. También es posible modificar la tolerancia a la penetración de las superficies de contacto.

4.1.2.1 MODELO FRICCIONAL PARA CONTACTOS EN ANSYS

Las tensiones friccionales utilizadas por el programa siguen el modelo de fricción básico de Coulomb, que presenta un valor inicial de tensión de fricción sin presión normal de contacto (c), para luego aumentar linealmente según un coeficiente de fricción (μ) en función de la presión normal de contacto (p) hasta alcanzar una tensión de fricción máxima (τ_{max}), representado gráficamente en la Figura 4.2.

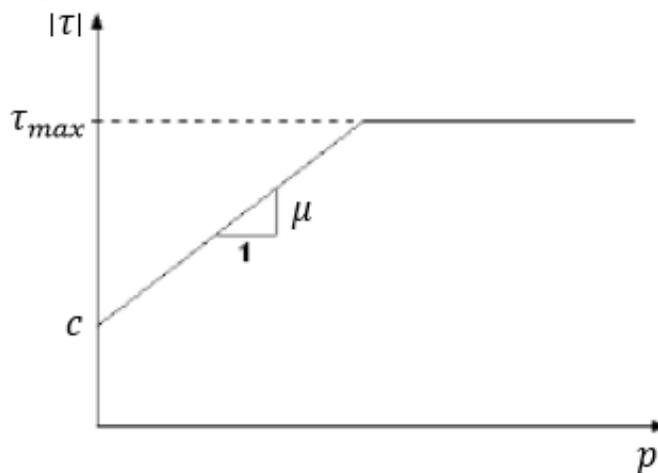


Figura 4.2: Modelo friccional (ANSYS Reference).

$$\tau = c + \mu \cdot p \leq \tau_{max} \quad (4.1)$$

Por su parte, el coeficiente de fricción sigue un modelo de decaimiento friccional (Figura 4.3), determinado en función de los coeficientes de fricción estático y dinámico, que se define según la siguiente ecuación:

$$\mu = \mu(v_{rel}) = \mu_d \cdot \left(1 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_d} - 1 \right) \cdot e^{-cd \cdot v_{rel}} \right) \quad (4.2)$$

Donde,

- μ_s : Coeficiente de fricción estático
- μ_d : Coeficiente de fricción dinámico
- cd : Coeficiente de decaimiento
- v_{rel} : Velocidad de deslizamiento

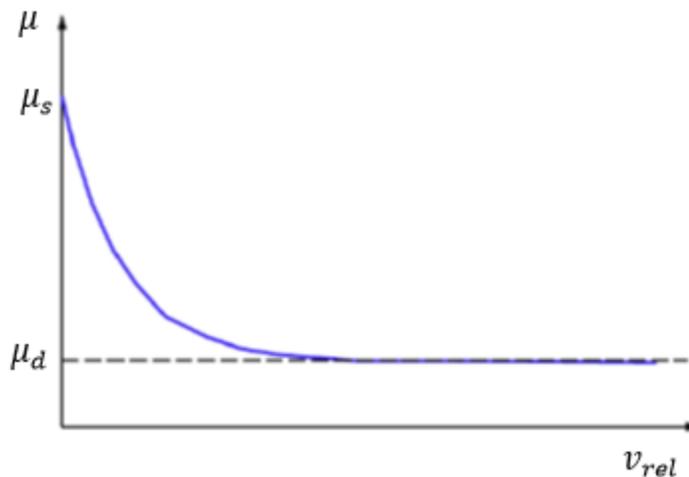


Figura 4.3: Modelo de decaimiento del coeficiente friccional (ANSYS Reference).

4.1.2.2 CONFIGURACIÓN DE CONTACTOS

Como se ha mencionado anteriormente, quizás el mayor problema que existe a la hora de lograr convergencia de modelos en un tiempo razonable (incluso el mero hecho de lograr convergencia se vuelve complicado en muchos casos) tiene que ver con las interacciones de los contactos que existen en los elementos a analizar. La no-linealidad que presenta la naturaleza de los contactos dificulta el proceso iterativo de análisis, lo que vuelve fundamental el encontrar una configuración que optimice tanto el tiempo de resolución como resultados suficientemente robustos, además de asegurar que el problema no diverja.

En el análisis de elementos finitos, cuando dos partes independientes que no están compatibilizadas mediante ningún tipo de relación de rigidez definida entre ellas (matrices desacopladas), existe la posibilidad de que una pase a través de la otra. En el problema físico real esto no debería ocurrir, por lo que ANSYS utiliza elementos de contacto que previenen este tipo de penetración. Estos elementos son superpuestos a los mantos de los sólidos que definen el modelo, en los puntos en que se prevé que existirá contacto. En general, el programa detecta estos contactos de manera automática, sin mayores complicaciones, identificando las dos superficies que se enfrentarán. Sin embargo, es posible también hacerlo de manera manual.

Luego de que los pares de contacto son definidos, se vuelve de vital importancia configurar esta interacción de manera de lograr un óptimo funcionamiento del análisis, según lo mencionado previamente.

Como explica Imaoka [29], existen cuatro tipos de algoritmos definidos para los elementos de contacto, siendo los más comunes los basados en un factor de penalización. Un método basado en la penalización se puede expresar matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$p = k_n x_n \quad (4.3)$$

El valor p corresponde a la presión de contacto entre las superficies, mientras k_n corresponde a la rigidez de contacto y x_n a la penetración resultante. Idealmente, de acuerdo a la realidad de los problemas, la penetración debería ser cero, pero esto significaría tener una rigidez de contacto infinita.

Existe una variante de este método de penalización llamado método del Lagrangiano aumentado (considerado para los análisis del presente trabajo), que agrega un factor λ a la Ec. 4.3, como se muestra a continuación:

$$p = k_n x_n + \lambda \quad (4.4)$$

En este caso, la función de λ es limitar la sensibilidad de los resultados al valor de la rigidez de contacto k_n , evitando así que el problema se indetermina y no logre converger. De todas maneras, vale la pena hacer notar que este método podría requerir mayor número de iteraciones debido al control de penetración.

De acá nace el dilema de ajustar los valores de k_n , de manera de lograr la convergencia sin afectar significativamente los resultados. Elegir valores de k_n muy altos llevan a problemas de convergencia; esto puesto que cualquier variación de la penetración (Δx_n) conlleva grandes cambios en la presión de contacto (Δp). El mismo Imaoka sugiere que un buen parámetro para considerar que la penetración obtenida se ajusta a valores poco razonable es si ésta se encuentra en el mismo orden de magnitud que los desplazamientos calculados. Johnson [30] menciona que, si bien se espera siempre lograr

penetraciones lo más cercanas a cero, una rigidez muy alta genera problemas con el condicionante de la matriz de rigidez. El autor sugiere comenzar con un valor bajo de FKN y luego ajustar en función del comportamiento del problema. Se vuelve vital el permitirle al programa que actualice con cada iteración la rigidez normal, de manera que ésta se vaya ajustando encaminada a lograr la convergencia.

Con respecto al estado inicial de los contactos, Metrisin [31] aconseja que, si se conoce qué partes de la geometría deberían estar en contacto inicialmente, se fuerce esta condición inicial. Esto pues el mallado modifica la geometría externa de los sólidos cuando presentan mantos curvos y, además, las partes geométricas de los modelos se generan en programas que pueden tener pequeños errores numéricos, haciendo que, por ejemplo, dos superficies que, en teoría, deberían tener una distancia de separación igual a cero, presenten un pequeño espacio que a simple vista podría parecer imperceptible. Para esto, ANSYS cuenta con una herramienta para el tratamiento de interfaces que permite “ajustar al tacto” (*adjust to touch*, en inglés) cualquier superficie de contacto de la cual se conozca que su estado inicial es de separación nula. También, este mismo autor recomienda ajustar el parámetro FKN en múltiplos de 10 cuando existen problemas de convergencia.

4.1.3 ELEMENTOS FINITOS

Los modelos están compuestos por tres tipos de elementos finitos: uno sólido y dos de superficie. Éstos se detallan a continuación.

SOLID186

Elemento sólido de primer orden con forma hexaédrica, es decir, posee seis caras y ocho nodos, uno en cada vértice. Por lo anterior, su clasificación dentro de ANSYS Mechanical es *Hex8*. Cada uno de los nodos que componen el elemento *Hex8* posee tres grados de libertad traslacionales en las coordenadas globales (x, y, z). Además, se define con un comportamiento de interpolaciones lineales entre sus nodos (Figura 4.4).

Este tipo de elementos es considerado como uno de los más robustos a la hora de obtener resultados precisos y consistentes, y se recomienda para problemas con interacciones de contacto no lineales por permitir mejores interpolaciones (Wang [32]).

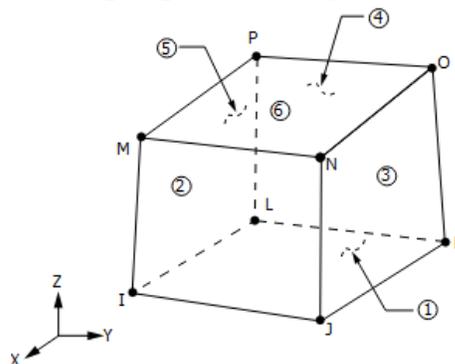


Figura 4.4: Elemento SOLID186 (ANSYS Reference).

CONTA173

Elemento de superficie que se utiliza para representar el contacto o deslizamiento entre superficies objetivo 3D y una superficie deformable definida por este elemento. Tiene las mismas características geométricas del sólido al cual se conecta, ubicándose en la superficie de los elementos del sólido sin nodos mediales (Figura 4.5).

Este elemento permite modelos de fricción de Coulomb, fricción por esfuerzo de corte y fricciones definidas por el usuario.

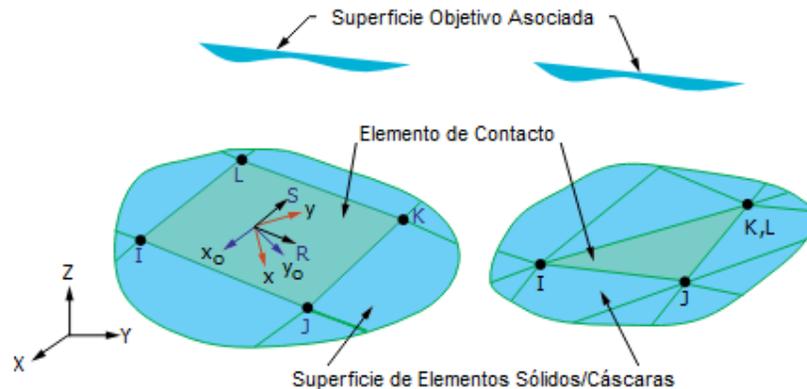


Figura 4.5: Elemento esquemático del CONTA173 (ANSYS Reference).

TARGE170

Elemento que se utiliza para representar variadas superficies objetivo 3D asociadas a elementos de contacto, incluido CONTA173. Los elementos de contacto se superponen al elemento sólido, cáscara o línea, describiendo el límite de un cuerpo deformable potencialmente en contacto con la superficie de contacto, definida por TARGE170, al que se le pueden imponer desplazamientos translacionales o rotacionales (Figura 4.6).

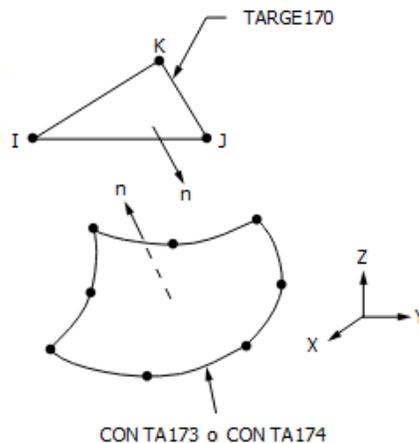


Figura 4.6: Interacción entre CONTA174 y TARGE170 (ANSYS Reference).

4.1.4 MALLADO

El mallado (o *meshing*, en inglés) corresponde a la subdivisión de los sólidos que componen el modelo en elementos finitos que el programa es capaz de procesar y analizar. El procedimiento es automatizable y ANSYS puede generar mallados de alta calidad sin requerir muchas especificaciones ni instrucciones.

Es posible caracterizar cuantificablemente la calidad de los elementos finitos obtenidos mediante ocho parámetros que el programa provee. A continuación, se explican brevemente cuáles son éstos para el caso de elementos tipo *Hex8*.

Calidad del Elemento

Entrega una métrica compuesta de calidad, con un rango de valores entre 0 y 1, siendo 1 la máxima calidad posible. Esta métrica se basa en la razón del volumen y la raíz de la suma del cubo de los largos de bode de los elementos 3D.

Razón de Aspecto

Para elementos cuadrilaterales, se calcula como la razón del lado más largo con el lado más corto. Los valores van desde 1 (cuadrado perfecto) hasta el infinito positivo (Figura 4.7).



Figura 4.7: Razón de aspecto para cuadriláteros (ANSYS Reference).

Razón Jacobiana

Se computa y prueba para todos los elementos excepto triángulos y tetraedros que son lineales (no tienen nodos mediales en las aristas) o tienen nodos mediales perfectamente alineados. Una razón jacobiana alta indica que el mapeo entre el elemento espacial y el espacio real se vuelve computacionalmente no confiable.

Esta razón cuantifica la desviación de un nodo de equina hacia el centro del elemento finito. El valor ideal es 1 (el nodo medial se encuentra perfectamente esquinado) y este puede ascender a medida que existen mayores desalineaciones (Figura 4.8).

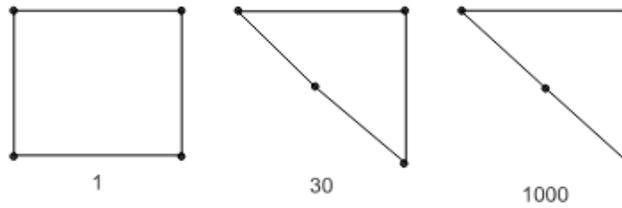


Figura 4.8: Razones Jacobianas para cuadriláteros lineales (ANSYS Reference).

Factor de Torsión

Para las caras de un elemento 3D cuadrilateral, se computa considerando los cuatro nodos que definen dichas superficies. Tomando la proyección de la cara, se calcula como la diferencia de altura entre la cara real y ésta, dividido por la raíz cuadrada del área proyectada (Figura 4.9).

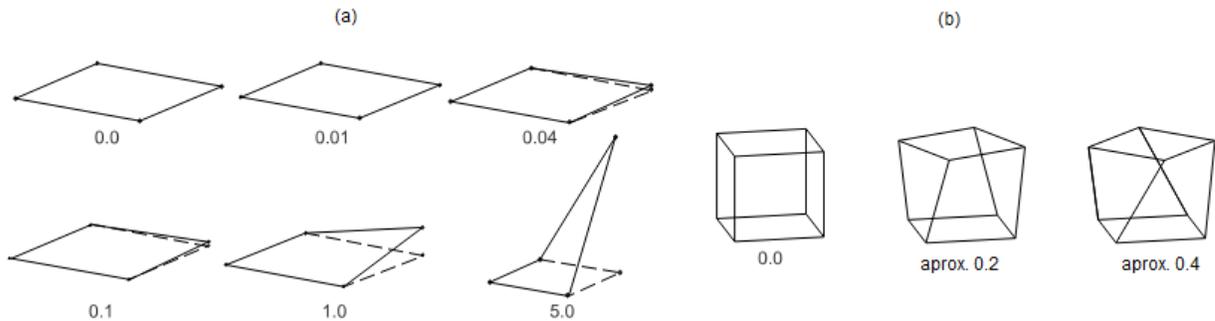


Figura 4.9: Factores de torsión para cáscaras (a) y para tetraedros (b) (ANSYS Reference).

Desviación Paralela

Se computa construyendo vectores unitarios a lo largo de los bordes del elemento y, para cada par de bordes opuestos, se computa el producto punto de sus respectivos vectores. La desviación paralela corresponde al mayor de estos dos ángulos. El valor ideal es 0° mientras que el crítico es 180° (Figura 4.10).

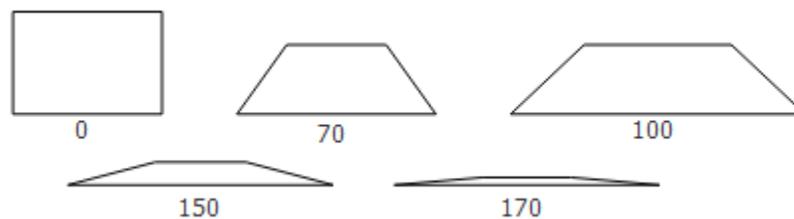


Figura 4.10: Desviación paralela para cuadriláteros (ANSYS Reference).

Ángulo Máximo de Esquina

Como el nombre lo dice, corresponde al máximo valor que puede tomar cualquiera de los ángulos de las esquinas del cuadrilátero que define las caras de un elemento tetraédrico. El caso ideal es 90° (Figura 4.11).



Figura 4.11: Máximos ángulos de esquina para cuadriláteros (ANSYS Reference).

Oblicuidad

Para el caso de un cuadrilátero, mide qué tan cerca de lo ideal está una cara o celda. El valor óptimo es 0 mientras que el caso más crítico es 1, cuando se considera la cara como degenerada (Figura 4.12).

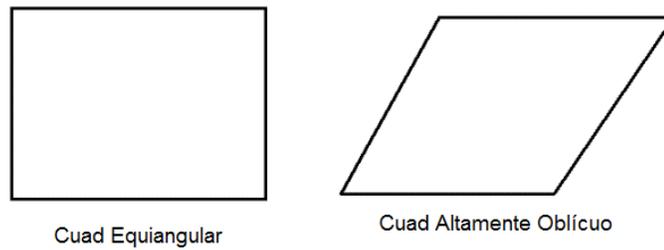


Figura 4.12: Cuadrilátero ideal y oblicuo (ANSYS Reference).

Calidad Ortogonal

En el caso de una celda, la calidad ortogonal se computa usando el vector normal de la cara, el vector de su centroide hacia el centroide de las celdas adyacentes, y el vector del centroide de la celda hacia cada una de sus caras (Figura 4.13). El peor valor es 0 y el mejor valor es 1.

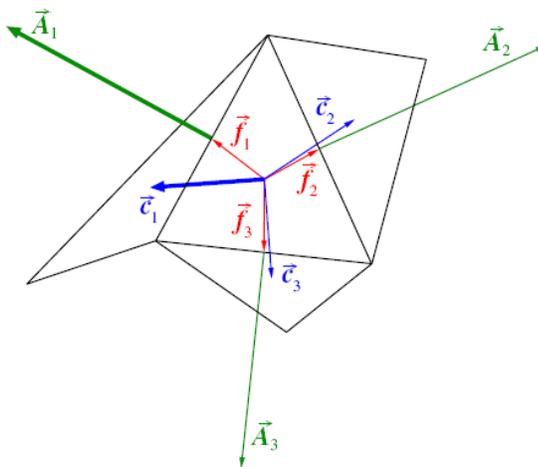


Figura 4.13: Vectores utilizados para computar la calidad ortogonal de una celda (ANSYS Reference).

Se presenta un resumen de las métricas de mallado y su rango de validez:

Tabla 4-2: Resumen de las Métricas del Mallado.

Parámetro	Valor Óptimo	Valor Crítico
Calidad del Elemento	1	0
Razón de Aspecto	1	∞
Razón Jacobiana	1	∞
Factor de Torsión	0	∞
Desviación Paralela	0	180
Ángulo Máximo de Esquina	90°	180°
Oblicuidad	0	1
Calidad Ortogonal	1	0

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

4.2.1 GEOMETRÍA DEL MODELO

La geometría de cada modelo es generada a través del programa de diseño asistido *AutoCAD* [33] (Figura 4.14). Este *software* permite realizar modelos 3D que son compatibles con la versión número 15 de *ANSYS* [12].



Figura 4.14: Geometría de un cable generada en AutoCAD.

En particular, se utilizaron dos comandos de *AutoCAD* que permitieron la construcción geométrica de los cables:

- *helix*: permite generar un helicoides lineal (1D) que toma como parámetros de entrada el radio inferior y superior de la hélice, y cualesquiera dos de las siguientes tres variables: el paso, el número de giros y la altura de la hélice.
- *sweep*: este comando recibe como entrada un perfil (sección transversal) y un camino, barriendo el camino con la geometría del perfil para crear un sólido.

4.2.2 CONDICIONES DE BORDE DE LOS MODELOS

Como se mostró en el punto 3.3, los cables se modelan como un empotramiento en un extremo y un apoyo deslizante en el opuesto. Para lograr esto se utilizó un *Apoyo Fijo* para el extremo empotrado y un *Desplazamientos* en el extremo deslizante.

De acuerdo a ANSYS Reference, las características de estas asignaciones se muestran a continuación:

Apoyo Fijo

Esta condición de borde previene uno(a) o más:

- Caras planas o curvas de moverse o deformarse.
- Bordos rectos o curvos de moverse o deformarse.
- Vértices de moverse.

Desplazamientos

Se aplican a nivel geométrico. Requieren que una o más caras o bordes planos o curvos, o uno o más vértices se desplacen relativo a su posición original por uno o más componentes de un vector de desplazamiento en el sistema de coordenadas global o local (si aplicase).

Se asignaron estas condiciones a las caras extremas de la sección transversal de cada uno de los 19 cables que componen cada modelo. En el caso del desplazamiento, de acuerdo a las coordenadas globales (x, y, z) , se definió un delta de deformaciones $\Delta = (0, 0, \delta_z)$, donde δ_z corresponde al desplazamiento axial impuesto a cada cable para lograr su fallo. Dicho valor δ_z se definió en función de la deformación máxima de rotura obtenida de la ley constitutiva, excediendo ésta en 10%, de modo de asegurar el punto de falla para todos los cables estudiados.

4.2.3 SIMULACIÓN DEL DAÑO EN LOS MODELOS

Para poder imponer la condición de daño en los cables a estudiar, inicialmente se procedió a tomar el modelo sin daño y generar una discontinuidad en los elementos dañados, mediante un corte transversal en el punto medio de las fibras correspondientes, obteniéndose así dos sub-alambres para cada fibra dañada, de largo equivalente a un paso de hélice, cada uno fijo en un extremo.

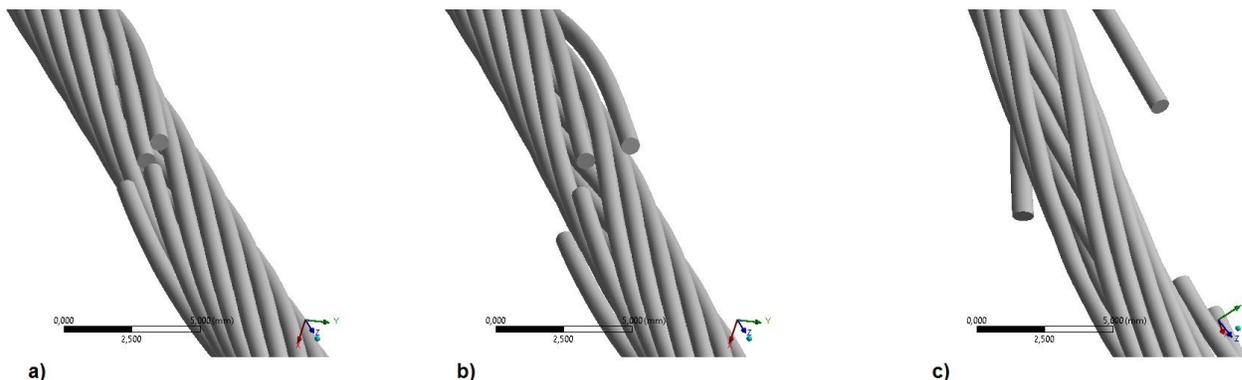


Figura 4.15: Comportamiento de cable con 2 elementos dañados a deformación axial de (a) 0,46%, (b) 2,1% y (c) 4,9%.

Se puede observar en la Figura 4.15 que, con la aplicación del desplazamiento axial gradual en el extremo del cable, los elementos cortados comienzan tempranamente a desprenderse, impidiendo cualquier tipo de recuperación de carga a través de la interacción con el resto de las fibras del sistema. Para una deformación de un 4,9%, los alambres dañados ya se encuentran completamente separados del resto del cable.

Al momento de realizar el análisis se pudo observar que surgían problemas de convergencia en el punto en que los alambres dañados comenzaban a separarse significativamente del resto del cable. Lo anterior se atribuye a un problema que enfrenta el *software* al lidiar con movimientos de cuerpo rígido. Y es que las fibras dañadas presentan tan baja rigidez ortogonal al eje axial que su movimiento es brusco y repentino, haciendo que *ANSYS* no sea capaz de equilibrar su energía cinética con la de todo el modelo, dificultando la convergencia de los análisis.

Si bien fue posible obtener resultados para los casos con uno y dos elementos dañados en el cable de diámetro 3,5 mm, esto fue imposible de lograr con costos computacionales razonables para el caso con tres (inicialmente estudiado) y seis fibras cortadas y para cualquiera de los casos que presentan daño en el cable de 22,22 mm, ya que la energía cinética generada por la masa de los cables discontinuos era muy superior a la que el programa era capaz de equilibrar.

El siguiente paso, por tanto, fue considerar que los elementos dañados no tenían ninguna injerencia en los resultados de los modelos, bajo la suposición de que, al desprenderse de su eje, su interacción con el resto del modelo era despreciable. Ya se había

observado que no presentaban tensiones ni deformaciones significativas (salvo en los extremos fijos) y las sumatorias de fuerzas de reacción generadas eran despreciables.

Para poder validar esta hipótesis se tomó el caso del cable de 3,5 mm con los dos elementos dañados, para el que sí se había logrado una convergencia en la solución, y se contrastó con un análisis idéntico, pero quitando completamente del modelo las fibras cortadas.

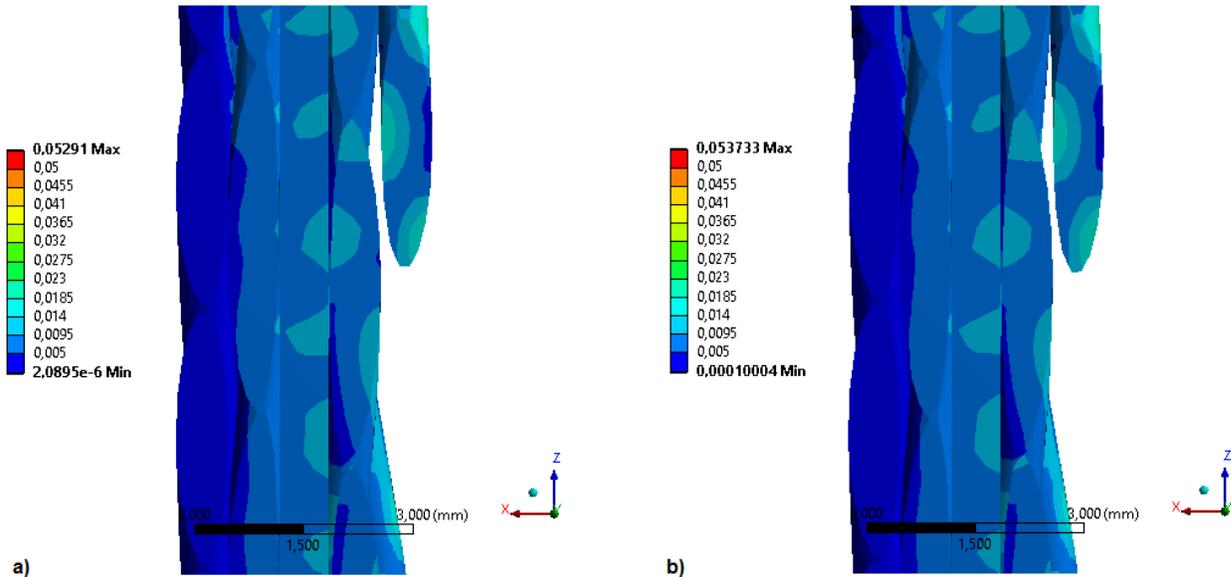


Figura 4.16: Deformaciones plásticas de cable con 2 elementos dañados a deformación axial de 1,19% para (a) elementos dañados presentes en modelo y (b) elementos dañados omitidos del modelo.

Este análisis de sensibilidad arrojó una variación en la curva de capacidad versus deformación axial del cable de un 0,1%. Además, se inspeccionaron las tensiones y deformaciones dentro del cable. Éstas no mostraron variaciones entre un modelo y otro. A modo de ejemplo, en el caso de las deformaciones plásticas equivalentes (Figura 4.16), las diferencias son virtualmente imperceptibles.

Se observa además que los componentes no dañados no utilizan el espacio que dejan las fibras que se quitan del modelo.

Por los motivos antes mencionados y gracias al análisis de sensibilidad realizado se opta entonces por realizar la modelación omitiendo los elementos dañados del sistema, asumiendo que la variación de resultados es de un orden de magnitud despreciable para el presente estudio.

4.2.4 MALLADO DE LOS MODELOS

El mallado de los modelos se realizó con elementos hexaédricos. Se impusieron condiciones de dimensión para los elementos en el manto de las fibras. El perímetro de la sección transversal de cada cable se dividió en 16 elementos. Longitudinalmente, los cables se dividieron en elementos con un largo equivalente a 4/5 del radio de las fibras. Las

condiciones antes mencionadas entregan una relación de aspecto de los elementos de 2: 1 (largo:ancho) en el manto de todos los alambres que componen los cables. Por su parte, la sección transversal muestra una subdivisión en el diámetro de 6 elementos finitos, aproximadamente (Figura 4.17).

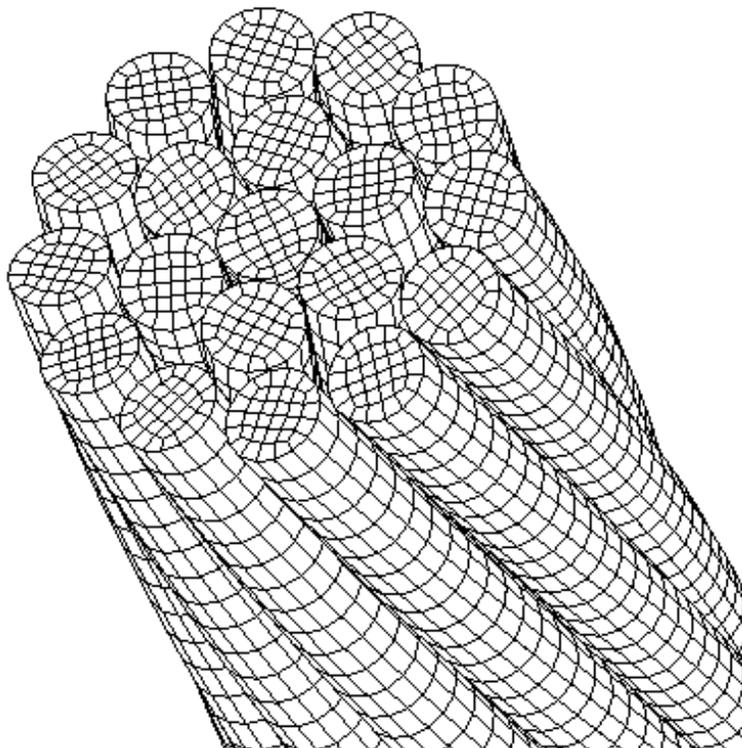


Figura 4.17: Mallado de los modelos.

El detalle de la calidad del mallado para un cable sin daño se muestra en la Tabla 4-3. Para efectos de esta cuantificación, la variación con respecto a los modelos con daño se considera despreciable debido a la simetría de la geometría de los cables.

Tabla 4-3: Calidad de mallado de los modelos.

Parámetro	Valor Promedio	Desviación Estándar
Calidad del Elemento	0,5727	0,1531
Razón de Aspecto	2,7687	0,5839
Razón Jacobiana	1,5830	0,4996
Factor de Torsión	$1,3289 \cdot 10^{-2}$	$6,1886 \cdot 10^{-3}$
Desviación Paralela	14,675	9,7896
Ángulo Máximo de Esquina	106,23°	10,95°
Oblicuidad	0,1868	0,1194
Calidad Ortogonal	0,9791	$2,0011 \cdot 10^{-2}$

Wang et al. [32] mencionan que, para EF lineales, hay que evitar elementos tetraédricos. Para el caso de elementos hexaédricos es pertinente verificar que los ángulos de esquina no se desvíen demasiado del caso ideal (90°) en regiones de concentración de

tensiones. Algo similar mencionan Benzley et al. [34], indicando que, para algunos casos, incluso elementos hexaédricos lineales arrojan mejores resultados que los tetraédricos cuadráticos. Los valores de la Tabla 4-3 muestran que esto se cumple. Además, de acuerdo a los trabajos de modelación que se revisaron para el presente trabajo (ver Capítulo 2), el mallado es acorde a los utilizados por los autores mencionados.

4.2.5 CRITERIO DE FALLA

Para considerar que un cable ha fallado se definió un criterio en base a la deformación plástica máxima, al igual que la utilizada por Judge et al. [20], a partir del valor que se obtiene de la ley constitutiva, calculado en la sección 3.5 ($\varepsilon_p = 7,47\%$). Debido a la complejidad de implementar una metodología de criterio de falla autónomo en *ANSYS* durante el presente trabajo, se optó por obtener la capacidad última de los cables mediante un método de inspección.

Para esto, los cables se analizaron hasta una elongación superior a la teórica esperada de rotura. Luego se hizo una inspección visual en una zona representativa (suficientemente alejada de las condiciones de borde) de las tensiones plásticas equivalentes para la fibra más crítica (núcleo, para los casos vírgenes; fibras vecinas al daño, para los casos dañados). Si existe una superficie con tensiones superiores al límite antes definido, que atraviese toda la sección del alambre, se dice que el cable completo ha fallado en ese punto del análisis. De ahí se obtiene la capacidad de carga última y la deformación axial máxima del espécimen.

Es importante recalcar que el criterio de falla antes mencionado y su metodología correspondiente cumplen un fin meramente académico y no representan la realidad de un cable llegando a su capacidad última. Esto pues cualquier punto que alcance una deformación plástica máxima, en un caso real, sufriría una ruptura y dejaría de tomar carga mientras que, de acuerdo al funcionamiento de *ANSYS*, en los modelos, esos mismos puntos siguen resistiendo tensión, pero a nivel constante igual a la máxima de rotura.

Se cree que, para efectos del presente estudio, proceder de la manera acá explicada no supone incurrir en un error metodológico puesto que, ya que el análisis es comparativo y ajeno a resultados fuera del mismo, lo que prima es la rigurosidad de la aplicación de los métodos e imparcialidad con la que éstos son utilizados en cada uno de los modelos estudiados.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS MODELOS EN ANSYS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con los análisis hechos en ANSYS para los distintos casos estudiados, mencionados en el Capítulo 3, sección 3.2.

5.1 VALIDACIÓN HIPÓTESIS DE ANÁLISIS SECCIONAL

Una de las hipótesis del presente estudio es que, alejado suficientemente de las condiciones de borde del cable (en este caso, empotramiento en ambos extremos), tanto deformaciones como tensiones de la sección no presentan mayores variaciones que hagan pensar que exista una dependencia de dichos parámetros con la posición a lo largo del eje longitudinal del cable que se observe.

La corroboración de esta hipótesis supondría, a su vez, validar los modelos simplificados 2D, en los que se analiza la sección transversal del elemento como una viga, sin incorporar dentro del modelo mecánico la longitud del cable ni, por ende, la posición a lo largo de su eje axial.

Para realizar esta validación se tomó el cable de diámetro 3,5 mm sin daño y con dos fibras dañadas. Luego de obtener los resultados del modelo de acuerdo al protocolo de simulación expuesto en el presente trabajo, se hizo una inspección de las tensiones desarrolladas en los elementos del cable a cierto nivel de deformación axial del cable (cerca de la mitad de la deformación axial última de falla para cada caso) para tres secciones: a un cuarto, un medio y tres cuartos de distancia desde el apoyo fijo del espécimen (Figura 5.1).

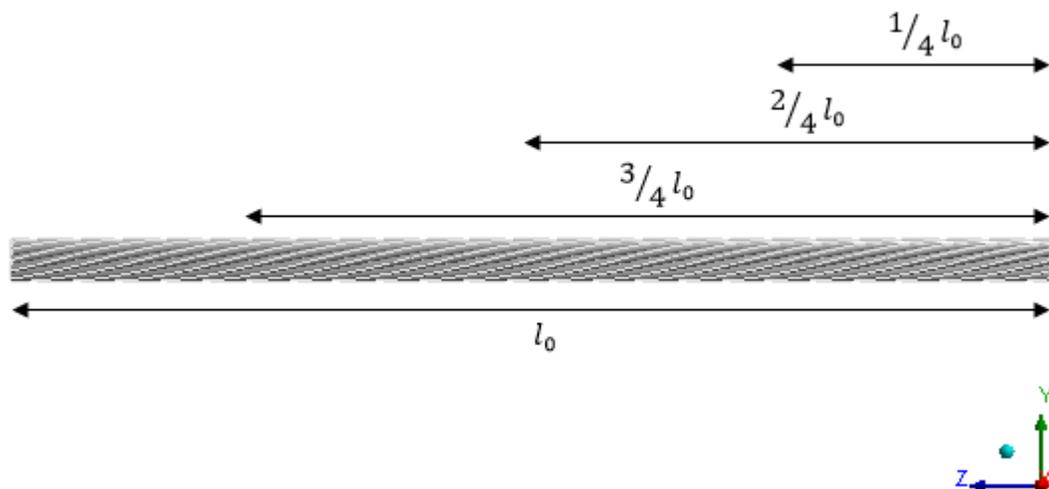


Figura 5.1: Secciones transversales estudiadas para verificación de análisis seccional.

Las siguientes figuras presentan las tensiones equivalentes de los modelos utilizados para validar la hipótesis del análisis seccional (Figura 5.2 Figura 5.11).

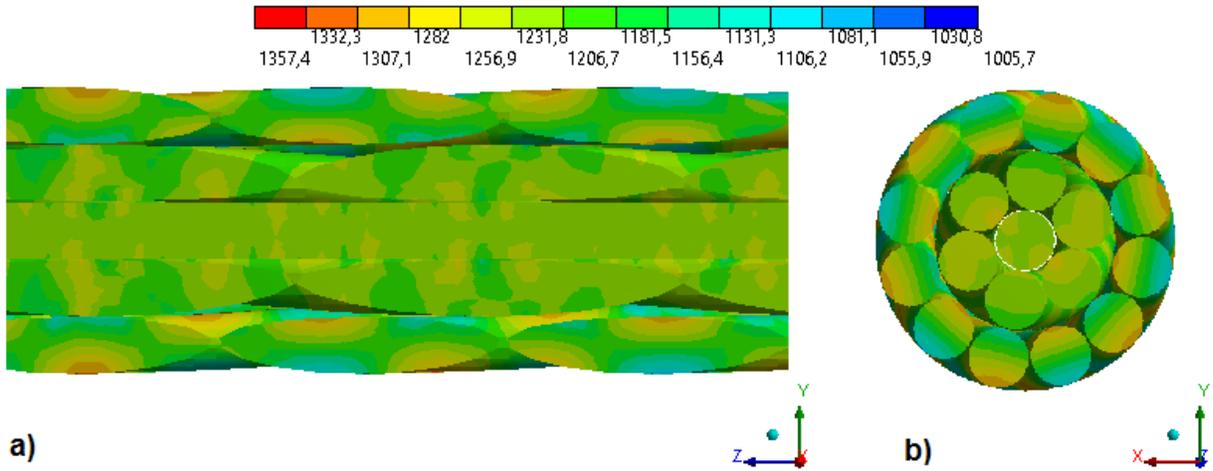


Figura 5.2: Tensiones equivalentes para deformación axial $\varepsilon=3,9\%$ en sección longitudinal (a) y transversal (b) para zona $1/4 l_0$ cable $d=3,5$ mm sin daño.

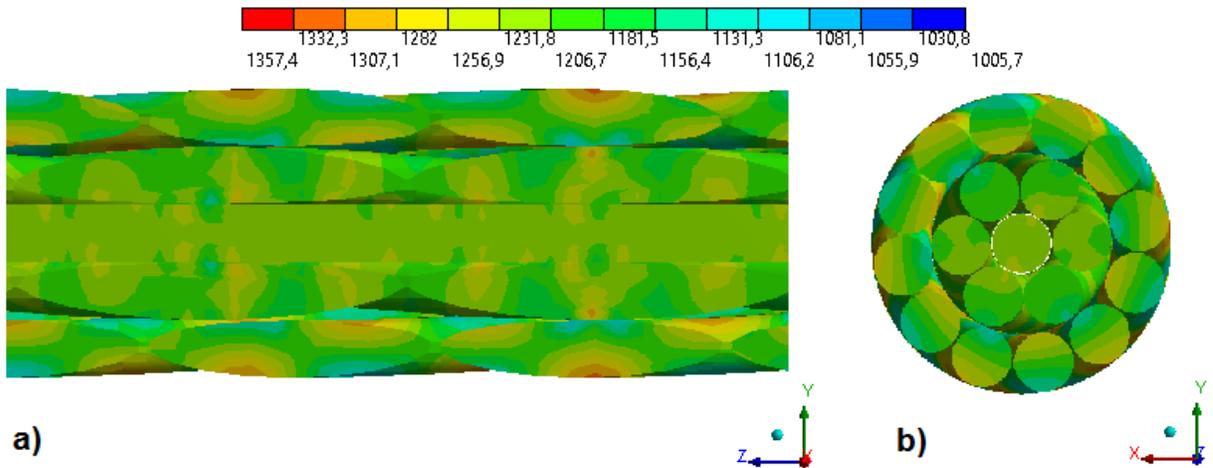


Figura 5.3: Tensiones equivalentes para deformación axial $\varepsilon=3,9\%$ en sección longitudinal (a) y transversal (b) para zona $2/4 l_0$ cable $d=3,5$ mm sin daño.

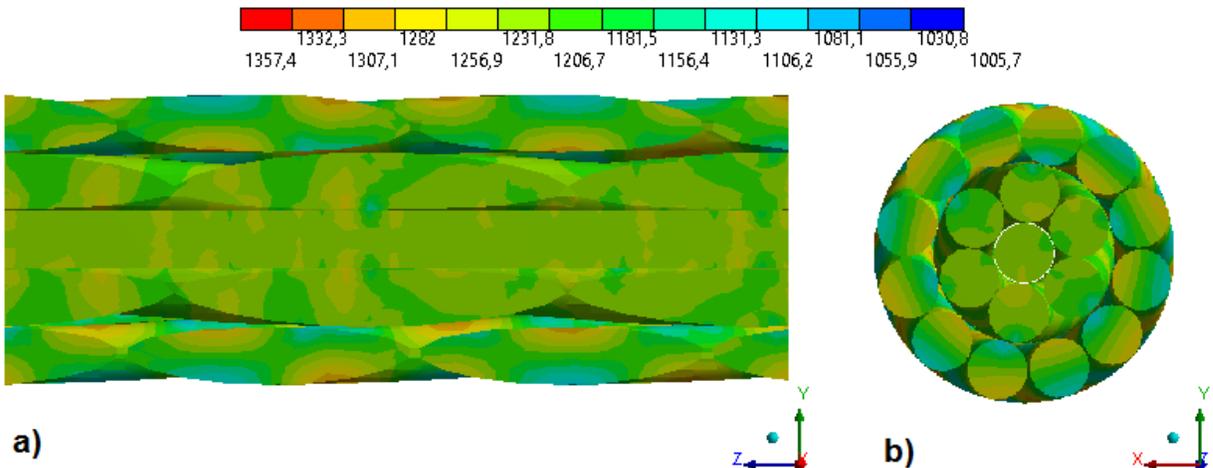


Figura 5.4: Tensiones equivalentes para deformación axial $\varepsilon=3,9\%$ en sección longitudinal (a) y transversal (b) para zona $3/4 l_0$ cable $d=3,5$ mm sin daño.

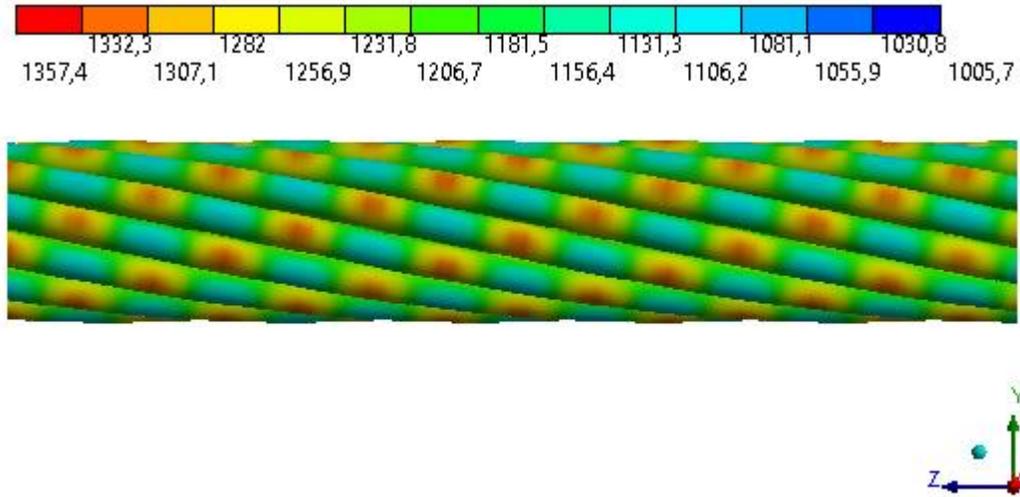


Figura 5.5: Tensiones equivalentes en capa externa de fibras para deformación axial $\varepsilon=3,9\%$ de cable $d=3,5$ mm sin daño.

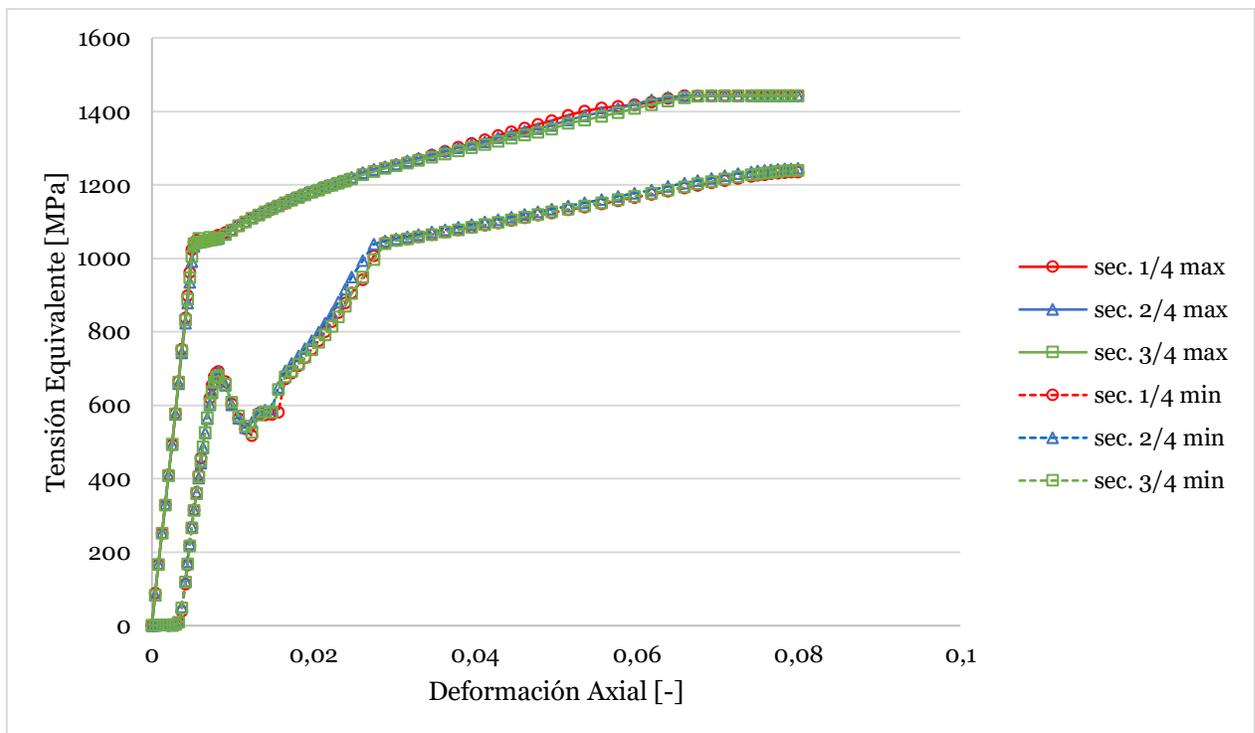


Figura 5.6: Tensiones equivalentes máximas y mínimas para secciones a 1/4, 2/4 y 3/4 de largo de cable a variación de deformación axial del espécimen sin daño.

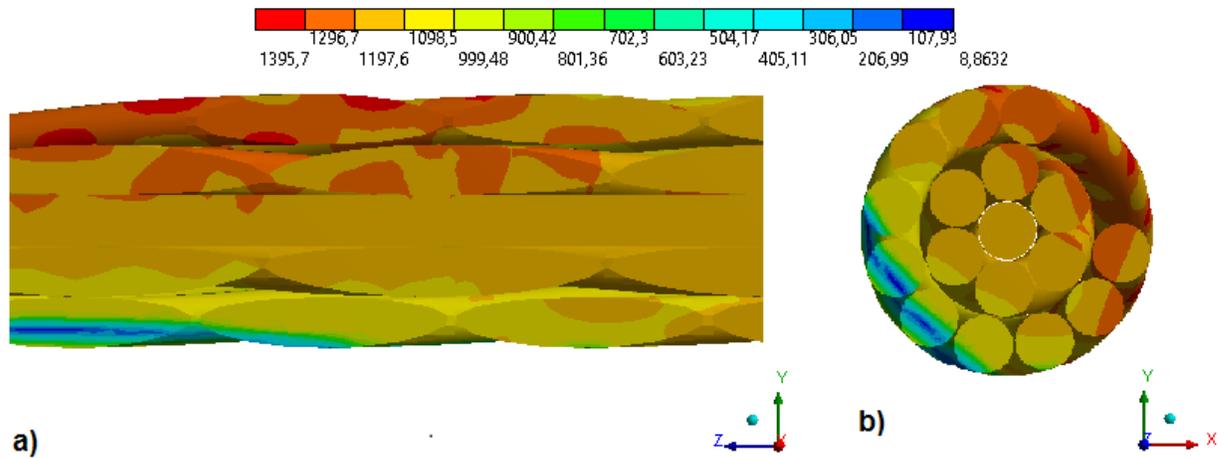


Figura 5.7: Tensiones equivalentes para deformación axial $\varepsilon=2,7\%$ en sección longitudinal (a) y transversal (b) para zona $1/4 l_0$ cable $d=3,5$ mm con dos fibras dañadas asimétricamente.

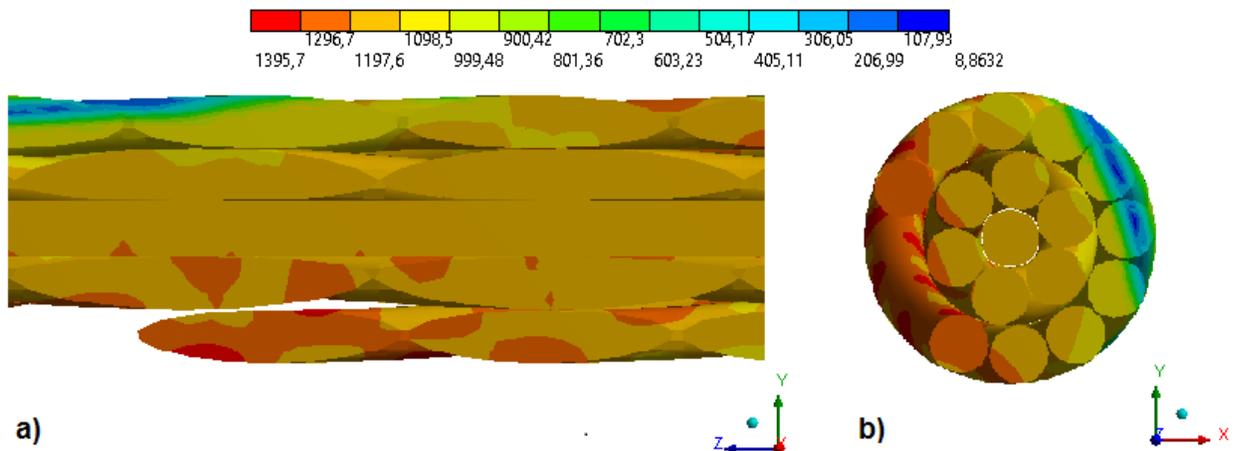


Figura 5.8: Tensiones equivalentes para deformación axial $\varepsilon=2,7\%$ en sección longitudinal (a) y transversal (b) para zona $2/4 l_0$ cable $d=3,5$ mm con dos fibras dañadas asimétricamente.

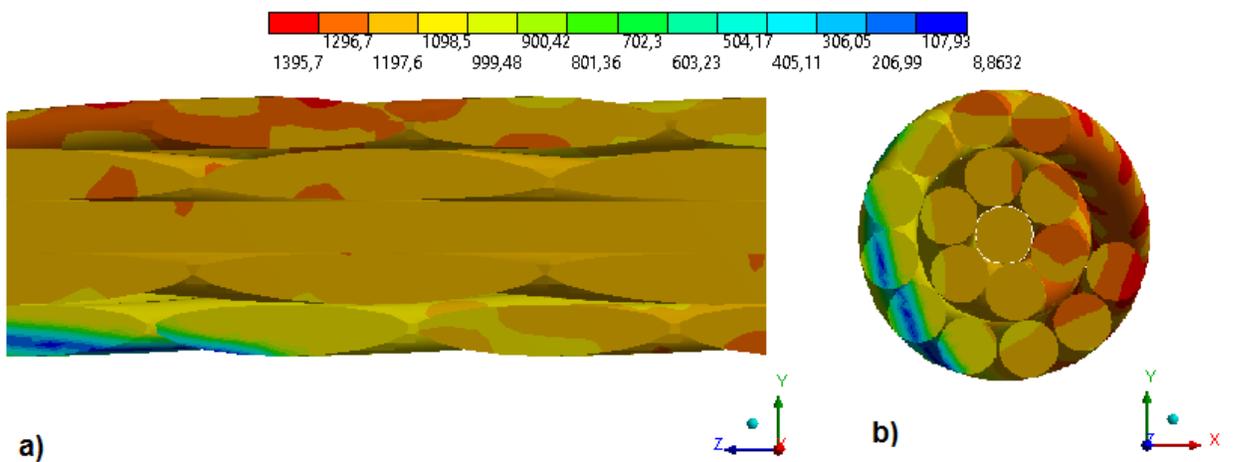


Figura 5.9: Tensiones equivalentes para deformación axial $\varepsilon=2,7\%$ en sección longitudinal (a) y transversal (b) para zona $3/4 l_0$ cable $d=3,5$ mm con dos fibras dañadas.

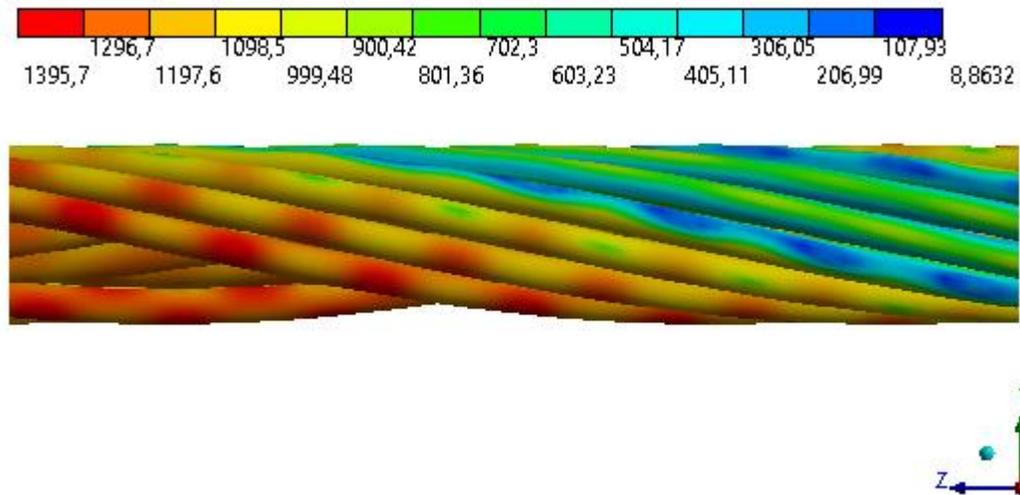


Figura 5.10: Tensiones equivalentes en capa externa de fibras para deformación axial $\varepsilon=2,7\%$ de cable $d=3,5$ mm con dos fibras dañadas asimétricamente.

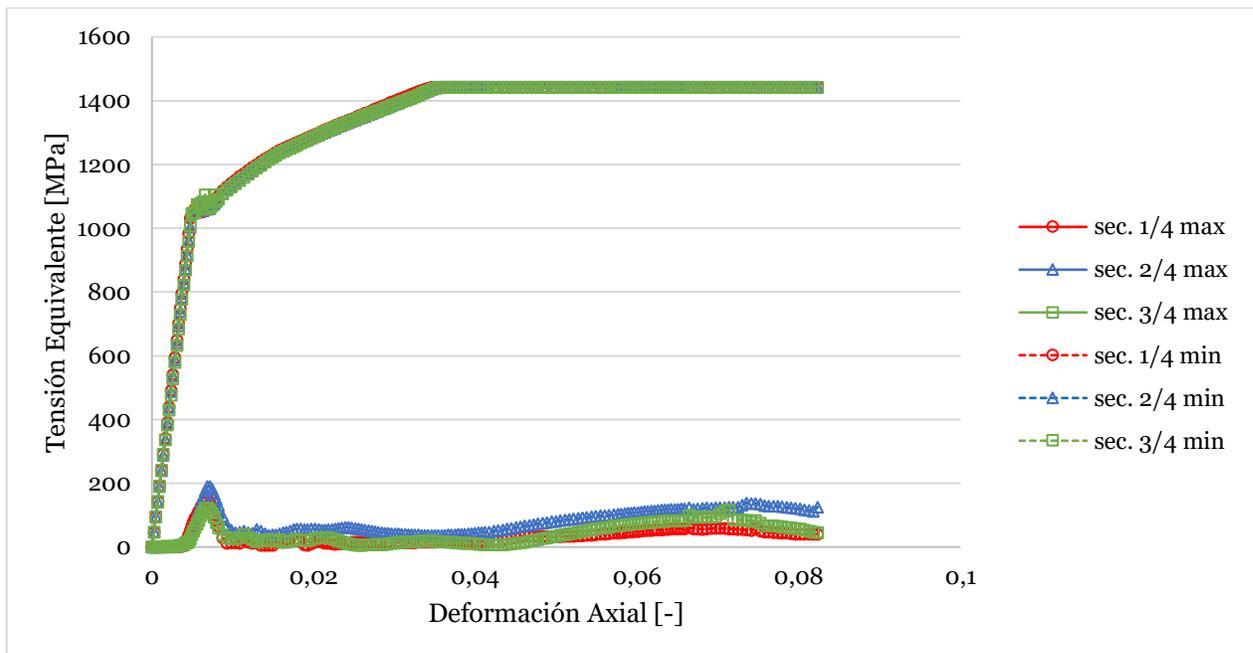


Figura 5.11: Tensiones equivalentes máximas y mínimas para secciones a 1/4, 2/4 y 3/4 de largo de cable a variación de deformación axial del espécimen con daño.

Al comparar entre ellas las Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4, y las Figura 5.7, Figura 5.8 y Figura 5.9 se puede observar que las tensiones tanto longitudinalmente como transversalmente no presentan mayores variaciones. Las diferencias que se presentan son menores y relacionadas con las interacciones de contacto locales que se repiten periódicamente a lo largo del cable, como se aprecia en la Figura 5.5 y Figura 5.10. Este patrón de tensiones se produce por los contactos entre fibras, el que ocurre, para un mismo alambre, cada vez que vuelve a “apoyarse” sobre el elemento de la capa subyacente.

Finalmente, las Figura 5.6 y Figura 5.11 cuantifican el rango de tensiones para las tres secciones transversales analizadas, mostrando que la variación de esfuerzos entre estas tres zonas para un mismo nivel de deformación axial es despreciable, confirmando así que un análisis seccional independizado de la posición dentro del eje longitudinal del cable, alejado al menos medio largo de paso de la última capa ($0,5p_3$) de las condiciones de borde, es apropiado y tiene validez suficiente para ser utilizado en el presente estudio, extendido a todas las configuraciones con las que se trabajará.

Lo anterior extiende los resultados obtenidos del estudio hecho por Ghoreishi et al. [16], donde se menciona que las condiciones de borde no juegan un rol diferenciador para cables en que el largo es mayor o igual a dos veces el paso de sus fibras, para casos en que existe daño superficial y asimétrico.

5.2 DEFORMADA DEL CABLE

La asimetría del daño produce desplazamientos radiales significativos en los modelos que pierden fibras. A continuación se muestran las deformadas últimas de los especímenes dañados (Figura 5.12 - Figura 5.19) y el desplazamiento radial en función de la deformación axial de estos modelos (Figura 5.20 y Figura 5.21). El cable sin daños no presenta desplazamientos radiales, salvo por efectos de estricción y Poisson.

Cable $d = 3,5 \text{ mm}$:

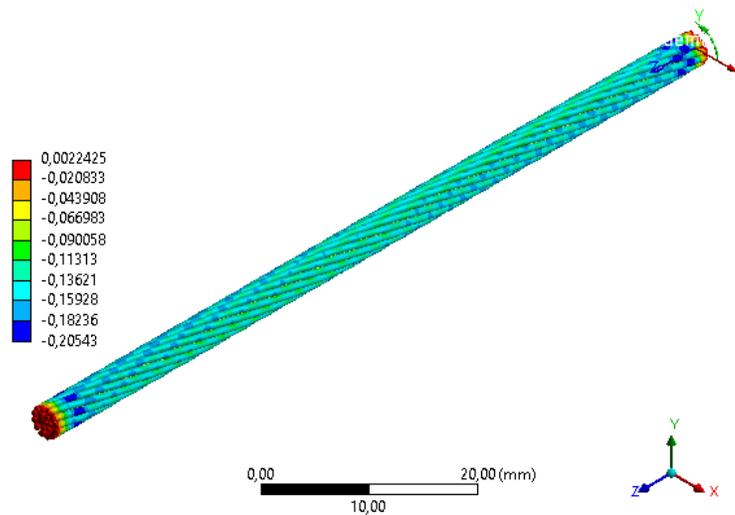


Figura 5.12: Deformación radial [mm] última de cable $d=3,5 \text{ mm}$ sin daño (SD).

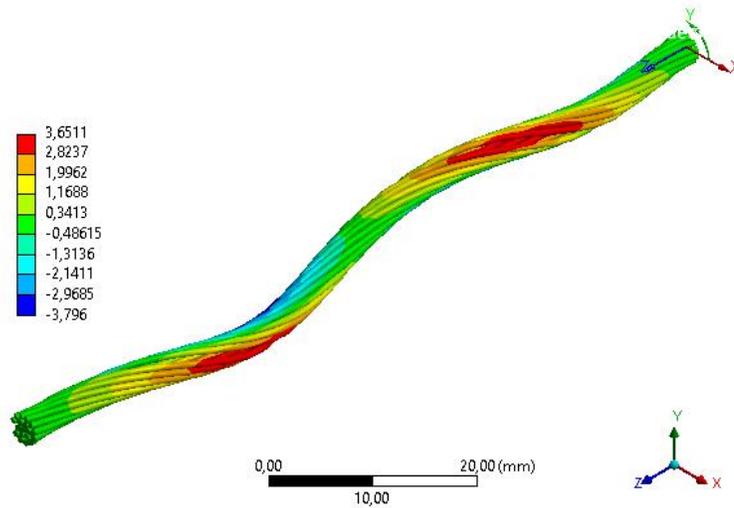


Figura 5.13: Deformación radial [mm] última de cable $d=3,5$ mm con una fibra dañada (D1).

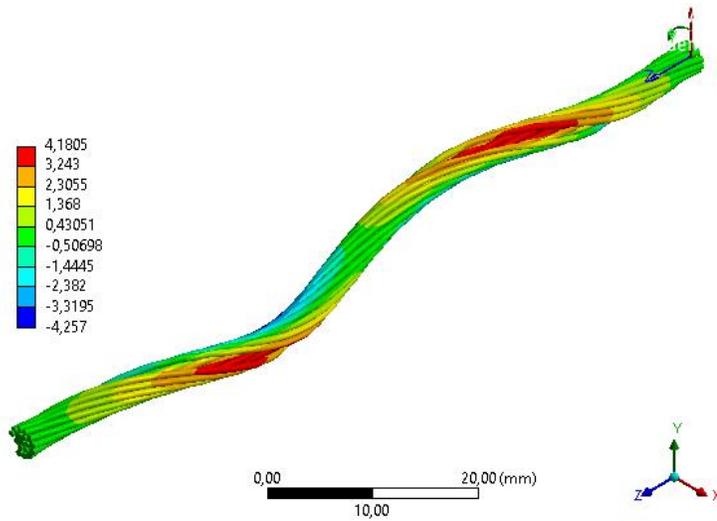


Figura 5.14: Deformación radial [mm] última de cable $d=3,5$ mm con dos fibras dañadas (D2).

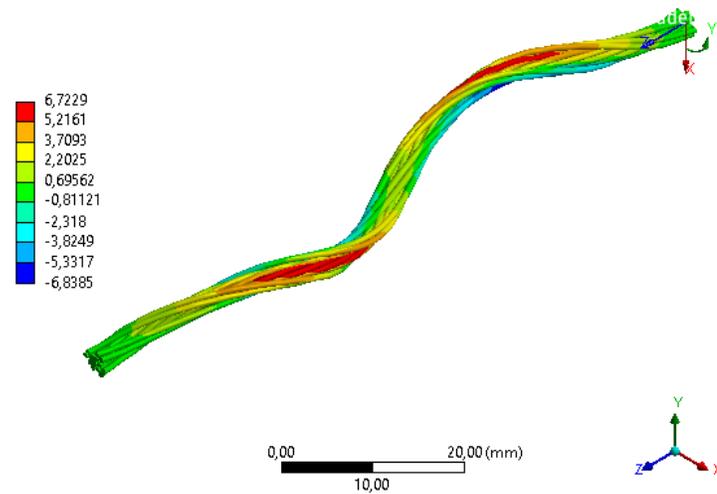


Figura 5.15: Deformación radial [mm] última de cable $d=3,5$ mm con seis elementos dañados (D6).

Cable $d = 22,22$ mm:

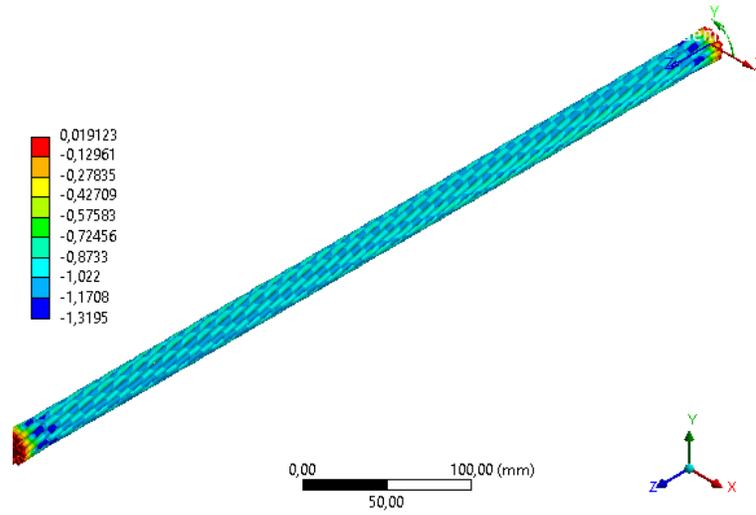


Figura 5.16: Deformación radial [mm] última de cable $d=22,22$ mm sin daño (SD).

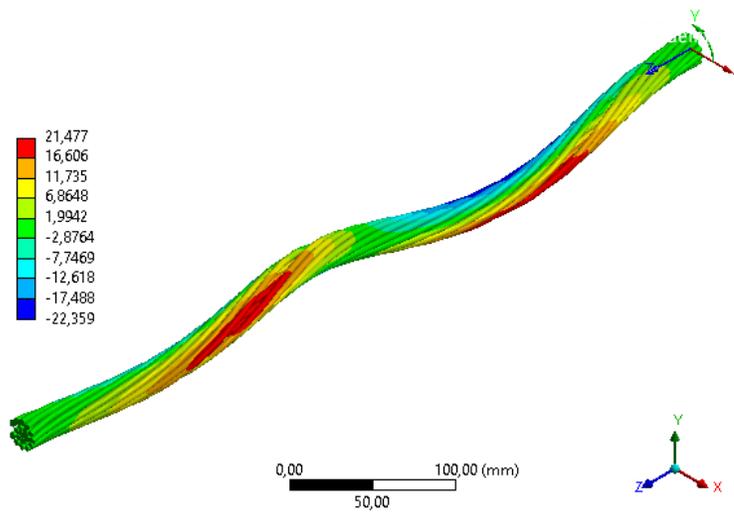


Figura 5.17: Deformación radial [mm] última de cable $d=22,22$ mm con un elemento dañado (D1).

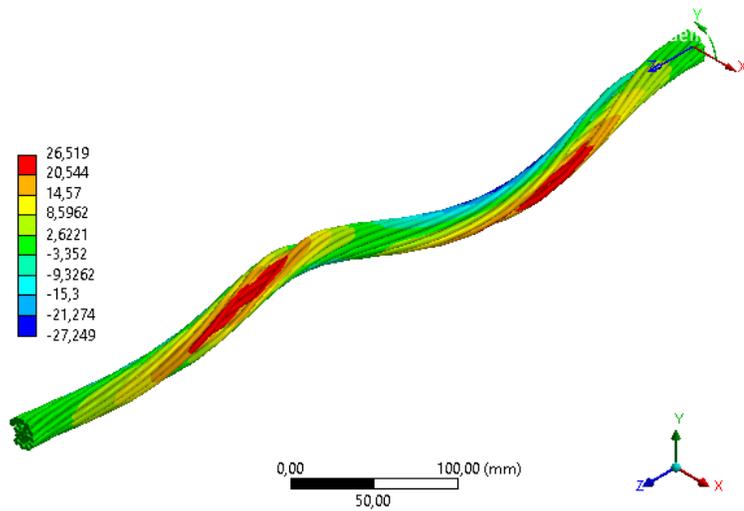


Figura 5.18: Deformación radial [mm] última de cable $d=22,22$ mm con dos elementos dañados (D2).

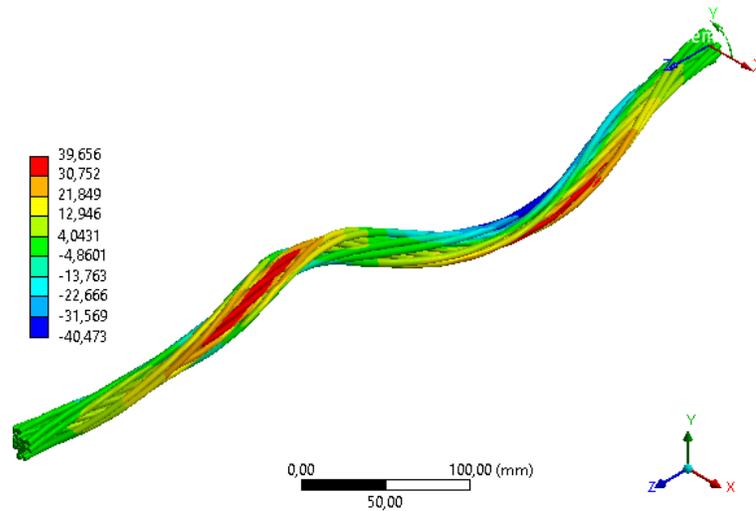


Figura 5.19: Deformación radial [mm] última de cable $d=22,22$ mm con seis elementos dañados (D6).

Los siguientes gráficos (Figura 5.20 y Figura 5.21) muestran el desplazamiento radial que sufren los cables a medida que se deforman axialmente para los casos dañados, puesto que, cuando no existe daño, no hay desalineación con el eje central.

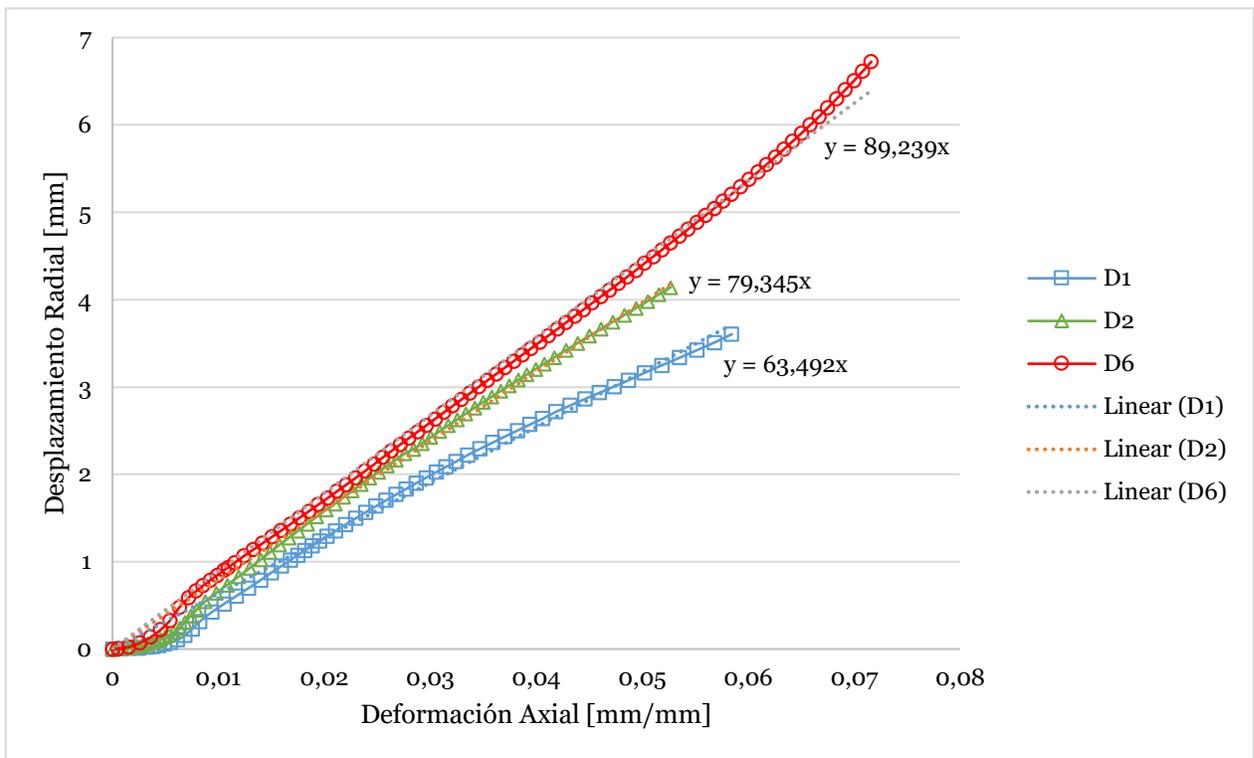


Figura 5.20: Desplazamiento radial máximo en función de la deformación axial de casos dañados $d=3,5$ mm.

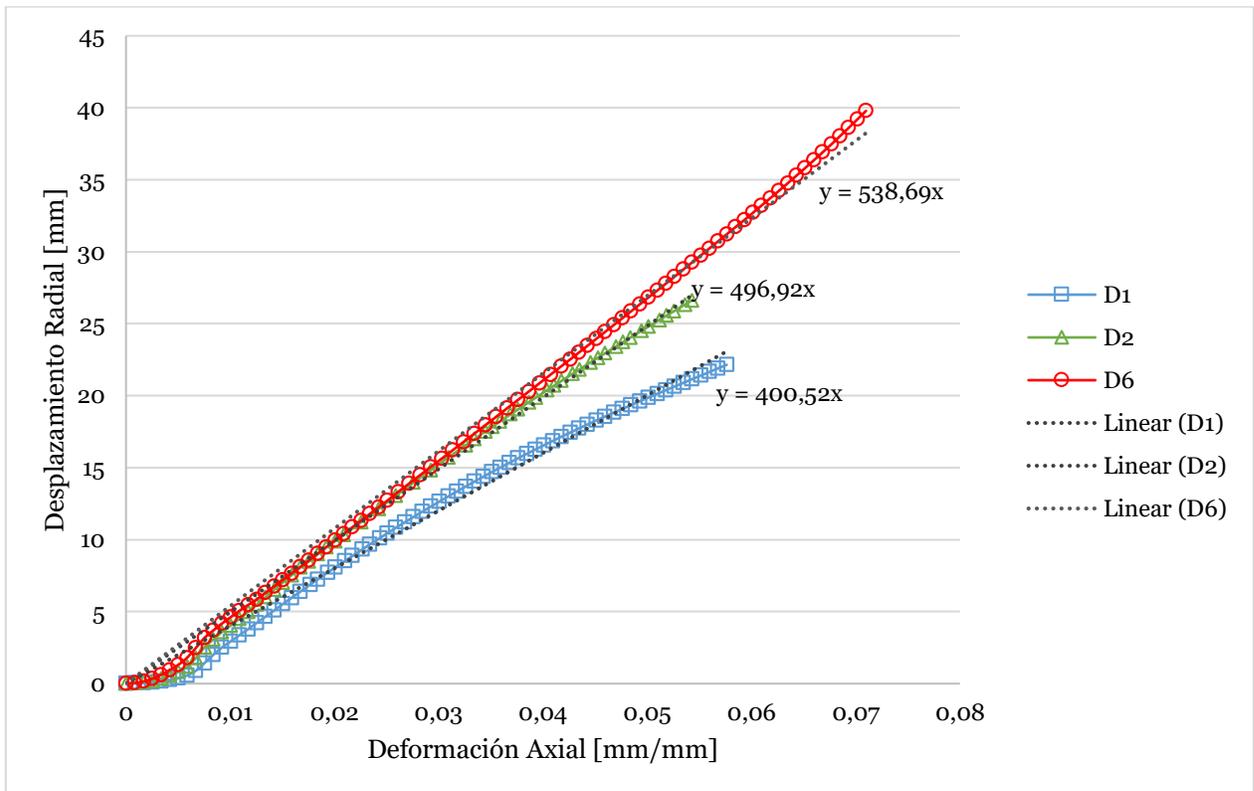


Figura 5.21: Desplazamiento radial máximo en función de la deformación axial de casos dañados $d=22,22$ mm.

En las Figura 5.20 y Figura 5.21 se incluye una línea de tendencia lineal que aproxima el desplazamiento radial en función de la deformación axial del cable. Si se define la pendiente de dicha regresión como un “tasa de desplazamiento radial” (TDR), se puede obtener la relación entre la desalineación del eje central del cable con el índice de asimetría del daño. Si se normaliza dicha tasa por el radio del cable, se obtiene una razón adimensional definida como “tasa de desplazamiento radial normalizada” (TDRN), como se muestra en la Tabla 5-1. Al promediar las TDRN de ambos diámetros se obtiene el gráfico de la Figura 5.22.

Tabla 5-1: Tasa de Desplazamiento Radial Normalizada para cada diámetro y el promedio de ambos, para cada Índice de Asimetría.

	TDRN		
	D1	D2	D6
IA	0,085	0,167	0,213
<i>d</i> = 3,5 mm	18,13	22,67	25,42
<i>d</i> = 22,22 mm	18,03	22,36	24,24
Promedio	18,08	22,51	24,83

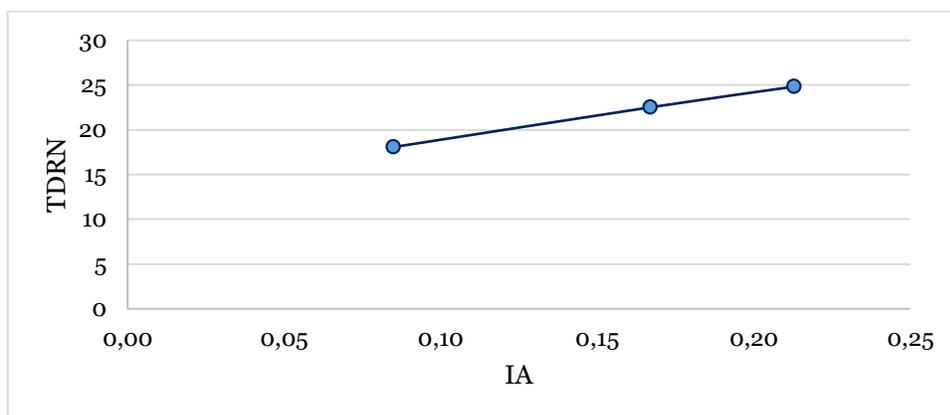


Figura 5.22: Tasa de Desplazamiento Radial Normalizada, promedio de ambos cables, en función del Índice de Asimetría.

El efecto que tiene la asimetría del daño en el cable tiene un impacto directo con la deformada final de éste cuando se desplaza un extremo axialmente. Se observa un desplazamiento radial a lo largo de su eje, en una dirección perpendicular al eje de simetría de la sección, en el sentido en que se concentra el mayor daño. Esto genera una flexión en la sección transversal y su consiguiente gradiente de tensiones y deformaciones.

Además, la deformada mostrada respalda la validez del análisis seccional. Esto pues el empotramiento en los extremos del cable impide que éste de deforme radialmente en la cercanía de las condiciones de borde, pero, alejado $\frac{1}{4}$ de su largo, ya presenta la libertad radial que permita llegar a una posición que equilibre las fuerzas desbalanceadas producto de la asimetría.

Las Figura 5.20 y Figura 5.21 muestran que siempre, a mayor IA, para cualquier deformación axial del cable, va a existir un mayor grado de deformación radial, para un mismo diámetro. Además, en el gráfico de la Figura 5.22, se puede apreciar una correlación casi lineal entre tasa de desplazamiento radial e índice de asimetría. Vale la pena destacar, sin embargo, que dicha correlación no podría extenderse a todo el dominio de los valores de IA puesto que, para un IA igual a cero, existiría desplazamiento radial, fenómeno que no se ve en la deformada del cable sin daño. Se supone entonces que, al extender la curva de la Figura 5.22 para valores de índice de asimetría que incluyan el caso sin daño, tiene que existir una pendiente inicial de TDRN mayor y luego suavizarse hasta llegar a los valores graficados. Se desprende de aquí que, para valores de IA muy pequeños, el desplazamiento radial es proporcionalmente mayor que cuando se alcanza el rango utilizado en el presente estudio ($IA=[0,085; 0,213]$).

Se graficó también el *gap* que define la norma ISO4309, el cual se calcula como el doble del desplazamiento radial del centro del cable. Se trazó la línea que, de acuerdo a dicho código, define el valor máximo que este parámetro puede tomar antes de ser necesario el reemplazo del cable.

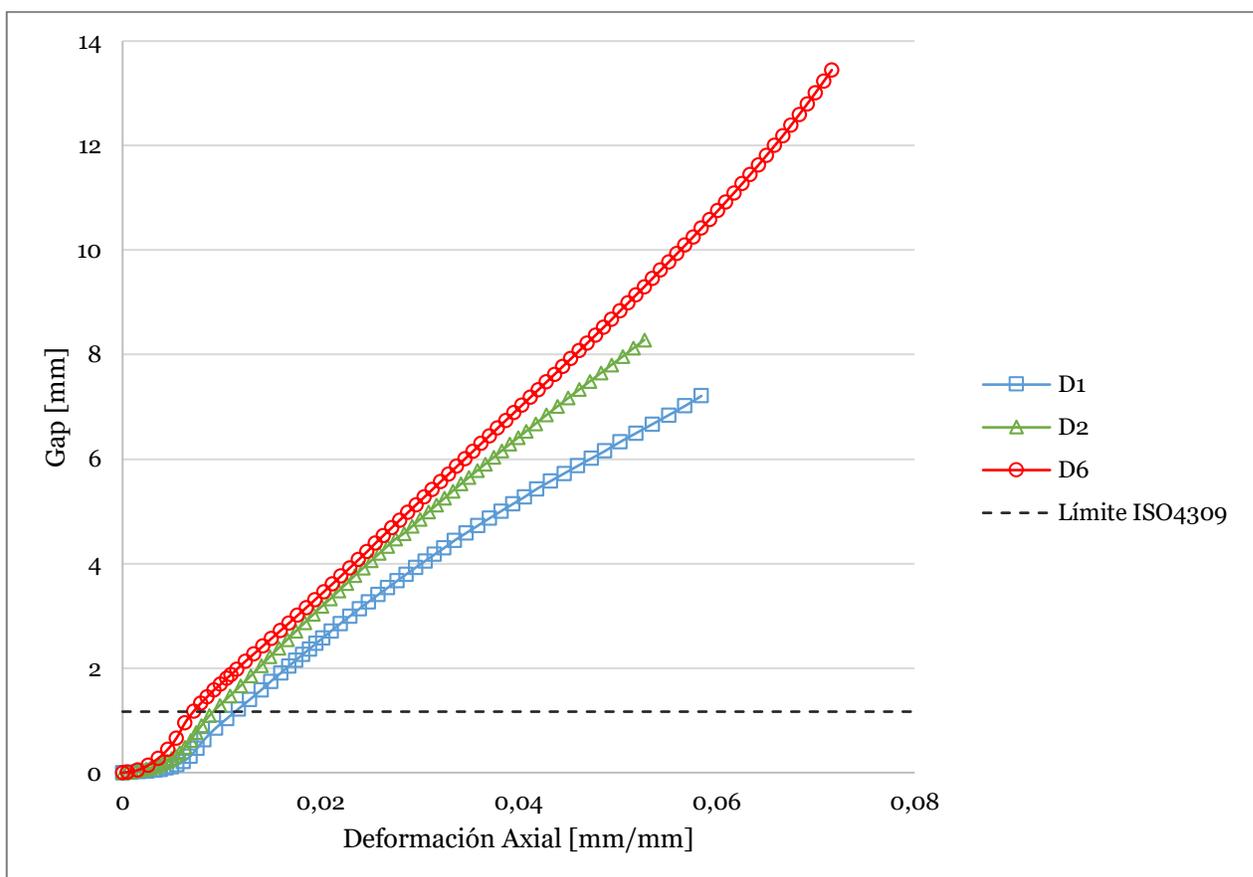


Figura 5.23: Gap para cable $d=3,5$ mm.

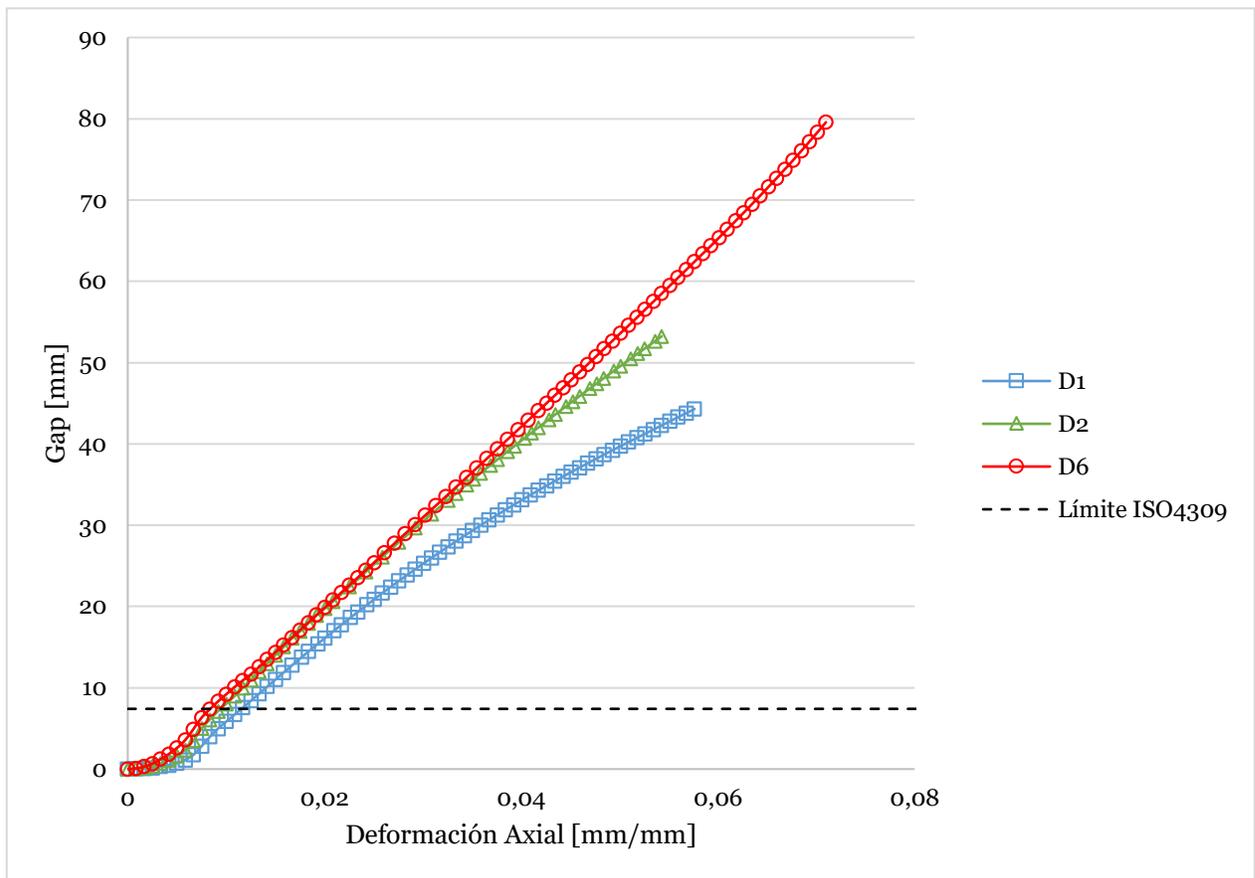


Figura 5.24: Gap para cable $d=22,22$ mm.

Es posible obtener también el grado de deformación axial para el cuál el *gap* supera el valor permitido por norma, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5-2: Deformación axial para la que se supera el *gap* según ISO4309.

Configuración	d=3,5mm	d=22,22mm
D1	0,0126	0,0103
D2	0,0102	0,008
D6	0,0086	0,0072

Se observa en las figuras anteriores que el límite definido por la norma ISO asegura que el cable aún tiene una alta capacidad de deformación antes de alcanzar la falla. Además, el *gap* permisible tiene valores cinco y hasta casi diez veces menores que los que puede alcanzar un cable antes de su falla total.

5.3 CAPACIDAD DE CARGA

Se analizó la carga axial en función de la deformación axial que son capaces de soportar los cables en sus cuatro configuraciones (Figura 5.25 y Figura 5.26): sin daño, una fibra dañada, dos fibras dañadas y seis fibras dañadas.

Se aprecia que los cables presentan un comportamiento similar, en cuanto a su rigidez, con la ley constitutiva del material que los compone. Esto, ya que muestran un rango elástico lineal para pequeñas deformaciones (menores a un 0,5%), para luego entrar una fase de fluencia que define una nueva pendiente lineal de fuerza-deformación. De aquí que es posible decir que existen dos rigideces para los cables: una elástica y una plástica. La rigidez elástica es válida hasta una deformación cercana al 0,5% y la plástica desde aproximadamente un 1% de elongación. Entre estas dos fases, se puede hablar de una etapa de elasto-plástica del elemento.

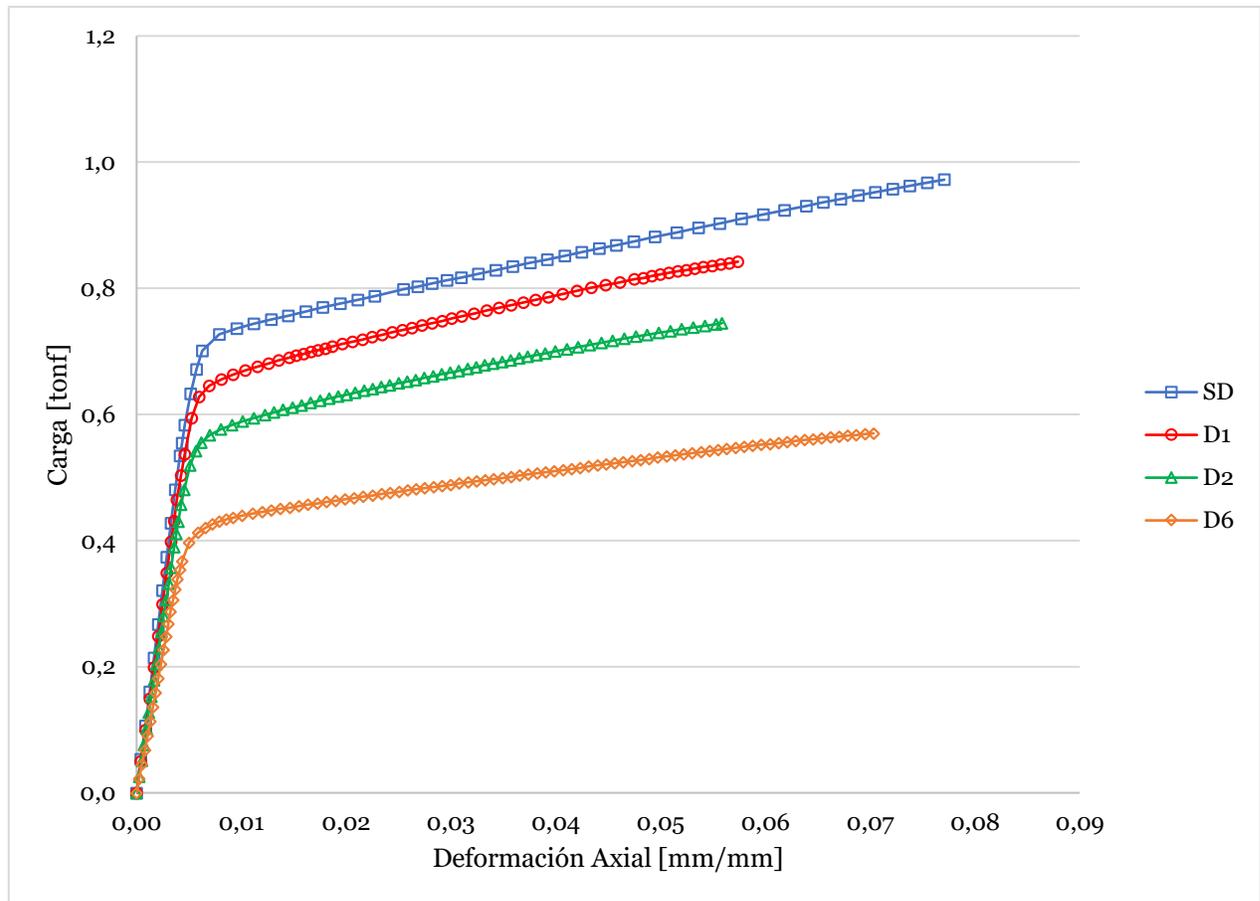


Figura 5.25: Carga v/s Deformación axial para cable $d=3,5$ mm.

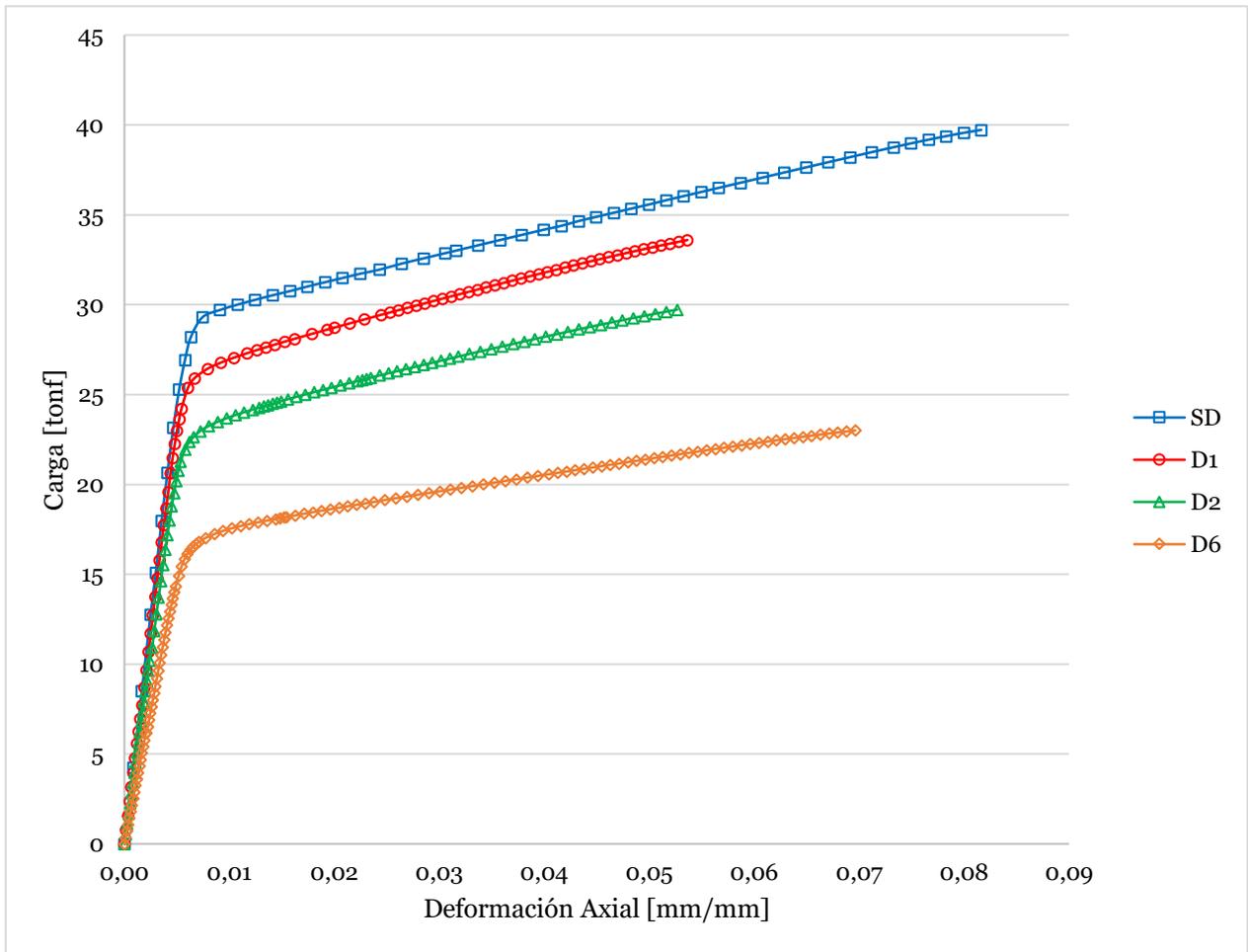


Figura 5.26: Carga v/s Deformación axial para cable $d=22,22$ mm.

Al evaluar los valores de deformación axial para los cuales se supera el *gap* máximo definido por norma ISO (ver Tabla 5-2) en las curvas de capacidad de las Figura 5.25 y Figura 5.26, es posible observar que la incursión en el rango plástico del cable dañado es muy pequeña.

Se calculó la capacidad de carga última teórica por área neta (AN), según la siguiente Ecuación (5.1) ([16]), con el fin de ser comparada con los valores obtenidos de las simulaciones,

$$F_{u,AN} = A_i \sigma_u (1 + n_2 \cos^2(\alpha_2) + n_3 \cos^2(\alpha_3)) \quad (5.1)$$

donde A_i corresponde al área de la sección transversal de las fibras (igual para todos los alambres de un cable en los presentes modelos); σ_u es la tensión última de rotura del material; n_2 y n_3 corresponden al número de fibras en las capas dos y tres, respectivamente; α_2 y α_3 corresponden al ángulo de hélice de las capas dos y tres, respectivamente.

Tabla 5-3: Capacidades últimas cable $d=3,5$ mm.

Configuración	SD	D1	D2	D6
IA	0,000	0,085	0,167	0,213
% Daño	0,0%	5,3%	10,5%	31,6%
$F_{u,AN}$ [tonf]	1,066	1,0101	0,954	0,730
$F_{u,FEM}$ [tonf]	0,972	0,842	0,738	0,570
ε_u	7,7%	5,7%	5,5%	7,0%
FEM/AN	0,912	0,834	0,773	0,781
FEM/SD	1,000	0,866	0,756	0,586
FEM/ANM	1,000	0,914	0,848	0,857

Tabla 5-4: Capacidades últimas cable $d=22,22$ mm.

Configuración	SD	D1	D2	D6
IA	0,00	0,09	0,17	0,21
% Daño	0,0%	5,3%	10,5%	31,6%
$F_{u,AN}$ [tonf]	42,966	40,710	38,454	29,429
$F_{u,FEM}$ [tonf]	38,974	33,596	29,724	23,012
ε_u	7,50%	5,36%	5,27%	6,81%
FEM/AN	0,907	0,827	0,773	0,782
FEM/SD	1,000	0,862	0,763	0,590
FEM/ANM	1,000	0,910	0,852	0,863

Las Tabla 5-3 y Tabla 5-4 muestran las capacidades de carga y deformación últimas (F_u y ε_u) para las cuatro configuraciones, según modelos, además de dos razones definidas para este análisis:

- **FEM/AN:** razón entre la carga última obtenida por modelación en EF (FEM) y la carga última obtenida teóricamente por área neta (AN).

$$\frac{F_{u,FEM,i}}{F_{u,AN,i}} \quad (5.2)$$

- **FEM/SD:** razón entre la carga última obtenida para cada modelo y la carga última obtenida para el caso sin daño (SD), ambos desde la FEM.

$$\frac{F_{u,FEM,i}}{F_{u,FEM,SD}} \quad (5.3)$$

- **FEM/ANM:** razón entre la carga última obtenida para cada modelo y la carga última obtenida para el caso sin daño ponderado por el área neta efectiva de la sección ($1 - \%Daño$), ambas por FEM.

$$\frac{F_{u,FEM,i}}{F_{u,FEM,SD} \cdot (1 - \%Daño)} \quad (5.4)$$

La deformación última (ϵ_u) se obtuvo desde el análisis en EF aplicando el criterio de falla definido para este estudio.

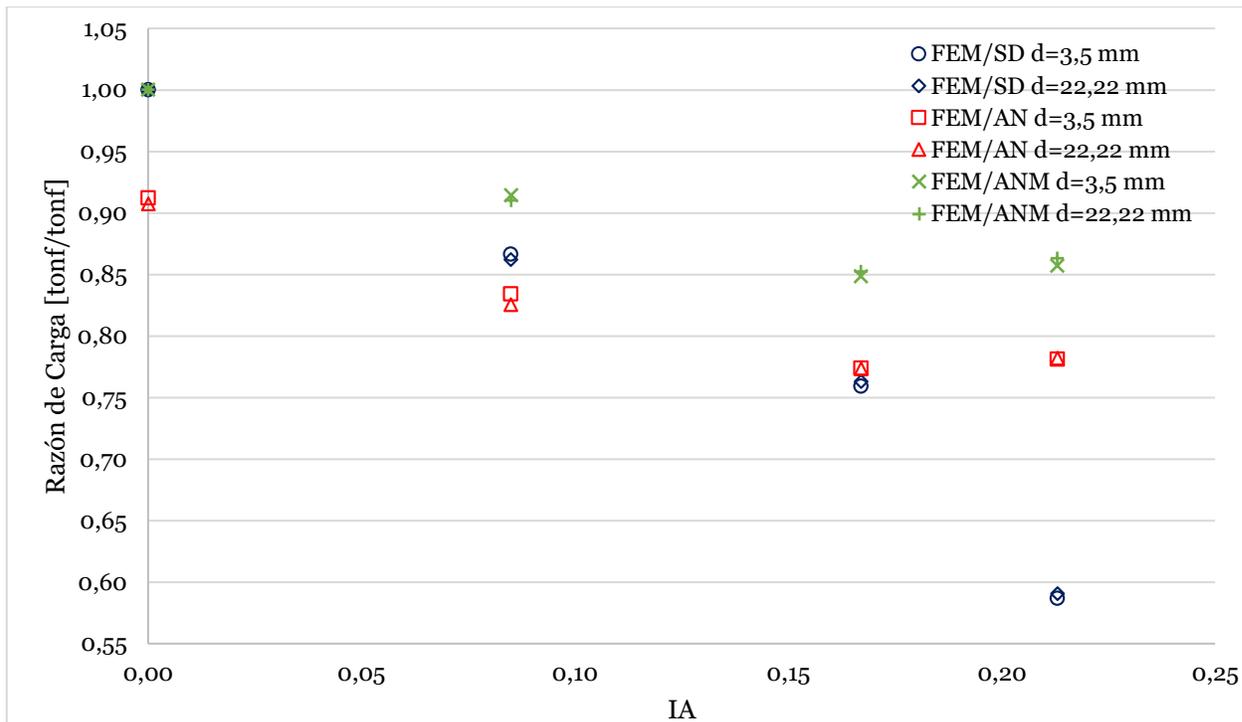


Figura 5.27: Razones de capacidad de carga en función del Índice de Asimetría.

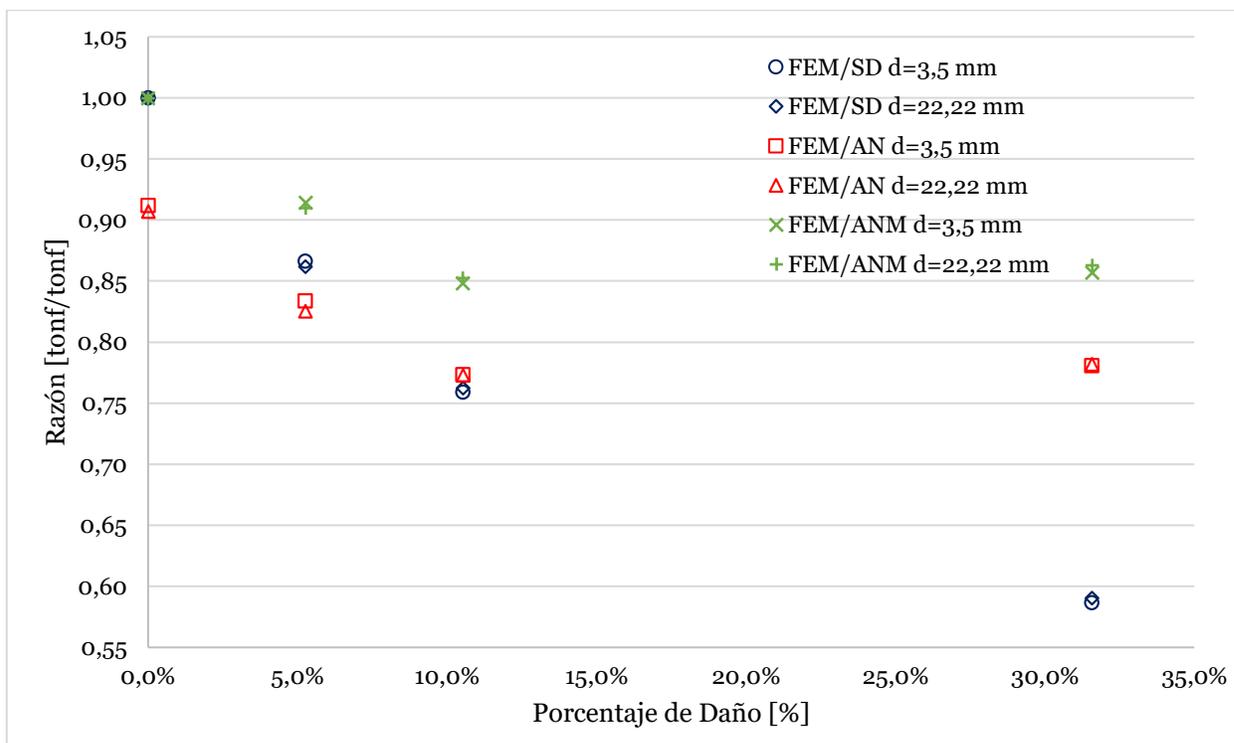


Figura 5.28: Razones de capacidad de carga en función del Porcentaje de daño.

Tabla 5-5: Pérdida de capacidad de carga según porcentaje de daño.

Configuración	Daño	d=3,5 mm	d=22,22 mm
SD	0,0%	0,0%	0,0%
D1	5,3%	13,4%	13,8%
D2	10,5%	24,1%	23,7%
D6	31,6%	41,4%	41,0%

Se aprecia que en todos los casos la resistencia de los cables se ve disminuida con respecto al valor que se obtiene por área neta. Las Figura 5.27 y Figura 5.28 muestran que, a medida que se aumenta el daño y el IA, la razón de capacidad con respecto a la configuración no dañada (FEM/SD) se hace menor. Sin embargo, la razón por área neta (FEM/AN) crece para el cable son seis fibras dañadas, al contrastarse con la configuración con dos daños. Por otra parte, se observa que los puntos de FEM/ANM muestran que la disminución en la capacidad de carga es mayor que la pérdida de área neta de la sección.

No se observan variaciones sustantivas para las razones FEM/SD, FEM/AN y FEM/ANM entre los distintos diámetros.

Los siguientes gráficos muestran la diferencia entre la curva de capacidad obtenida de la modelación en EF para los casos dañados y las curvas calculadas a partir del caso sin daño ponderado por su factor de área neta ($1 - \% \text{ Daño}$), denominada ANM.

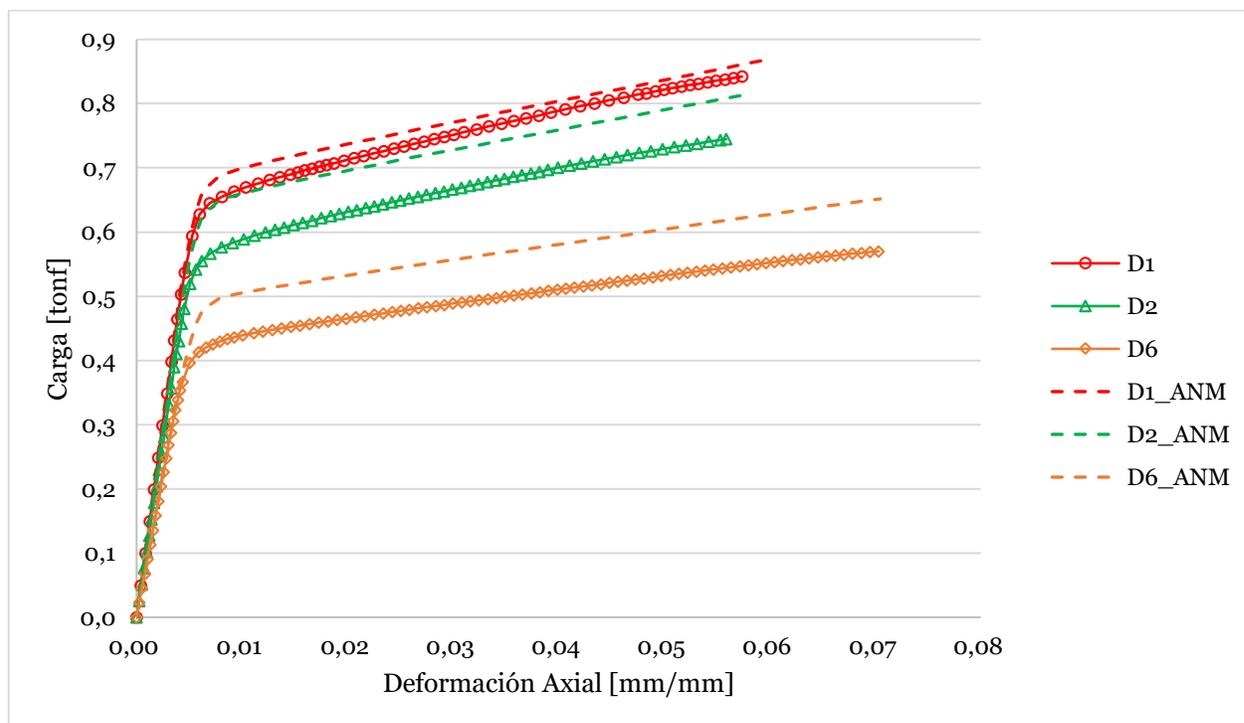


Figura 5.29: Curva de capacidad para FEM y ANM, cable d=3,5 mm.

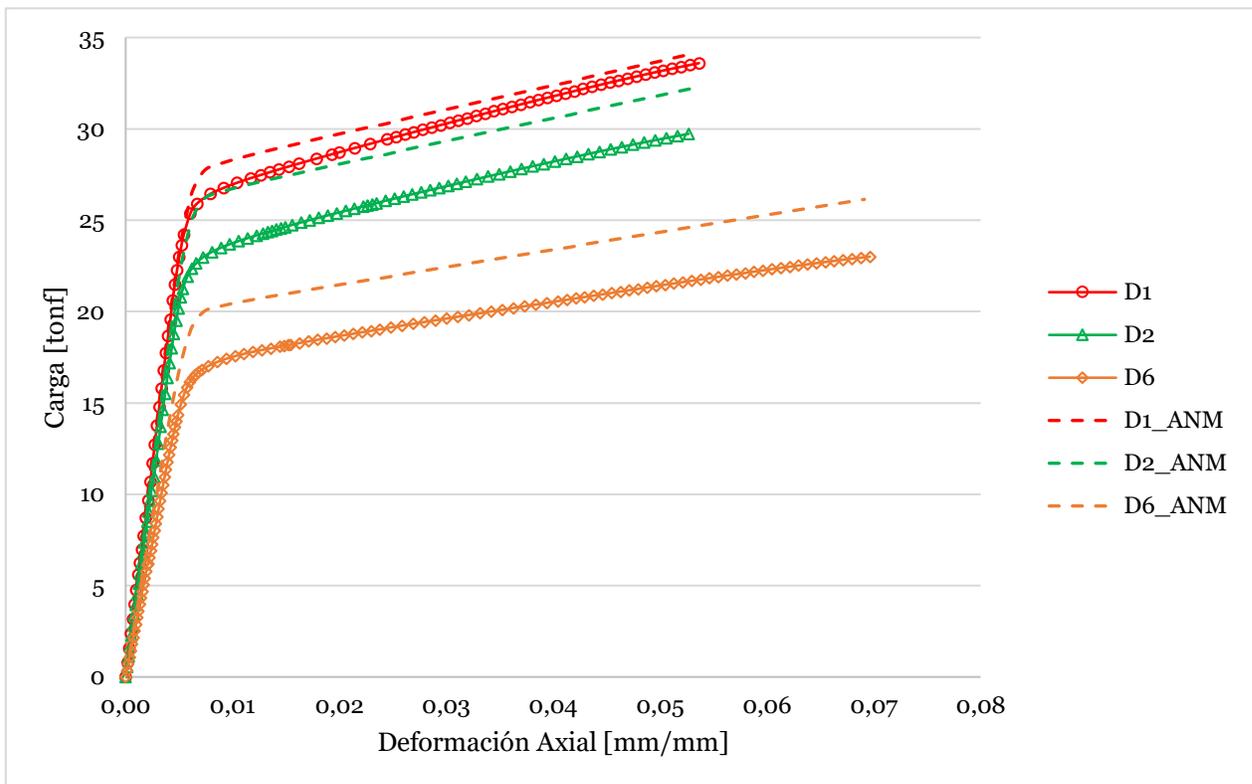


Figura 5.30: Curva de capacidad para FEM y ANM, cable $d=22,22$ mm.

Es posible apreciar que, en los tres casos dañados, al aproximar la curva de capacidad de carga a partir de la configuración sin daño y su área neta efectiva, los valores obtenidos para una misma deformación axial son siempre mayores y que, a medida que aumenta el daño y la asimetría de éste, la aproximación posee cada vez un mayor error y se aleja más de los valores obtenidos por FEM para cada modelo dañado.

A continuación, se presenta una comparación de la capacidad de deformación de los modelos FEM.

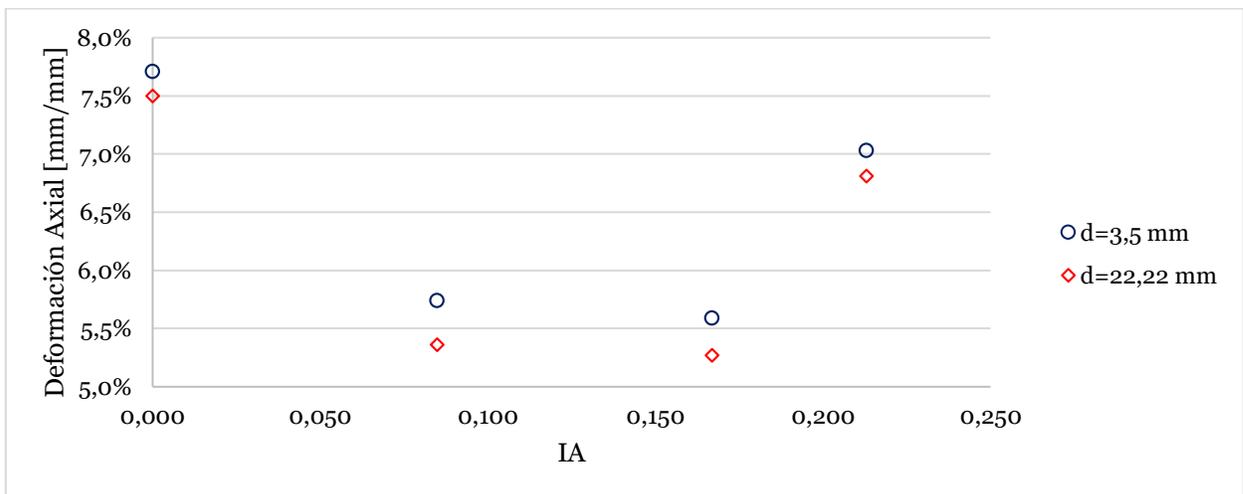


Figura 5.31: Capacidad de deformación axial última en función del índice de asimetría.

La Figura 5.31 muestra que, para todas las configuraciones de daño, la capacidad de deformación máxima del cable es menor cuando el diámetro es mayor. En promedio, la deformación axial última es un 4,8% más baja cuando el diámetro es 22,22 mm, al compararse con el de 3,5 mm.

La capacidad de deformación también se ve afectado por el daño y por el IA. Si bien existe una disminución proporcional a medida que los cables cortados y la asimetría del daño aumentan, cuando el daño es muy alto y su asimetría también alcanza grandes valores, el cable presenta un comportamiento más dúctil, alcanzando deformaciones últimas mayores en la configuración D6 que en D1 y D2, lo que a su vez implica una carga última mayor, en relación a su área neta

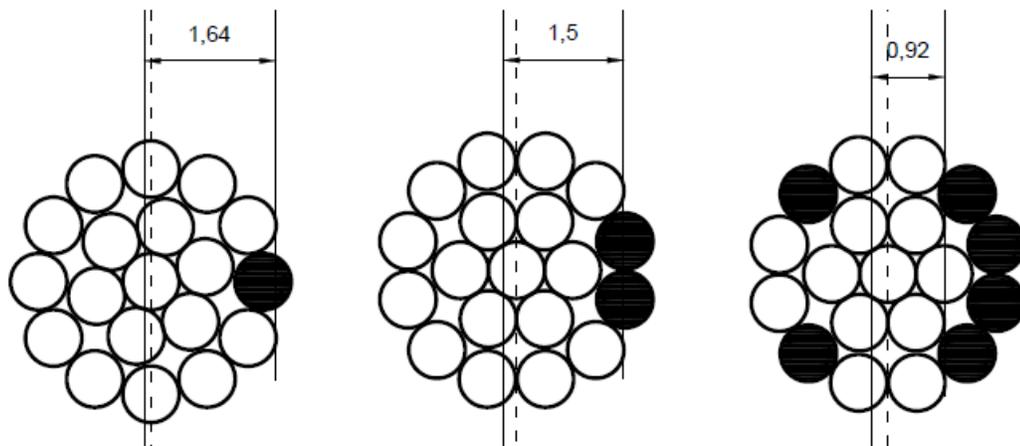


Figura 5.32: Brazo a punto de máxima tracción de la sección dañada, cable $d=3,5$ mm.

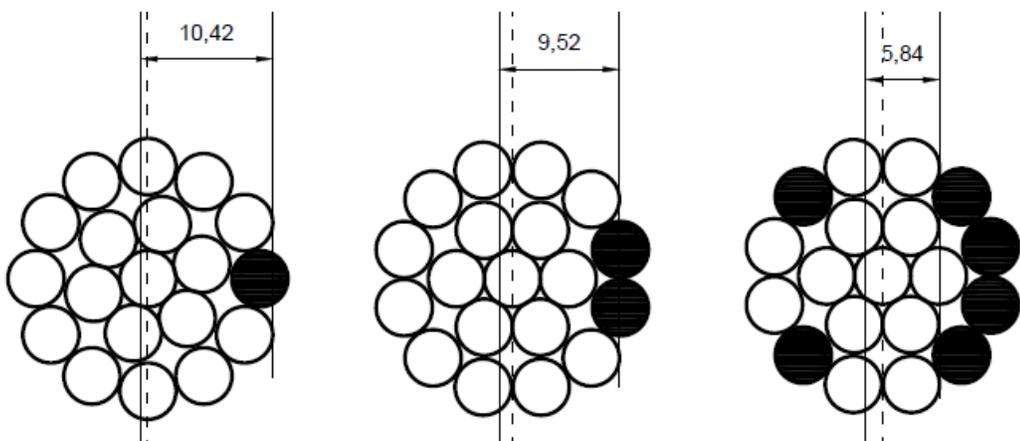


Figura 5.33: Brazo a punto de máxima tracción de la sección dañada, cable $d=22,22$ mm.

Lo anterior se puede explicar en función al brazo que se define entre el eje de simetría dañado y el punto de máxima tracción de la sección dañada (Figura 5.32 y Figura 5.33). Se puede apreciar que, cuando el daño es muy significativo, el brazo palanca toma mayor relevancia que el nivel de daño y el desplazamiento del eje neutro. Es importante notar que, para el caso con seis fibras dañadas, la distancia de brazo máxima real se presenta

para un alambre de la segunda capa. Sin embargo, se mide un brazo efectivo hasta el cable más lejano de la tercera puesto que es en esta capa que se presentan los efectos de flexión local (como se mostrará más adelante), generando una superposición de tracciones que afectan el comportamiento del espécimen en mayor medida.

5.4 RIGIDEZ ELÁSTICA Y PLÁSTICA

Se graficó la curva de carga-deformación axial para el tramo lineal elástico (Figura 5.34-Figura 5.41) de los modelos en EF en conjunto con una curva obtenido de un modelo analítico lineal elástico (Ghoreishi [16]), de manera de contrastar los valores de rigidez que arroja cada método. Las pendientes de estas curvas corresponden a la rigidez de los cables para el rango elástico de su respuesta.

Cable $d = 3,5$ mm:

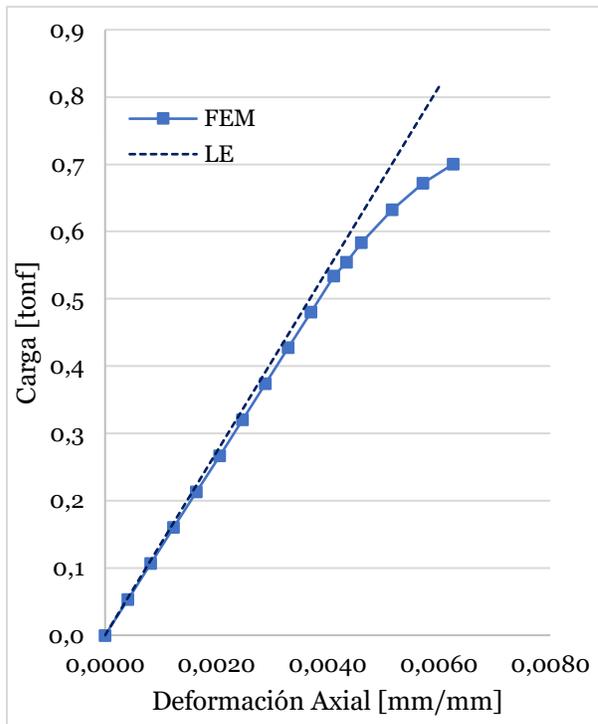


Figura 5.34: Rigidez axial elástica SD $d=3,5$ mm.

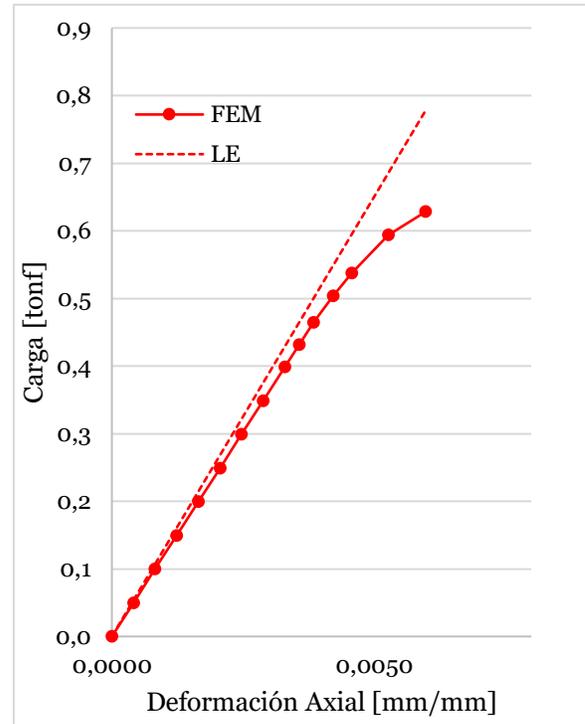


Figura 5.35: Rigidez axial elástica 1D $d=3,5$ mm.

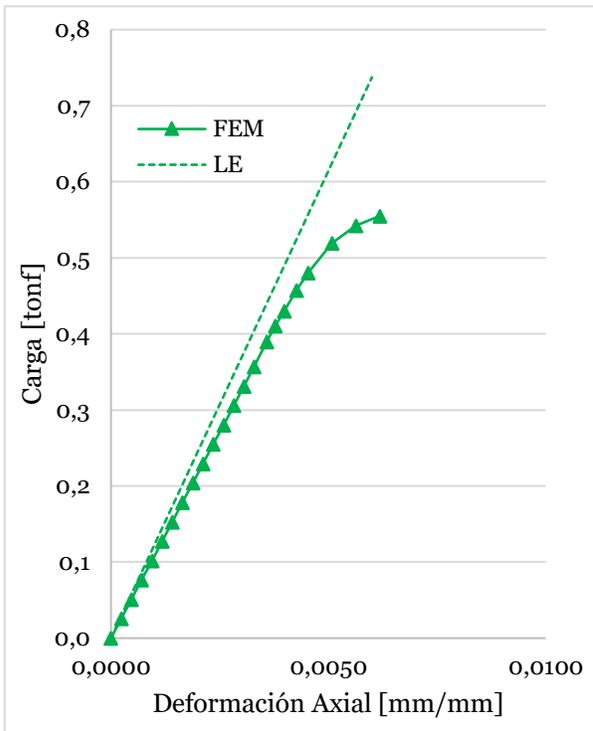


Figura 5.36: Rigidez axial elástica 2D $d=3,5$ mm.

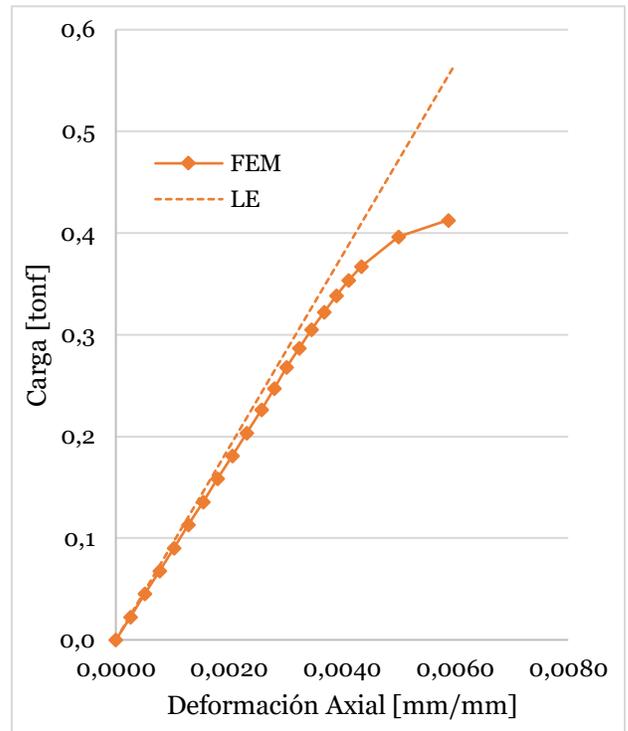


Figura 5.37: Rigidez axial elástica 6D $d=3,5$ mm.

Cable $d = 22,22$ mm:

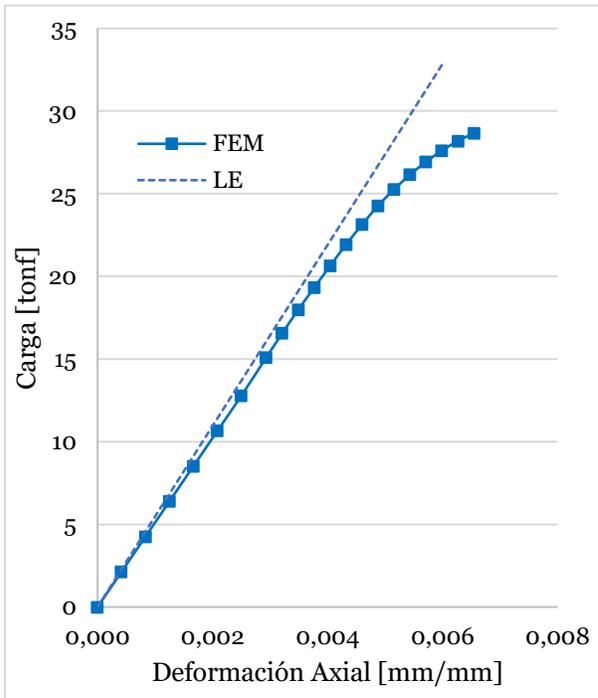


Figura 5.38: Rigidez axial elástica SD $d=22,22$ mm.

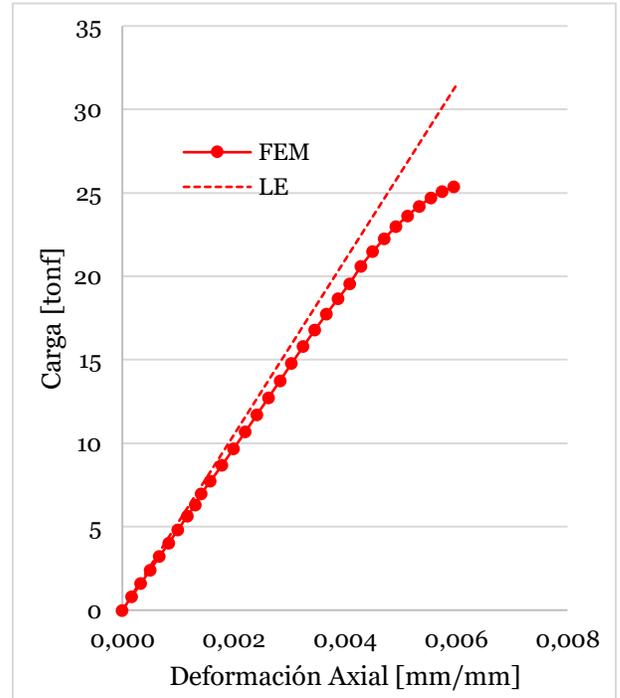


Figura 5.39: Rigidez axial elástica 1D $d=22,22$ mm.

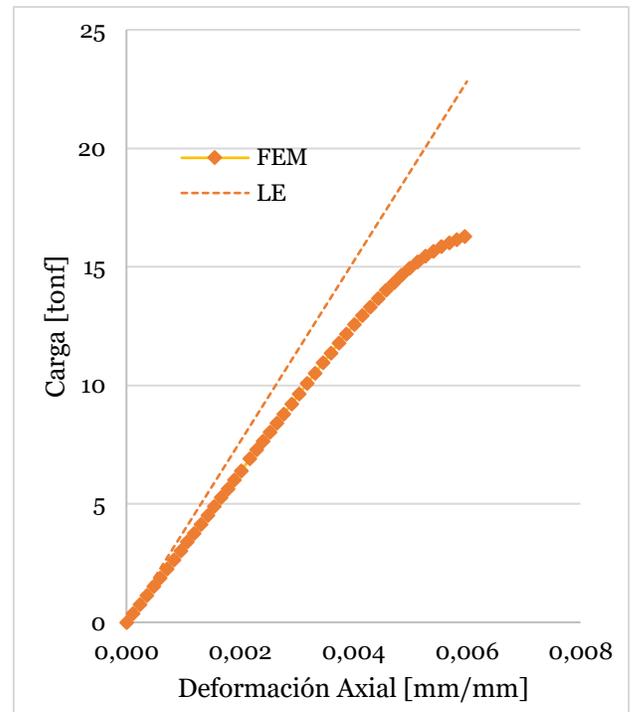
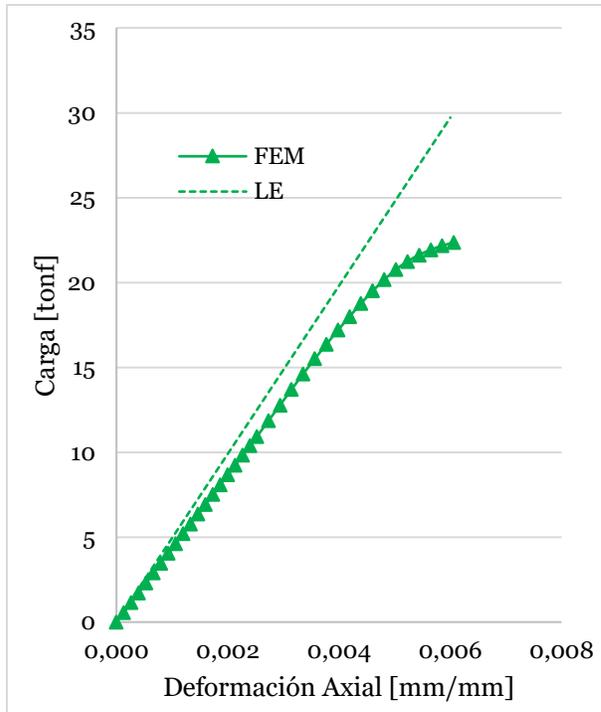


Figura 5.40: Rigidez axial elástica 2D $d=22,22$ mm. Figura 5.41: Rigidez axial elástica 6D $d=22,22$ mm.

Al calcular las pendientes de las curvas mostradas en las Figura 5.34-Figura 5.41 mediante una regresión lineal, se obtienen los valores de las Tabla 5-6 y Tabla 5-7.

Tabla 5-6: Rigidez axial elástica cable $d=3,5$ mm.

Configuración	SD	D1	D2	D6
E_{FEM}	129,78	120,88	108,35	87,94
E_{LE}	135,88	130,01	122,88	94,36
E_{FEM}/E_{LE}	0,955	0,930	0,882	0,932

Tabla 5-7: Rigidez axial elástica cable $d=22,22$ mm.

Configuración	SD	D1	D2	D6
E_{FEM}	5112,6	4824,8	4334,8	3155,2
E_{LE}	5476,6	5240,0	4952,6	3803,1
E_{FEM}/E_{LE}	0,934	0,921	0,875	0,830

Se observa que los modelos simplificados predicen, en promedio, con 92,5% y 89% de precisión para los diámetros 3,5 y 22,22 mm, respectivamente, la rigidez elástica que presentan los cables, siendo el caso con mayor cercanía al resultado por FEM los modelos sin daño. Mientras que, a medida que aumenta el nivel de daño y asimetría de éste, se marca una tendencia hacia la disminución de la correlación que existe entre los modelos analíticos y los resultados obtenidos por FEM.

Por otra parte, utilizando el método del área neta efectiva, se obtuvieron las rigideces en el rango elástico (E_E) y plástico (E_P) para los modelos dañados, a partir del caso sin daño FEM, utilizando el factor de área ($1 - \%Daño$), FEM_{AN} , para compararse con la rigidez obtenida directamente de los resultados por la modelación en EF para los cables con daño (FEM).

Tabla 5-8: Rigidez elástica y plástica para casos dañados por FEM y por ANM, cable $d=3,5$ mm.

Configuración		D1	D2	D6
E_E	FEM_{AN}	120,88	108,35	87,94
	FEM	122,95	116,12	88,80
	<i>error</i>	1,7%	7,2%	1,0%
E_P	FEM_{AN}	3,30	3,11	2,38
	FEM	3,65	3,37	2,18
	<i>error</i>	10,8%	8,1%	8,4%

Tabla 5-9: Rigidez elástica y plástica por FEM y por ANM, cable $d=22,22$ mm.

Configuración		D1	D2	D6
E_E	FEM_{AN}	4836	4568	3493
	FEM	4694	4172	2983
	<i>error</i>	2,9%	8,7%	14,6%
E_P	FEM_{AN}	131,1	123,8	94,7
	FEM	150,6	140,2	92,9
	<i>error</i>	14,8%	13,2%	1,9%

Las Tabla 5-8 y Tabla 5-9 muestran un error de un 6,2% y un 9,4%, para el diámetro menor y el mayor, respectivamente, al aproximar la rigidez de un cable dañado a partir de la configuración sin fibras quebradas de FEM. Además, en general, la aproximación muestra mayor exactitud para el cable de menor diámetro, presentando menores errores en casi todos los casos, si se compara con el cable de 22,22 mm de diámetro.

5.5 TENSIONES Y DEFORMACIONES

5.5.1 TENSIONES Y DEFORMACIONES TOTALES

Se presentan a continuación los diagramas que muestran gráficamente cómo se distribuyen tanto las tensiones como las deformaciones equivalentes totales en los modelos (para $d=3,5$ mm, Figura 5.42-Figura 5.45; para $d=22,22$ mm, Figura 5.46-Figura 5.49). Para esto se eligieron cuatro puntos de deformación axial de los cables; dos en el rango elástico ($\varepsilon = 0,2\%$ y $\varepsilon = 0,4\%$) y dos en el rango plástico ($\varepsilon = 1\%$ y $\varepsilon = 4\%$) de los cables. En todos estos cuatro valores de elongación ninguno de los modelos ha llegado a su falla.

Cable $d = 3,5 \text{ mm}$:

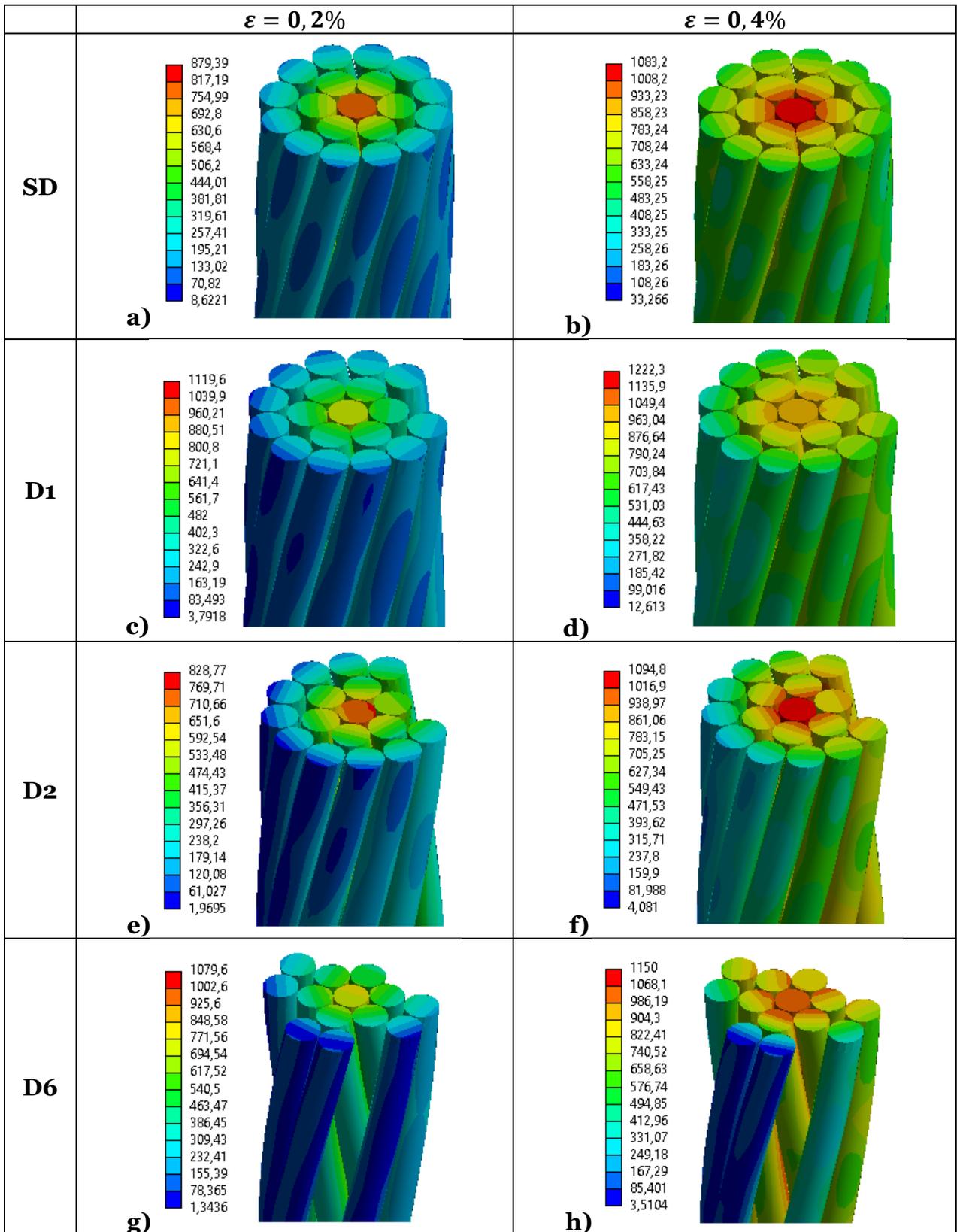


Figura 5.42: Tensiones Equivalentes (MPa) para deformaciones axiales de $\varepsilon=0,2\%$ y $\varepsilon=0,4\%$ (rango elástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=3,5 \text{ mm}$.

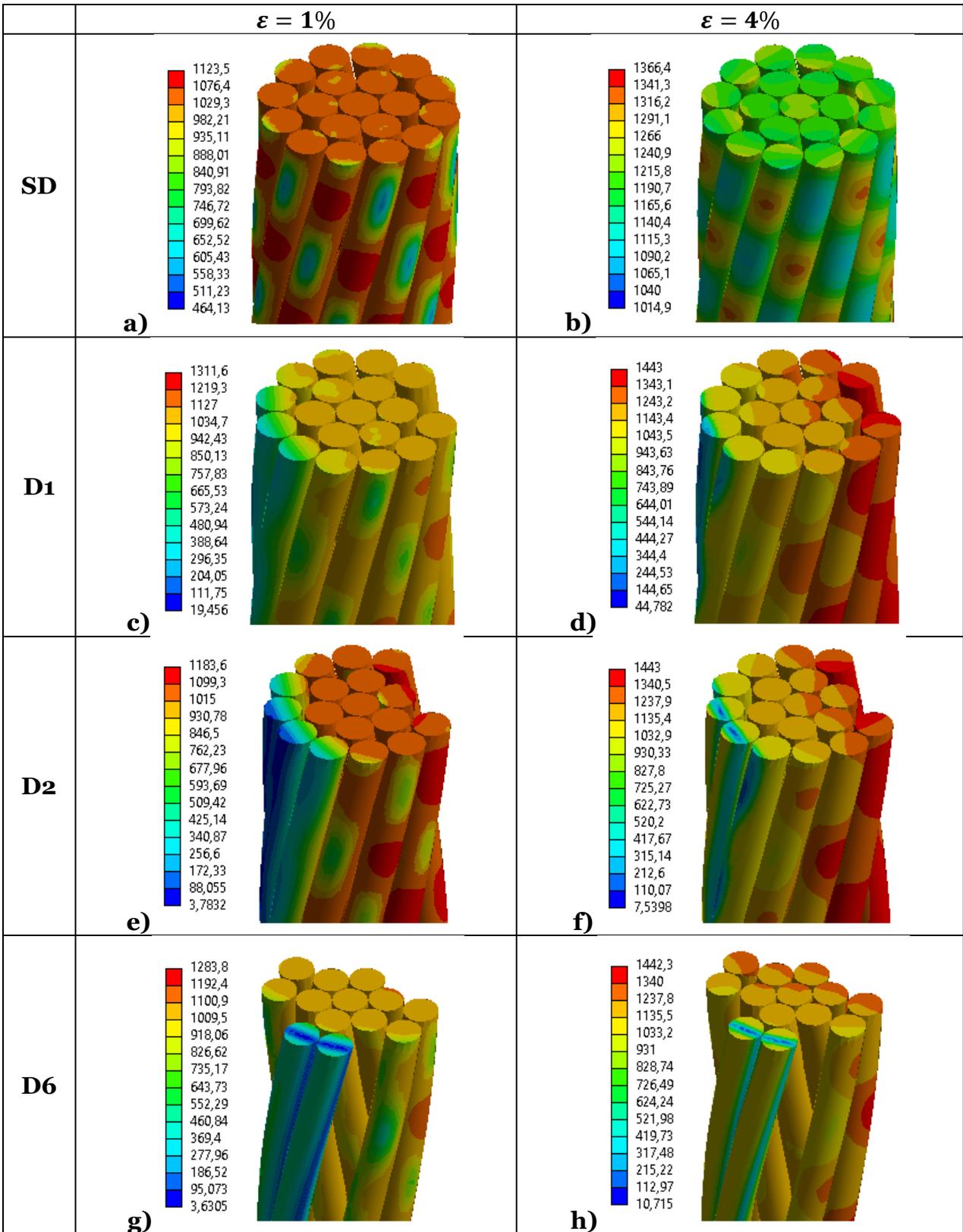


Figura 5.43: Tensiones Equivalentes (MPa) para deformaciones axiales de $\varepsilon=1\%$ y $\varepsilon=4\%$ (rango plástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=3,5$ mm.

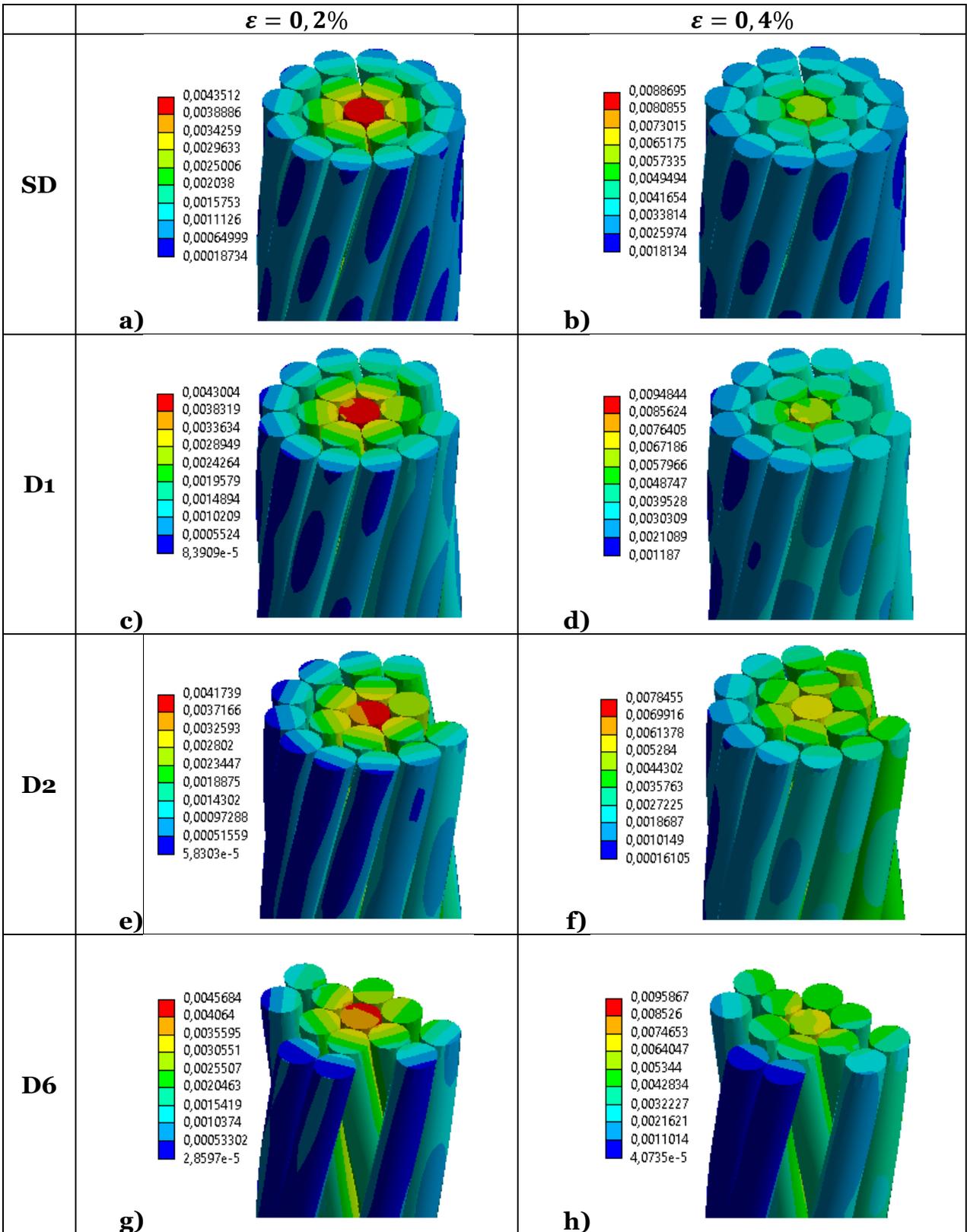


Figura 5.44: Deformaciones Totales Equivalentes (mm/mm) para deformaciones axiales de $\varepsilon=0,2\%$ y $\varepsilon=0,4\%$ (rango elástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=3,5$ mm.

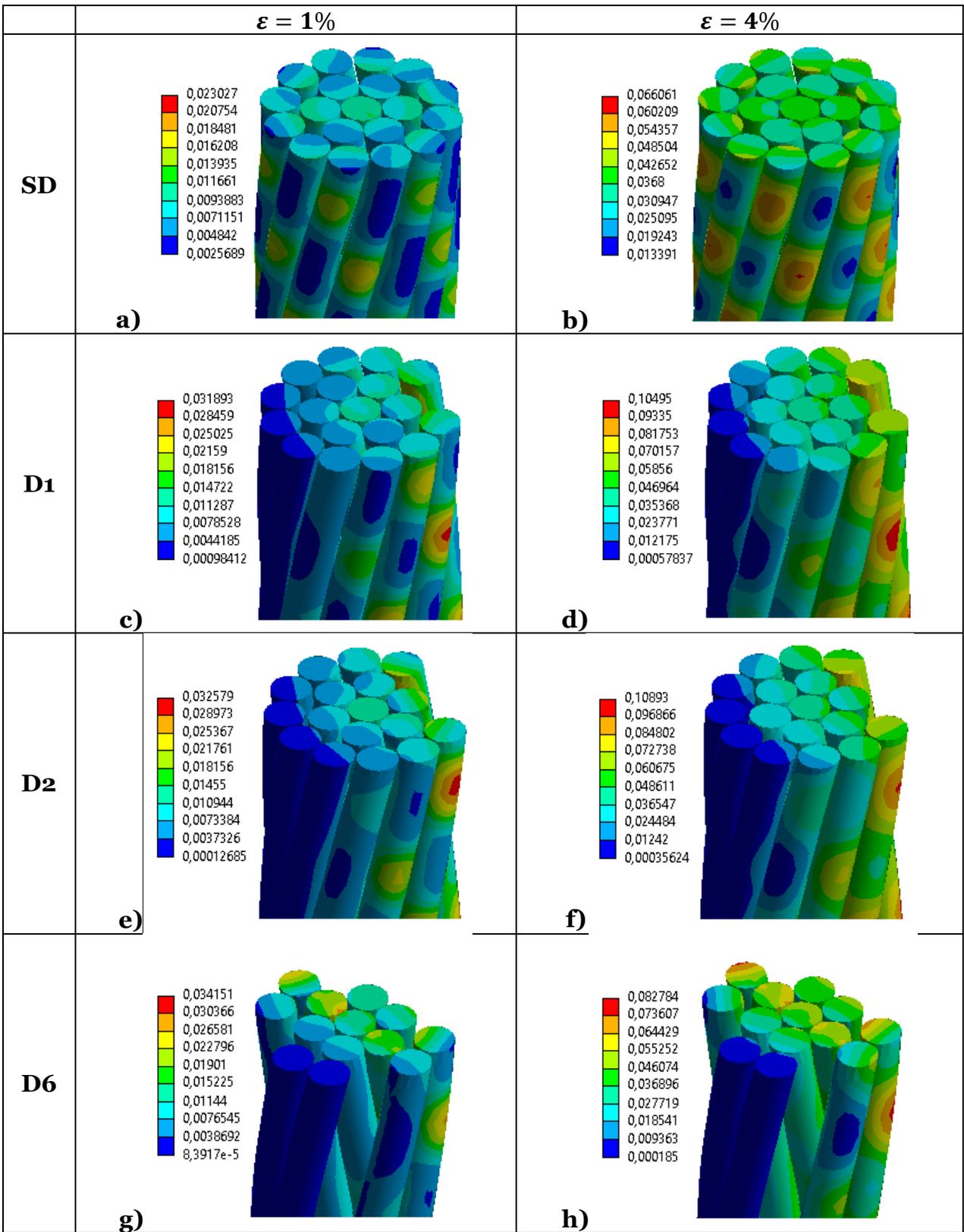


Figura 5.45: Deformaciones Totales Equivalentes (mm/mm) para deformaciones axiales de $\varepsilon=1\%$ y $\varepsilon=4\%$ (rango plástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=3,5$ mm.

Cable $d = 22,22 \text{ mm}$:

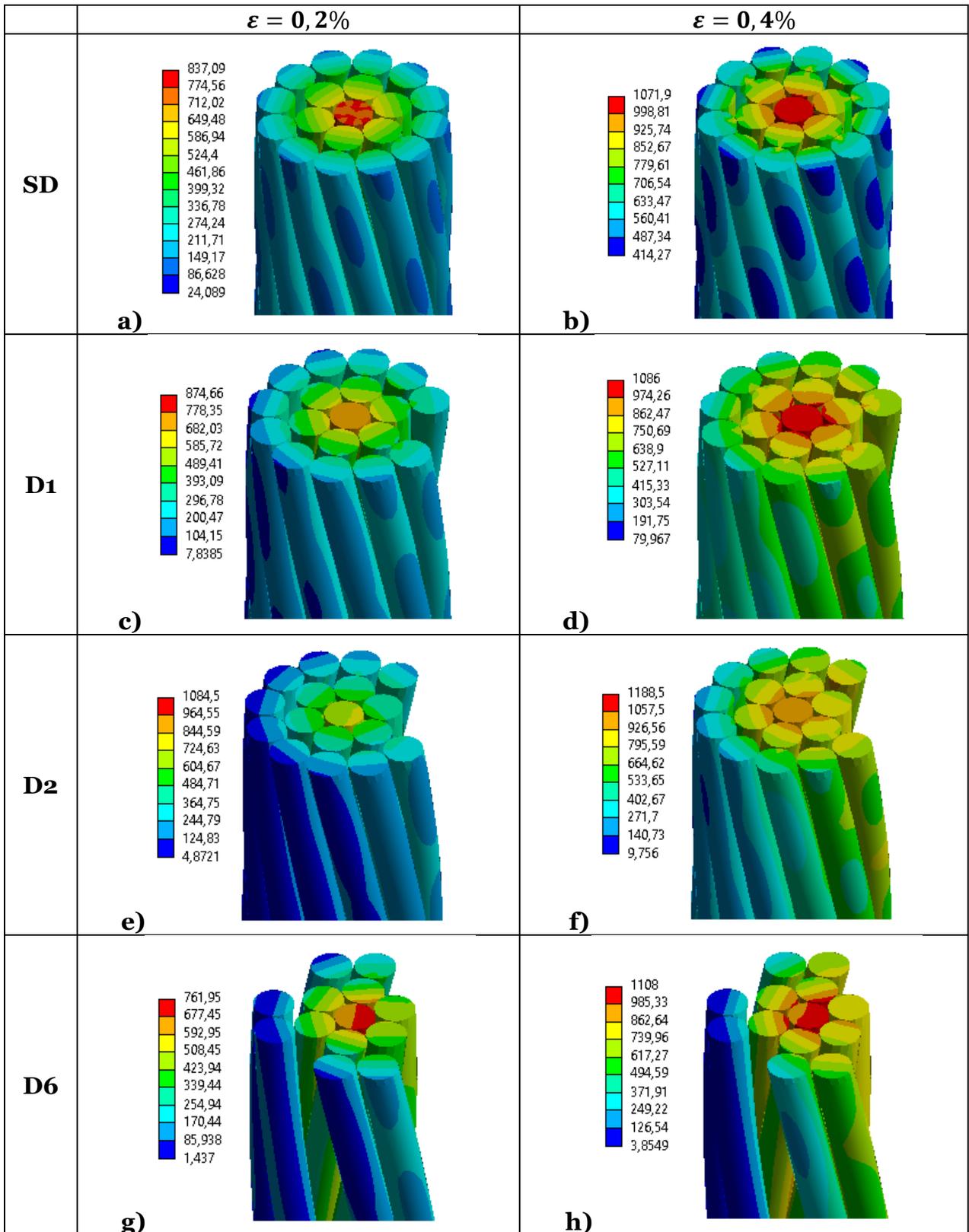


Figura 5.46: Tensiones Equivalentes (MPa) para deformaciones axiales de $\varepsilon=0,2\%$ y $\varepsilon=0,4\%$ (rango elástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=22,22 \text{ mm}$.

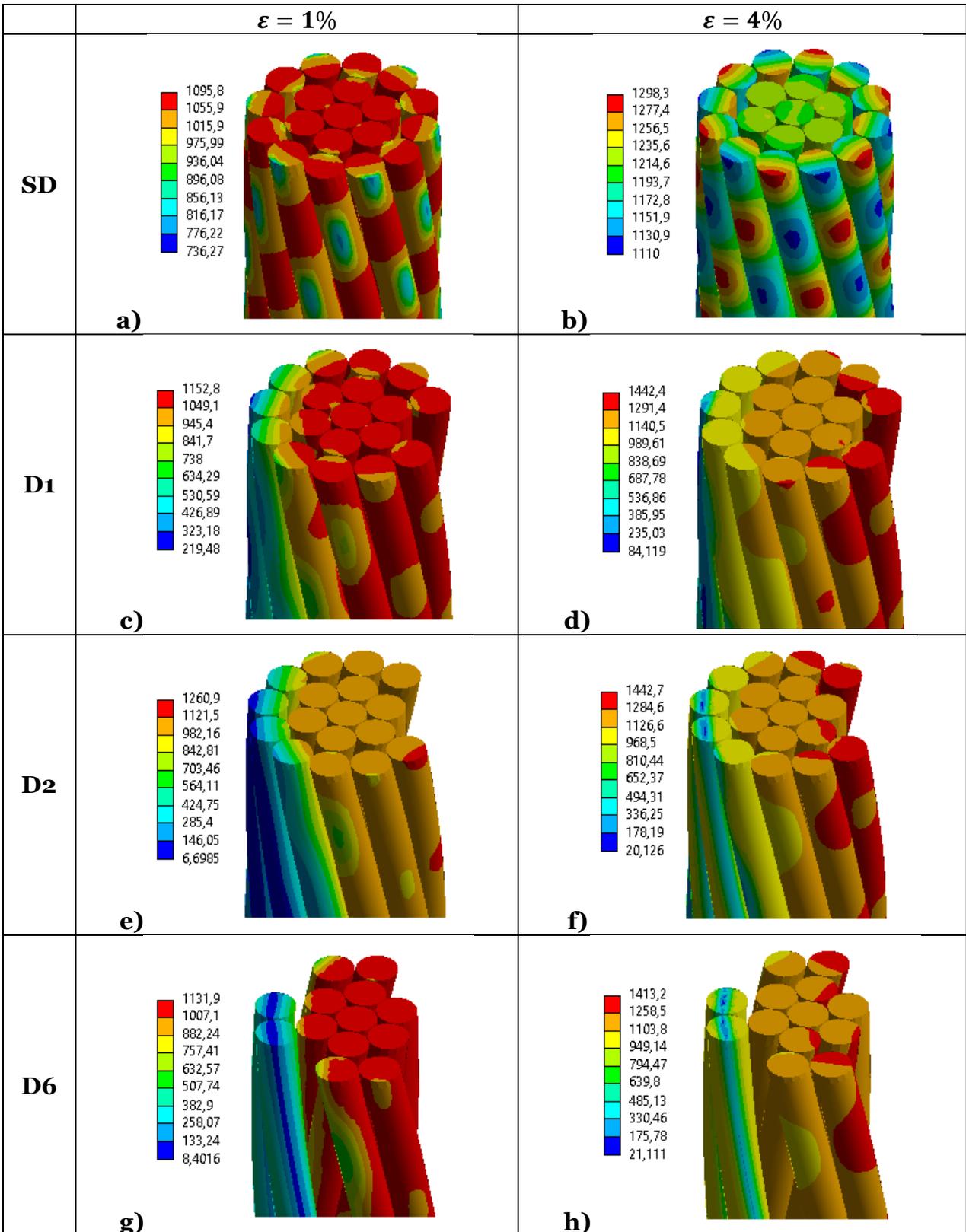


Figura 5.47: Tensiones Equivalentes (MPa) para deformaciones axiales de $\varepsilon=1\%$ y $\varepsilon=4\%$ (rango plástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=22,22$ mm.

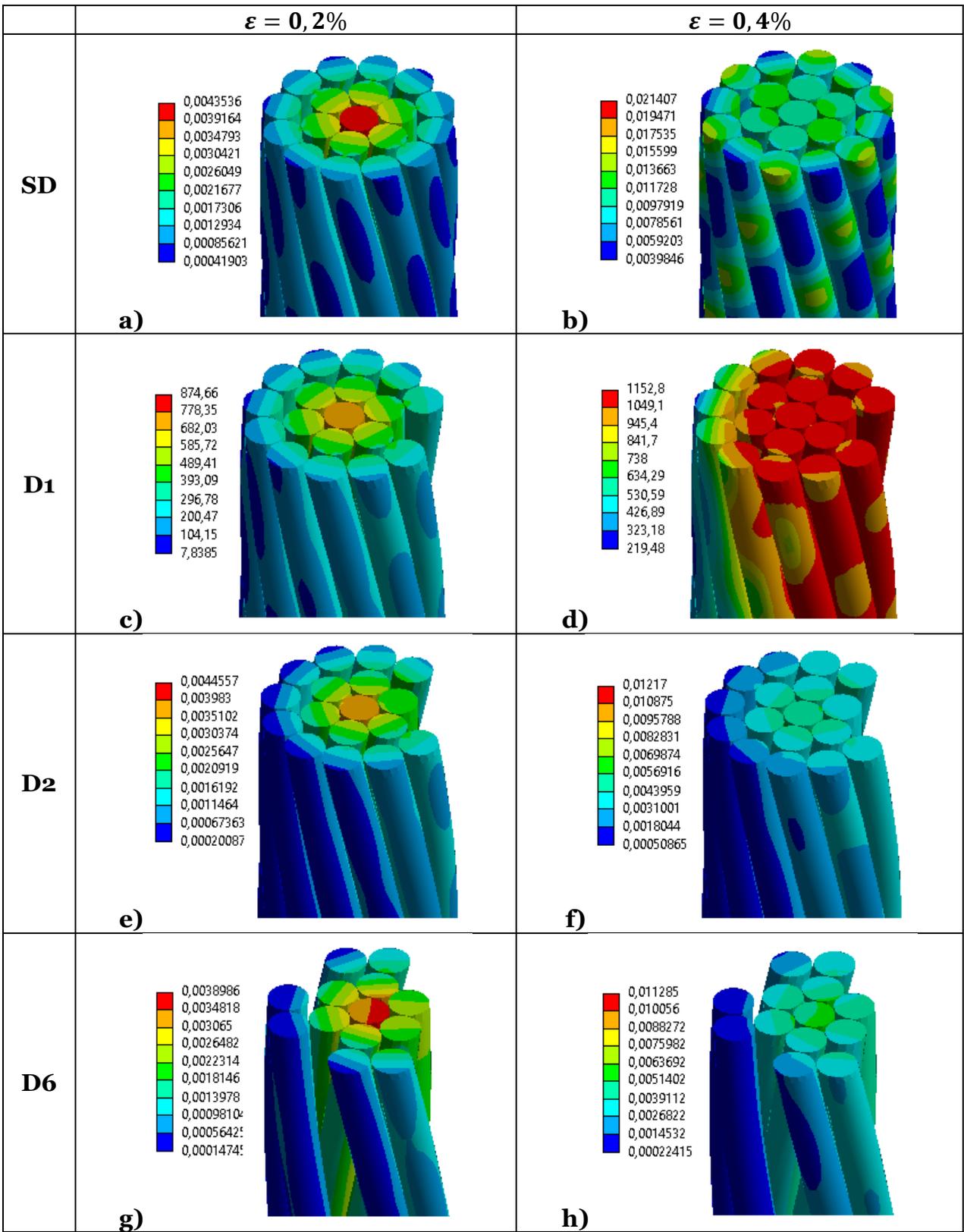


Figura 5.48: Deformaciones Totales Equivalentes (mm/mm) para deformaciones axiales de $\varepsilon=0,2\%$ y $\varepsilon=0,4\%$ (rango elástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=22,22$ mm.

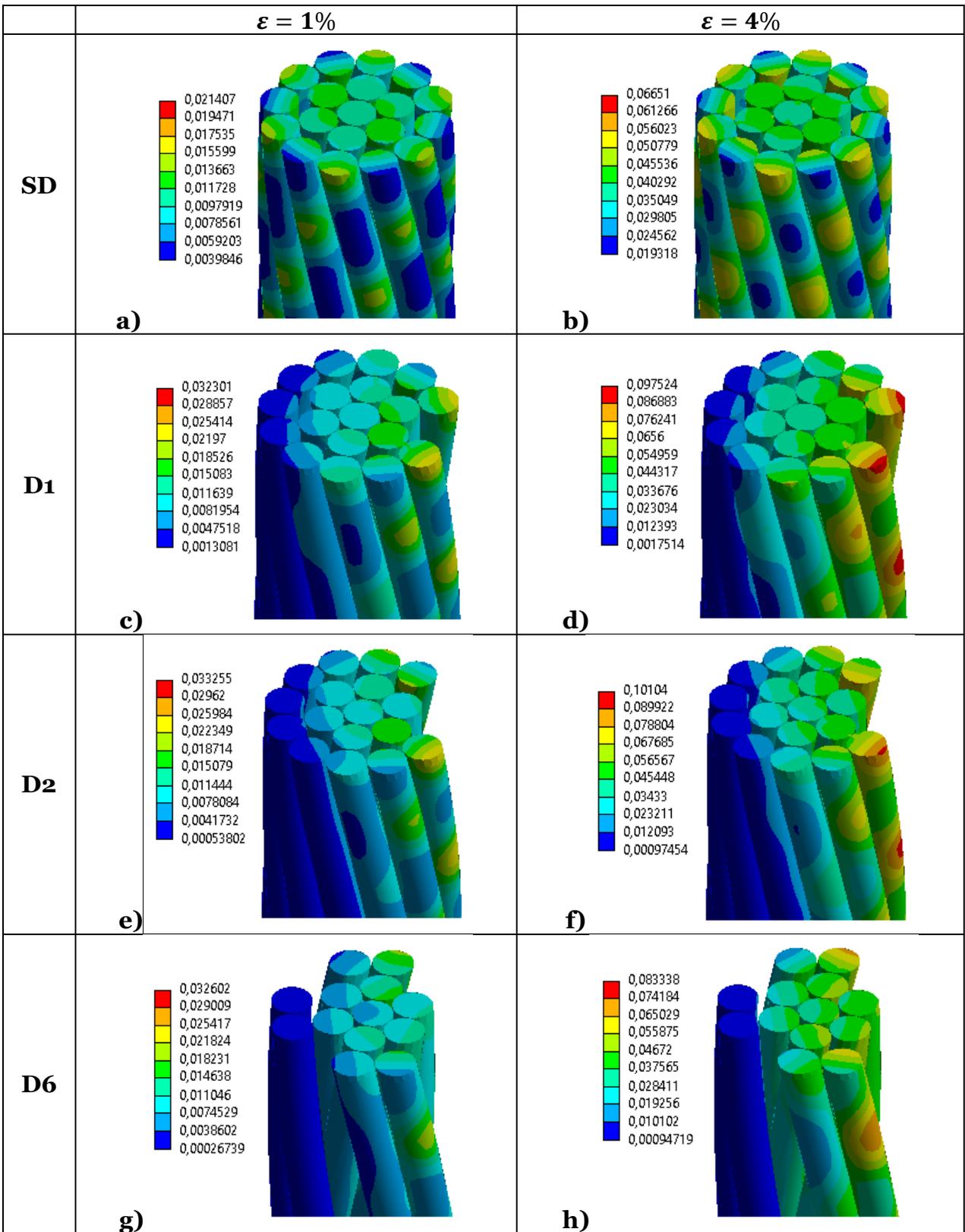


Figura 5.49: Deformaciones Totales Equivalentes (mm/mm) para deformaciones axiales de $\varepsilon=1\%$ y $\varepsilon=4\%$ (rango plástico del cable) en las cuatro configuraciones, $d=22,22$ mm.

Se observa que, para el caso sin daño, la simetría de tanto tensiones como deformaciones totales presenta un carácter radial, lo que se condice con la simetría de la rigidez de su sección. Se muestran variaciones de tensiones y deformaciones en algunos puntos de contacto producto de la presión entre fibras y también es posible notar un efecto de “viga apoyada” (efectos *trellis*) en la tercera capa producto de la flexión local que sienten estos alambres al tener los elementos de la segunda capa como apoyo.

Para las configuraciones dañadas se genera un gradiente de tensiones y de deformaciones transversal a toda la sección y perpendicular al eje de simetría de ésta. El efecto *trellis* se vuelve a hacer presente, siendo más acentuado mientras más cerca del daño están las fibras, mientras que, en los alambres opuestos a éste, dicho efecto es casi imperceptible. Esto se explica por la compresión que genera la flexión del cable en dicha zona, que contrarrestan el efecto de la tracción que produce la deformación axial en espécimen. De aquí que se desprende que, para que se produzca el efecto de “viga apoyada”, es necesaria una tensión en las fibras que las empuje radialmente hacia el centro del cable; cuando esta tensión desaparece, dicho efecto lo hace con ella.

Además, es posible apreciar que, para deformaciones pequeñas (0,2 y 0,4%) que todavía se encuentran en el rango elástico global del cable (Figura 5.44 y Figura 5.48), en las configuraciones dañadas, el máximo de las tensiones y deformaciones se encuentra todavía en el núcleo de la sección, a pesar de la asimetría del daño. Es decir, el impacto del corrimiento del centro de rigidez del cable producto de la pérdida de fibras es gradual y no instantáneo, lo que se condice con lo que se observa en la deformada radial de los modelos, donde, inicialmente, la desviación fuera del eje axial es muy leve y paulatina.

5.5.2 INICIO DE PLASTIFICACIÓN POR CAPA

Mediante inspección de una sección representativa de los cables, es posible determinar en qué punto de su deformación axial comienzan a desarrollarse deformaciones plásticas en cada una de sus fibras, según la capa en la que se encuentran. Se determinó así la elongación para la que se aprecia plastificación en el núcleo (f_1), en una fibra de la segunda capa (f_2) y en una de la tercera (f_3), vecina al daño, para las configuraciones sin y con daño (Figura 5.50-Figura 5.57). Esta inspección podrá ser de utilidad a la hora de analizar la rigidez de un cable, cuando se compara con modelos simplificados que no incorporan efectos de contacto.

Cable $d = 3,5$ mm:

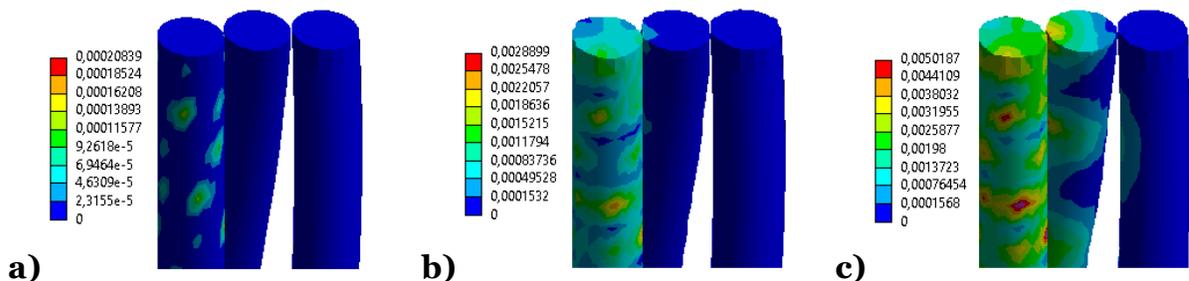


Figura 5.50: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,31\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,4\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,59\%$, cable SD $d=3,5$ mm.

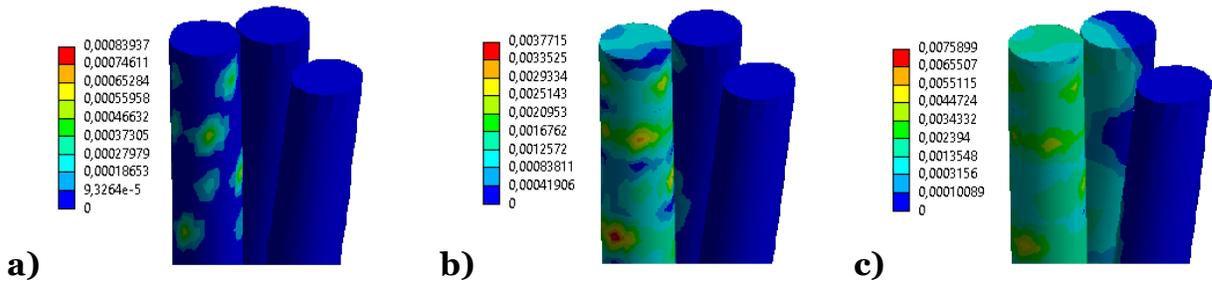


Figura 5.51: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,33\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,46\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,53\%$, cable D1 $d=3,5$ mm.

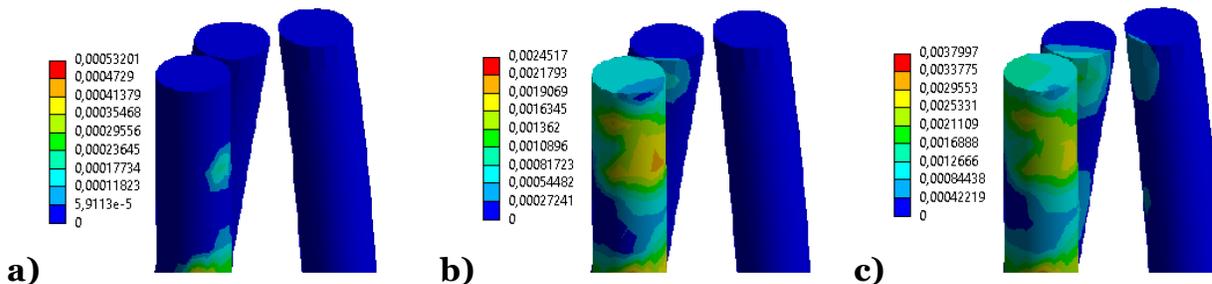


Figura 5.52: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,32\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,43\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,48\%$, cable D2 $d=3,5$ mm.

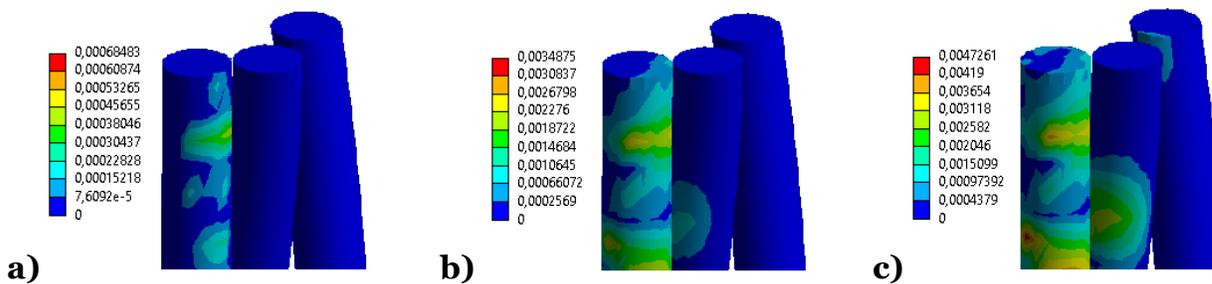


Figura 5.53: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,43\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,52\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,59\%$, cable D6 $d=3,5$ mm.

Cable $d = 22,22$ mm:

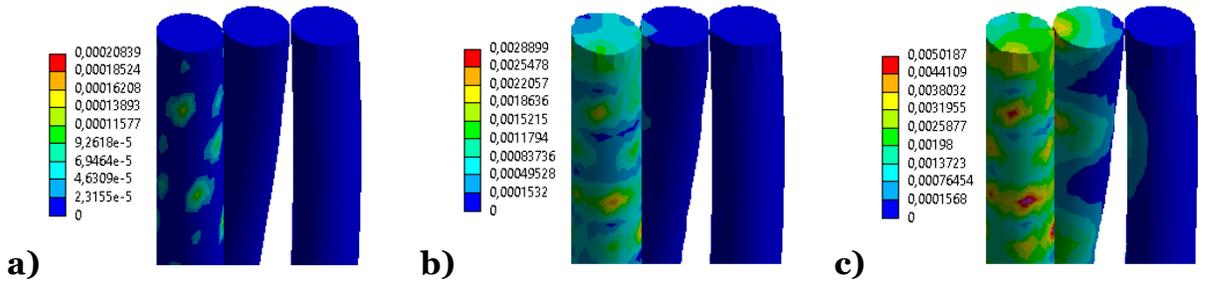


Figura 5.54: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,31\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,4\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,59\%$, cable SD $d=22,22$ mm.

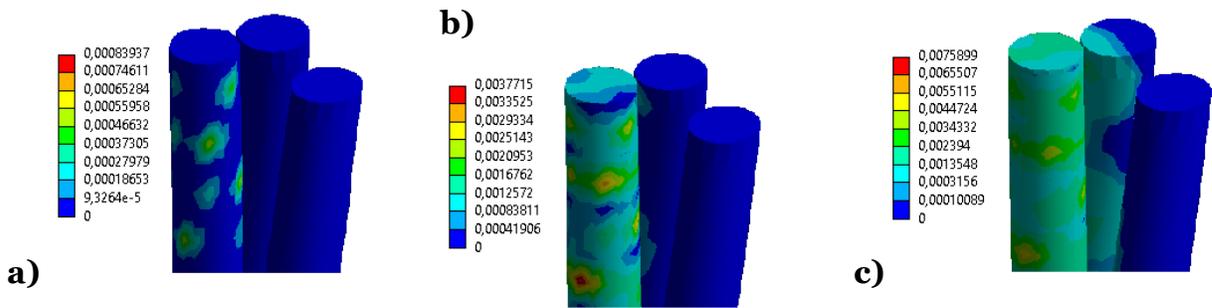


Figura 5.55: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,33\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,46\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,53\%$, cable D1 $d=22,22$ mm.

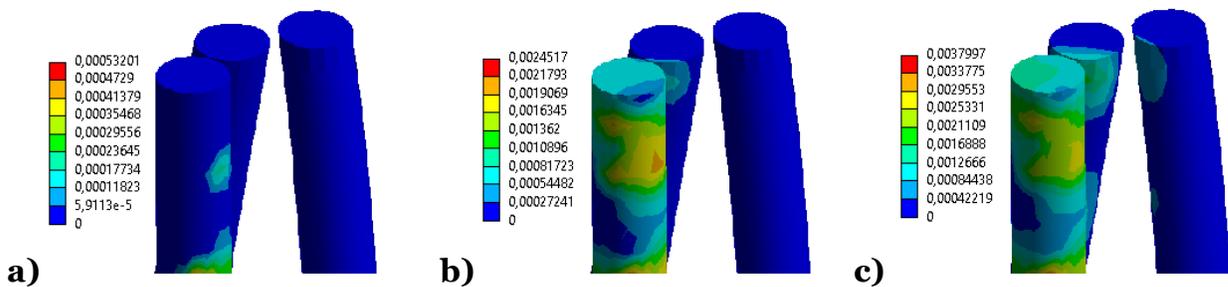


Figura 5.56: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,32\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,43\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,48\%$, cable D2 $d=22,22$ mm.

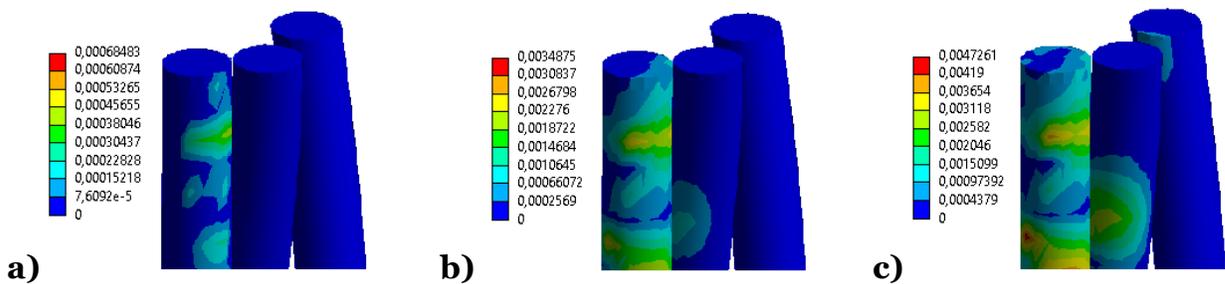


Figura 5.57: Deformaciones plásticas iniciales para (a) f1 a $\epsilon=0,43\%$, (b) f2 a $\epsilon=0,52\%$ y (c) f3 $\epsilon=0,59\%$, cable D6 $d=22,22$ mm.

Tabla 5-10: Deformación axial del cable al punto de aparición de deformaciones plásticas equivalentes en fibras de cada capa.

Fibra	Deformación Axial [%] Para Plastificación					
	f1		f2		f3	
	3, 5	22, 22	3, 5	22, 22	3, 5	22, 22
SD	0,31%	0,35%	0,40%	0,43%	0,59%	0,59%
D1	0,33%	0,35%	0,46%	0,43%	0,53%	0,51%
D2	0,32%	0,34%	0,43%	0,44%	0,48%	0,48%
D6	0,43%	0,35%	0,52%	0,44%	0,59%	0,53%

Existe una deformación axial asociada a cada fibra, según su capa, a la cual los alambres deberían plastificarse. Ésta se define de acuerdo a la ley constitutiva, según la cual es necesaria una elongación $\varepsilon_p = 0,53\%$ para lograr plastificación. La deformación axial del cable (ε_c) se puede relacionar con la deformación longitudinal de cada fibra a través de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fi} = \frac{\varepsilon_c}{\cos(\alpha_i)^2} \quad (5.5)$$

donde ε_{fi} es la deformación axial del cable para la cual la fibra fi ha alcanzado una deformación de 0,53% y α_i es su ángulo de hélice. El ángulo de hélice del núcleo es cero.

Así se obtiene, de acuerdo a los valores de las Tabla 3-1 y Tabla 3-2, las siguientes deformaciones para núcleo (ε_{f1}), segunda capa (ε_{f2}) y tercera capa (ε_{f3}):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{f1} &= 0,530\% \\ \varepsilon_{f2} &= 0,543\% \\ \varepsilon_{f3} &= 0,553\% \end{aligned}$$

La Tabla 5-10 resume los valores de deformación del cable para los cuales cada capa desarrolla deformaciones plásticas. Se aprecia que el inicio de la plastificación se da en el núcleo de todos los cables, para luego propagarse radialmente hacia las fibras exteriores. Se observa que en todos los modelos las fibras centrales y de segunda capa se plastifican antes de que el cable llegue al ε_{fi} definido, lo que se podría atribuir a los efectos de contacto.

5.5.3 PRESIONES DE CONTACTO

Debido al carácter de la distribución de tensiones y deformaciones en los cables, vale la pena cuantificar las presiones de contacto que se generan en las interacciones entre las fibras que los componen. En la Tabla 5-11 se muestra la presión máxima de contacto para cada configuración.

Tabla 5-11: Presiones de contacto máximas entre fibras para casos de estudio.

Diámetro [mm]	Presión [Mpa]				
	Configuración				Promedio
	SD	D1	D2	D6	
3,5	917	914	924	894	912
22,22	1107	1526	1544	1443	1405

Se observa en la Tabla 5-11 que las presiones máximas desarrolladas en los modelos son siempre mayores en los cables con diámetro mayor, siendo éstas, en promedio, un 54% más grandes. Además, es posible notar que, para ambos diámetros, los casos que poseen mayor capacidad de elongación (SD y D6) desarrollan menores presiones que los

casos que presentan una ductilidad más baja (D1 y D2), siendo la condición D2 la que, para ambos diámetros, desarrolla las máximas presiones de contacto y la ductilidad más baja.

5.5.4 GRADIENTES DE TENSIONES Y DEFORMACIONES ÚLTIMOS

Para la elongación axial última de cada cable se obtuvieron las deformaciones y tensiones equivalentes (Von Mises) (ε_{eq} y σ_{eq}) y axiales globales (ε_z y σ_z) (Figura 5.58-Figura 5.69), y, con esta información, se derivó el gradiente de tensiones y deformaciones que presenta la sección transversal de cada uno de los cables, con la diferencia que existe entre el valor promedio de las fibras más (f_{max}) y menos (f_{min}) traccionadas o elongadas.

Las tensiones equivalentes se calculan según la ecuación de Von Mises (Ec. 5.3). Ésta se define en función de las tensiones principales (σ_1 , σ_2 y σ_3). Se usan generalmente en trabajos de diseño puesto que permiten que cualquier estado de tensiones arbitrario en tres dimensiones ser representado por un único valor positivo de esfuerzo. La tensión equivalente es parte de la teoría de falla por esfuerzo máximo equivalente usada para predecir la fluencia en un material dúctil.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (5.6)$$

Las deformaciones equivalentes (ε_e) son calculadas análogamente con la fórmula de Von Mises (Ecuación 5.4), incorporando el factor de Poisson (ν).

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2}} \quad (5.7)$$

Se definen los gradientes medidos como:

$$\Delta X = \frac{X_{fmax} - X_{fmin}}{X_{fmax}} \quad (5.8)$$

Donde $X = \{\varepsilon_{eq}, \sigma_{eq}, \varepsilon_z, \sigma_z\}$.

Es necesario hacer notar que los cortes mostrados a continuación no muestran el plano de falla que se consideró según el criterio utilizado para el análisis. Lo anterior sucede porque dicho plano no necesariamente es ortogonal al eje axial del cable, como sí lo son los cortes expuestos.

5.5.4.1 Tensiones

Cable $d = 3,5$ mm:

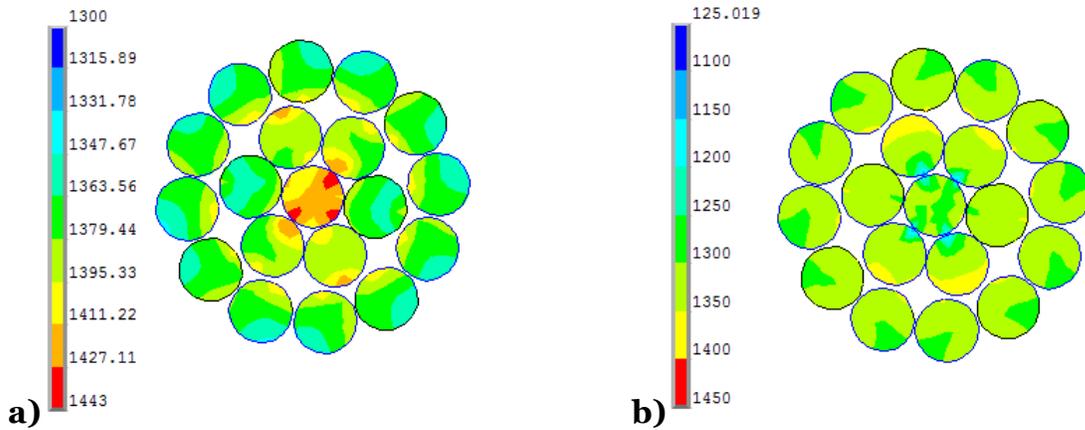


Figura 5.58: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable SD $d=3,5$ mm.

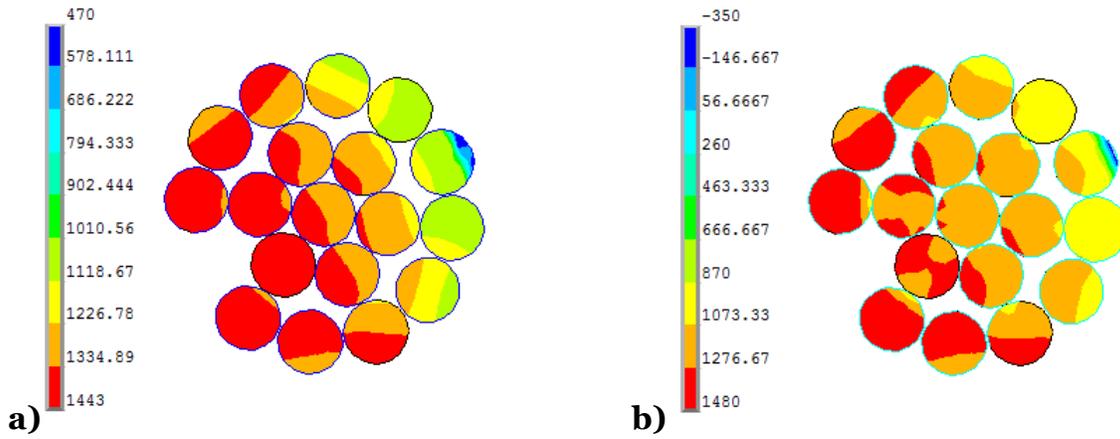


Figura 5.59: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable D1 $d=3,5$ mm.

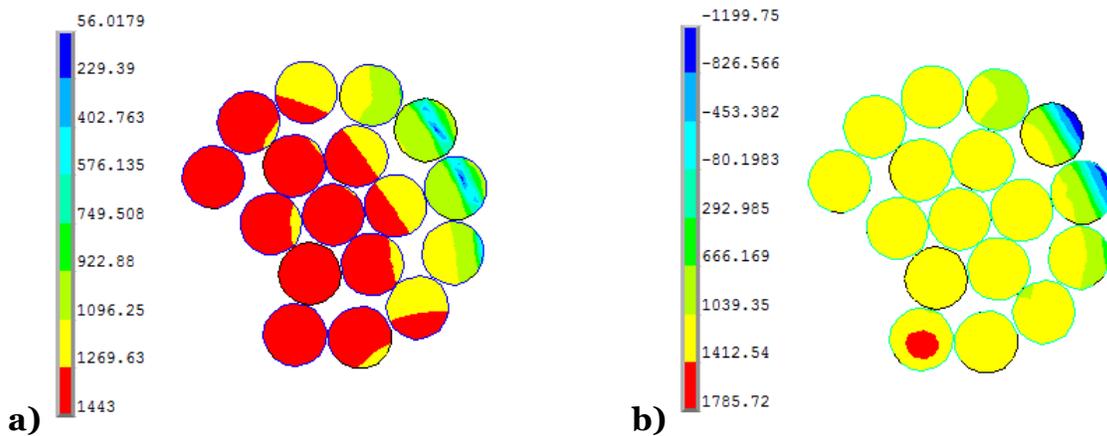


Figura 5.60: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable D2 $d=3,5$ mm.

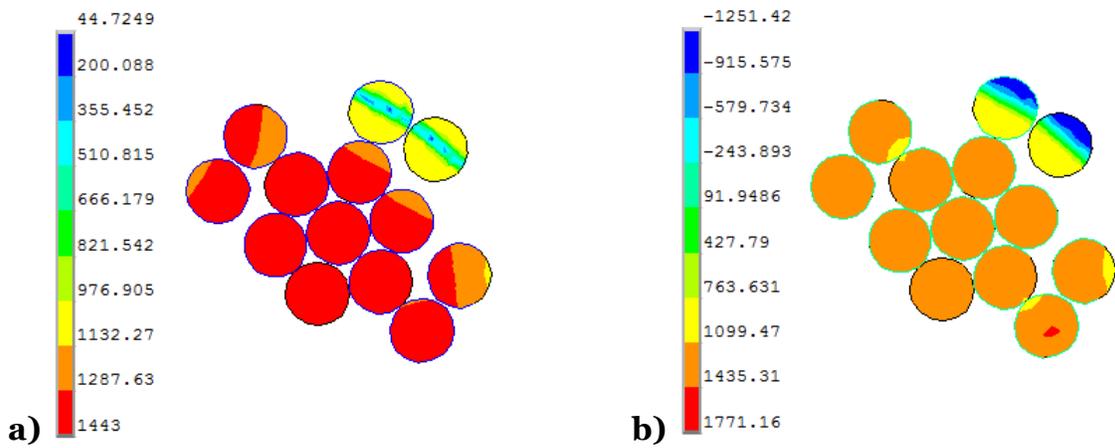


Figura 5.61: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable D6 $d=3,5$ mm.

Cable $d = 22,22$ mm:

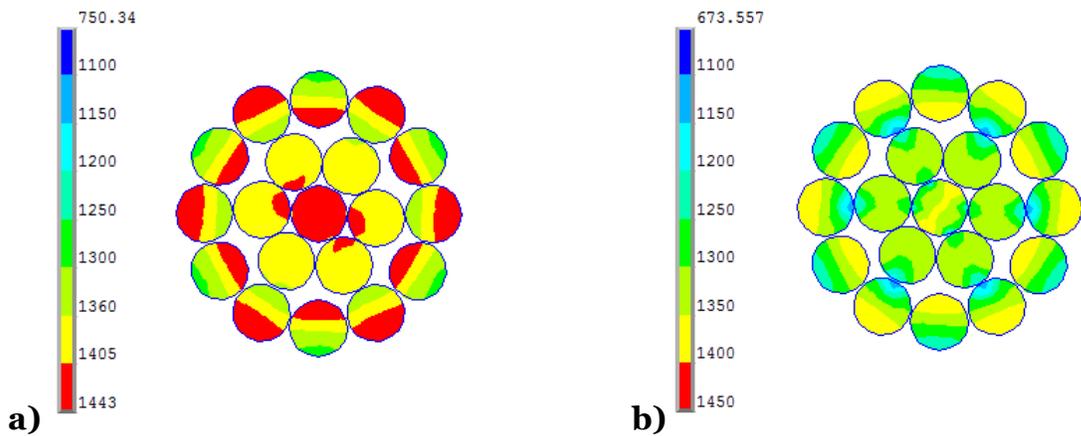


Figura 5.62: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable SD $d=22,22$ mm.

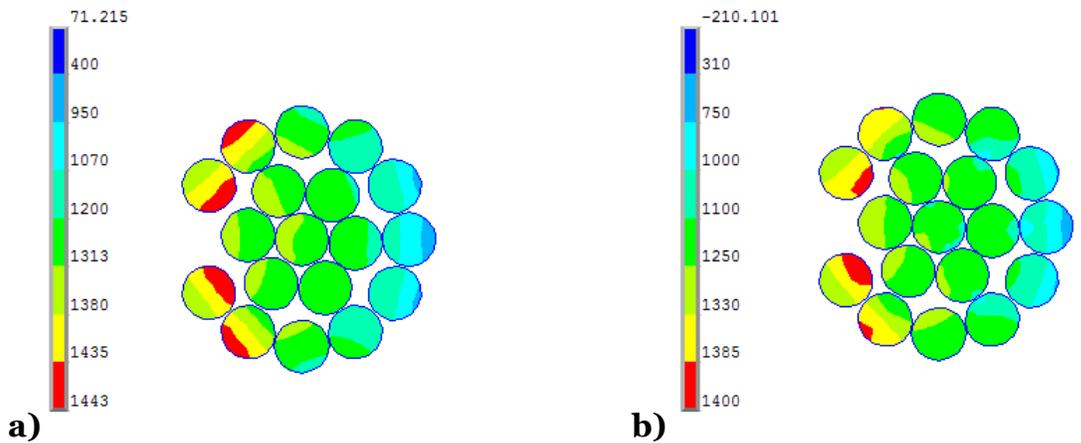


Figura 5.63: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable D1 $d=22,22$ mm.

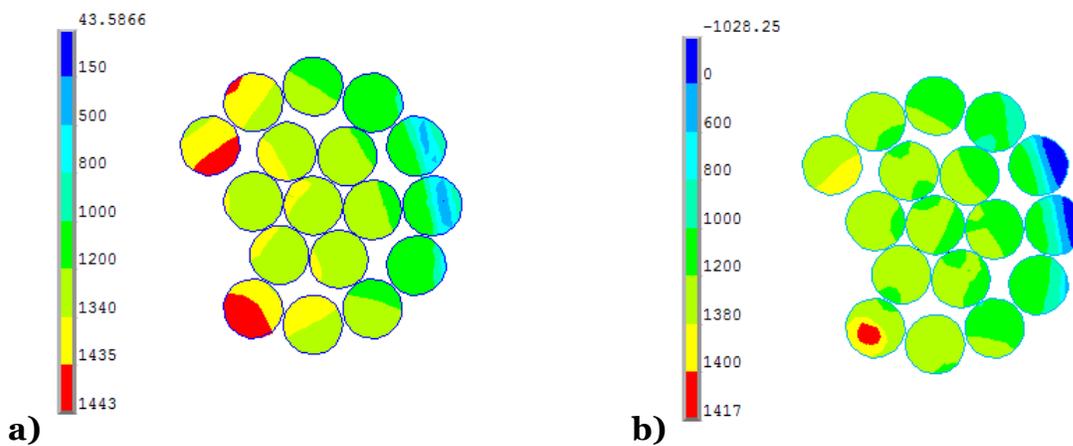


Figura 5.64: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable D2 $d=22,22$ mm.

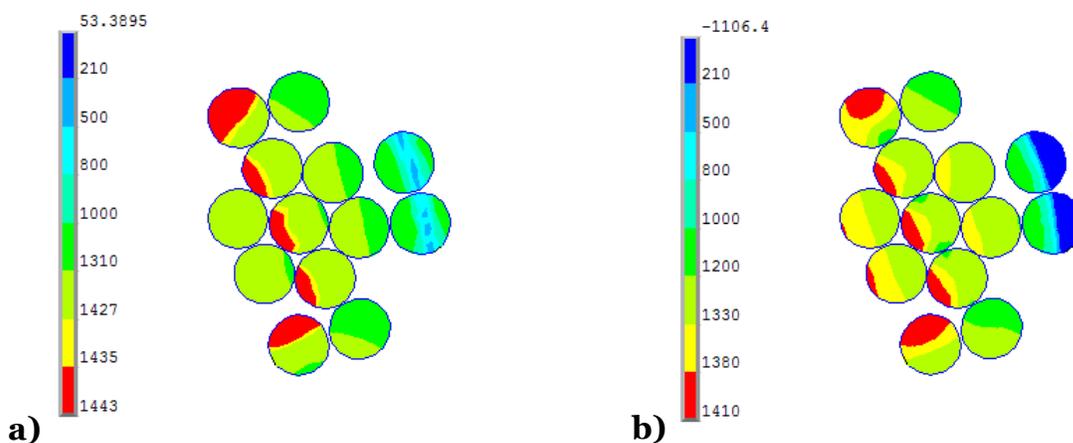


Figura 5.65: Gradientes de esfuerzos últimos (a) equivalentes y (b) axiales, cable D6 $d=22,22$ mm.

Tabla 5-12: Gradiente de tensiones últimas cable $d=3,5$ mm.

Configuración	Tensiones Equivalentes [MPa]			Tensiones Axiales [MPa]		
	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente
SD	1418	1371	3,3%	1320	1285	2,7%
D1	1386	1061	23,4%	1358	1012	25,5%
D2	1407	887	37,0%	1333	769	42,3%
D6	1335	974	27,0%	1368	769	43,8%

Tabla 5-13: Gradiente de tensiones últimas cable $d=22,22$ mm.

Configuración	Tensiones Equivalentes [MPa]			Tensiones Axiales [MPa]		
	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente
SD	1430	1385	3,1%	1350	1310	3,0%
D1	1401	965	31,1%	1354	894	34,0%
D2	1420	812	42,8%	1358	730	46,2%
D6	1415	875	38,2%	1350	560	58,5%

Se observa que los gradientes obtenidos para las tensiones axiales (en el sentido longitudinal del cable) son mucho mayores que los gradientes de tensiones equivalentes. Esto se explica por el hecho de que las tensiones equivalentes no se definen en función de una dirección, sino que es un escalar que incorpora todas las tensiones principales.

Es posible también apreciar que los gradientes de tensiones son mayores para los cables con mayor diámetro.

5.5.4.2 Deformaciones

Cable $d = 3,5$ mm:

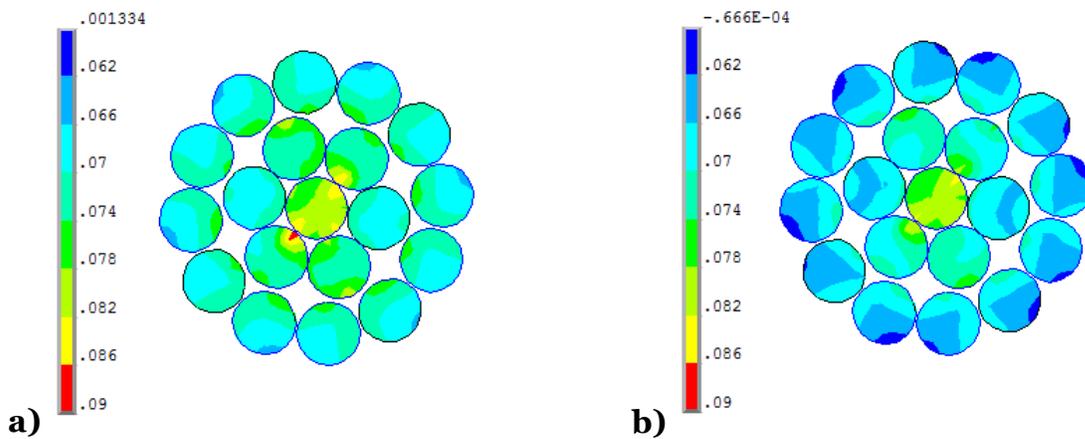


Figura 5.66: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable SD $d=3,5$ mm.

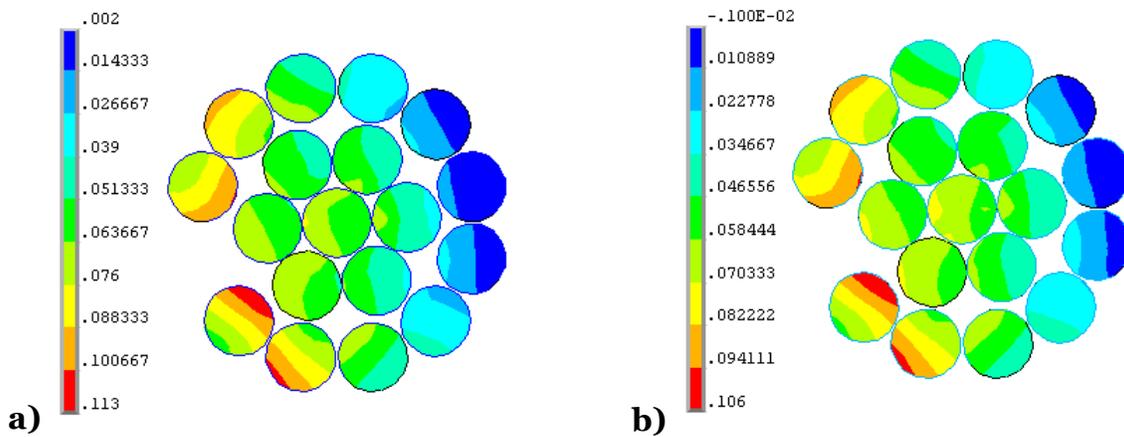


Figura 5.67: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable D1 $d=3,5$ mm.

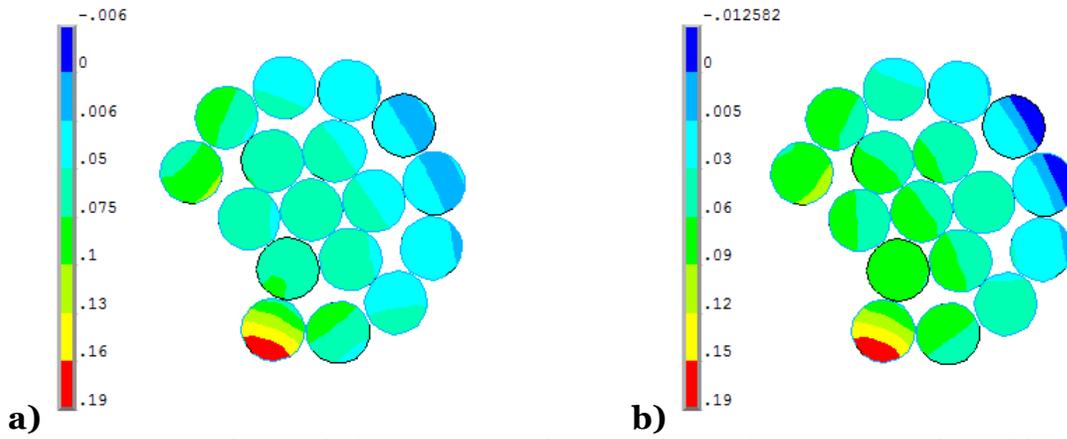


Figura 5.68: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable D2 $d=3,5$ mm.

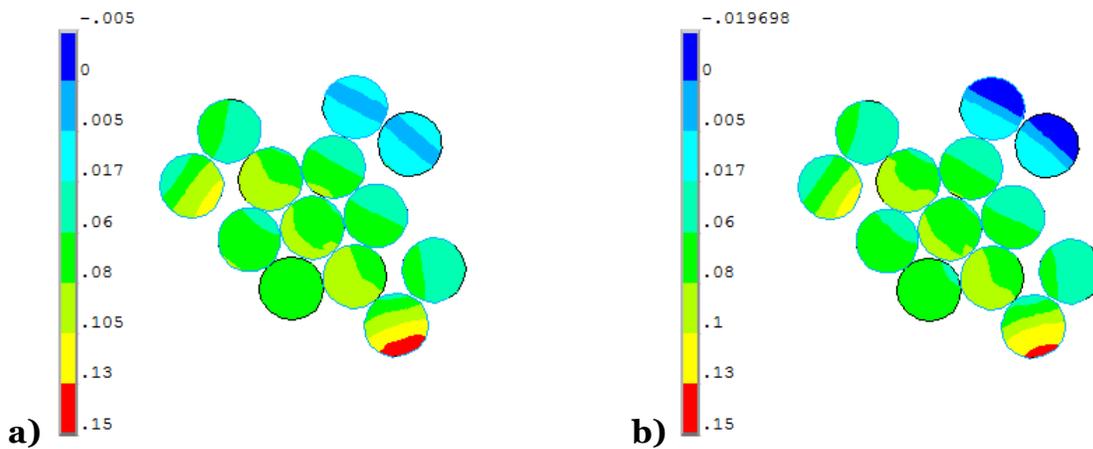


Figura 5.69: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable D6 $d=3,5$ mm.

Cable $d = 22,22$ mm:

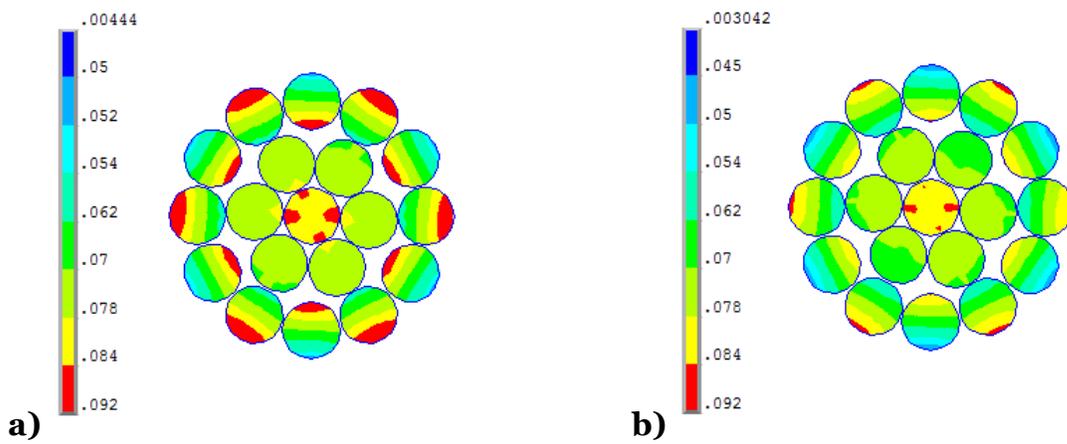


Figura 5.70: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable SD $d=22,22$ mm.

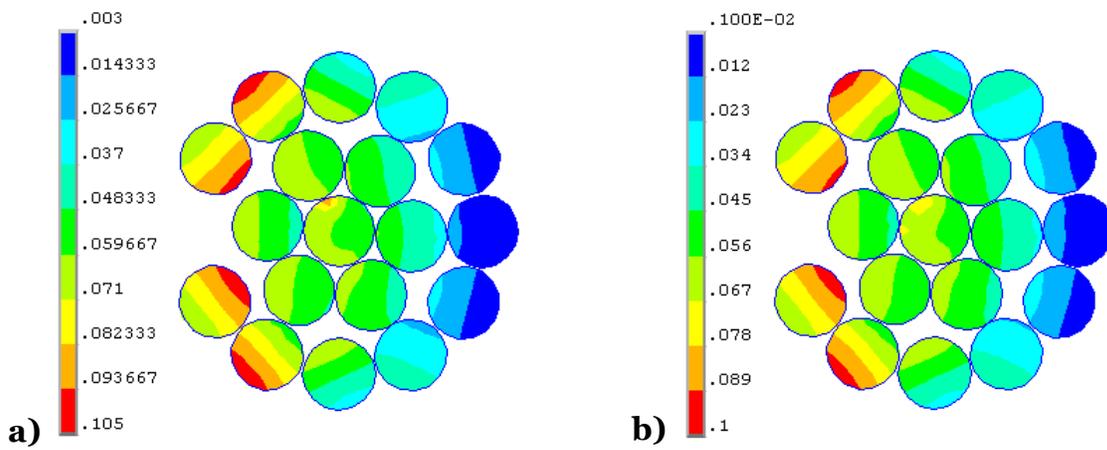


Figura 5.71: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable D1 $d=22,22$ mm.

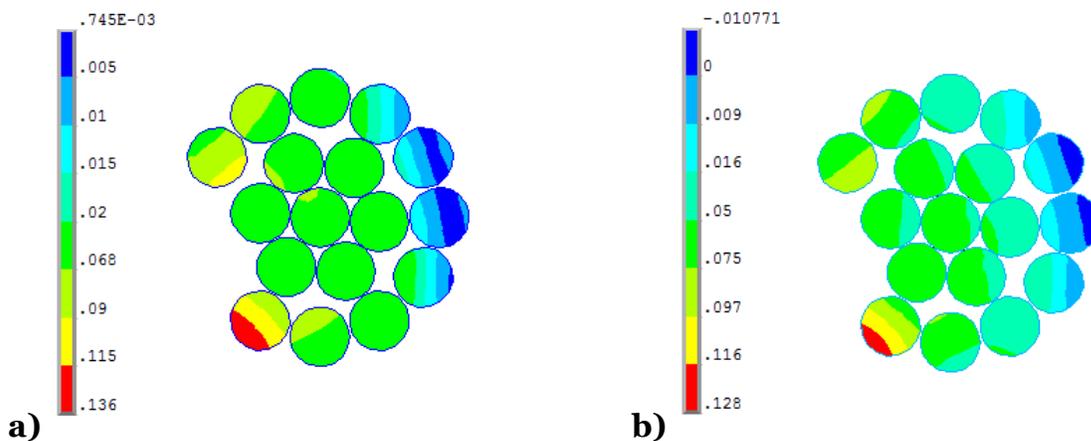


Figura 5.72: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable D2 $d=22,22$ mm.

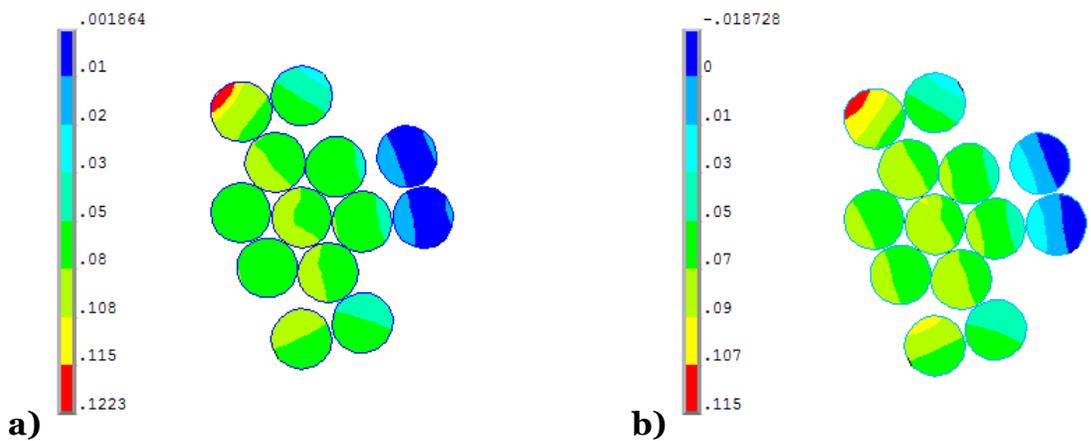


Figura 5.73: Gradientes de deformaciones últimas (a) equivalentes y (b) axiales, cable D6 $d=22,22$ mm.

Tabla 5-14: Gradiente de deformaciones últimas cable $d=3,5$ mm.

Configuración	Deformaciones Equivalentes [%]			Deformaciones Axiales [%]		
	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente
SD	8,0%	6,9%	13,8%	8,3%	6,8%	18,1%
D1	8,2%	1,0%	87,8%	8,1%	0,9%	88,9%
D2	12,0%	2,3%	80,8%	9,8%	0,5%	94,9%
D6	10,5%	0,7%	93,3%	9,5%	0,8%	91,6%

Tabla 5-15: Gradiente de deformaciones últimas cable $d=22,22$ mm.

Configuración	Deformaciones Equivalentes [%]			Deformaciones Axiales [%]		
	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente	$f_{m\acute{a}x}$	$f_{m\acute{i}n}$	Gradiente
SD	8,2%	7,0%	14,6%	8,2%	6,5%	20,7%
D1	8,1%	0,9%	88,9%	8,1%	0,8%	90,1%
D2	11,3%	0,9%	92,0%	9,8%	0,3%	96,9%
D6	10,8%	0,7%	93,5%	9,1%	0,1%	98,9%

Para el caso no dañado no se observa un gradiente transversal pero sí uno radial, siendo los valores menores en los extremos y creciendo hacia el centro del elemento. Las variaciones de los valores dependen netamente de la deformación longitudinal que sufre cada fibra en función del desplazamiento axial en el cable. El núcleo presenta la longitud más corta, seguido de los elementos de la segunda capa, mientras que la tercera presenta el mayor largo de alambres. Ante ausencia de flexión global, un desplazamiento uniforme genera deformaciones unitarias mayores mientras más corta es la fibra, lo que se logra apreciar en este modelo no dañado.

Se aprecia que los gradientes de deformaciones son mayores cuando el diámetro del espécimen es mayor.

A medida que aumenta el daño en la sección, el gradiente de tensiones comienza a crecer, sin embargo, decrece cuando el daño y el IA son muy grandes. El brazo palanca podría ser el responsable de este fenómeno.

Es posible así explicar el aumento de capacidad de deformaciones para niveles altos de daño en función del corrimiento del centro de rigidez de la sección cuando se pierdes fibras en un cable. Y es que, un alto índice de asimetría proviene de un desplazamiento del eje neutro del cable mayor con respecto al caso centrado (sin daño), el brazo palanca que se genera con respecto al punto más distante de la sección del cable disminuye en mayor medida. Esto, a su vez, hace disminuir las tracciones que se pueden generar producto de la flexión global generada por la asimetría.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones a las que se llega producto del análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo:

1. El mallado utilizado para el presente trabajo muestra ser válido a la hora de obtener resultados confiables, sin llegar a recurrir en gastos computacionales muy grandes. La utilización de elementos con interpolaciones lineales y de forma cúbica es la práctica común en el modelamiento de cables en EF por lo que se replicó en este estudio con resultados similares a los obtenidos por otros autores ([20], [13] [14], [21], [22], [23]). Una división del perímetro circular de cada fibra en 16 partes y una razón de largo:ancho en el manto de éstas de 2:1 es capaz de arrojar una solución precisa y robusta que muestra tensiones y deformaciones de manera satisfactoria para el análisis requerido.
2. Es posible eliminar las fibras dañadas del modelo sin incurrir en un error de simulación que interfiera con los resultados finales. Si bien no es posible extender esta afirmación a otras geometrías ni configuraciones, es aplicable al presente caso de estudio: largo equivalente a dos pasos ($2p$) de hélice exterior, de tres capas con configuración 1+6+12 (núcleo y dos capas helicoidales), empotramiento en ambos extremos y variadas condiciones de daño en la capa externa.
3. El análisis seccional propuesto como hipótesis para el presente estudio muestra validez para cables y configuraciones dañadas estudiadas. En base a los resultados, se concluye que, para que esto sea válido, es necesario que al menos se desarrollen dos pasos de hélice en los alambres helicoidales, lo que se condice con las conclusiones de Ghoreishi [16]. De esta manera, para una distancia desde los apoyos de medio paso de hélice externa ($0,5p_3$), se puede realizar un análisis seccional en todo el resto eje del cable y obtener variaciones despreciables en los valores observados. No se puede asegurar que esta validez se extienda a condiciones de apoyo distintas a las utilizadas en el presente estudio y a otras geometrías o configuraciones de daño.
4. La asimetría del daño produce desplazamientos ortogonales al eje del cable significativos. Estas deformaciones se deben a un desequilibrio en las fuerzas radiales que es necesario equilibrar desplazando el eje de simetría de la sección. Se observa que los valores de éstas son del orden de magnitud del diámetro (d) de la sección: para el caso de D1, es cercano a $1d$; para dos daños, a $1,5d$; finalmente, para seis daños, toma casi $2d$. Además, si se define una “tasa de desplazamiento radial normalizada” (TDRN) en función de la elongación axial del cable, se puede observar que existe una correlación casi lineal entre su IA y la TDRN, para los casos estudiados. Sin embargo, no es posible extender dicha correlación proporcional a todo el espectro de índices de asimetría puesto que, al hacer una regresión lineal de su curva, se tendría que para un IA=0 existen desplazamientos radiales, algo que ni la teoría ni la práctica muestran.

5. Al evaluar la deformación a la cual los cables dañados superan el *gap* definido por la norma ISO4309 en las curvas de capacidad de carga, es posible notar los cables presentan un nivel bajo de incursión en su rango plástico, predominando el comportamiento elástico antes de llegar al punto en que necesitan ser descartados. Esto se condice con lo que muestra el manual de usuario de la AISI [26], donde los factores de seguridad son tan altos (rango de entre 3 y 9) que incluso un cable dañado lograría soportar la carga de diseño sin dejar de presentar un comportamiento elástico (moverse en el rango inicial lineal elástico de la curva de capacidad).
6. Las curvas de capacidad de carga versus deformación axial muestran que, a medida que aumenta el porcentaje de daño, disminuye la carga residual máxima que puede soportar el cable. Sin embargo, la disminución de la capacidad de deformación no es directamente proporcional ni al nivel de daño ni al IA. Se observa que, cuando el cable presenta una sección muy dañada, el brazo palanca que se genera entre el nuevo centro de rigidez y el punto más traccionado del cable disminuye en mayor medida que lo que aumenta el desequilibrio de fuerzas. Esto hace que las tensiones máximas desarrolladas para un mismo nivel de deformación axial del espécimen sean menores que en los casos que presentan menor daño. Se concluye entonces que la ductilidad de un cable dañado no depende directamente de su pérdida de área neta ni de su índice de asimetría, sino que existe una relación más compleja que incorpora además el brazo palanca de la flexión global, la que está directamente relacionada con la deflexión que sufre el eje del cable.
7. La capacidad de deformación última de un cable dañado depende del tamaño (diámetro) de sus componentes. El análisis muestra que al pasar de un diámetro de 3,5 mm a uno de 22,22 mm, para una misma geometría, existe una pérdida de un 4,8% de ductilidad del espécimen. Este fenómeno es posiblemente atribuible al efecto que tienen las presiones de contacto en el desarrollo prematuro de plastificación en las fibras.
8. El modelo de área neta logra predecir con un error de un 9% la capacidad de carga última de los cables sin daño, sobreestimando los valores obtenidos mediante la modelación en EF. Para los cables que presentan daño, esta sobreestimación crece sustantivamente, llegando a errores del 22% para los casos con seis fibras dañadas. Esto se puede deber a que dicho modelo no incorpora las variaciones tensionales y de deformación que producen los contactos, las que aceleran los procesos de falla de un cable.
9. Las razones de capacidad de carga última entre los cables dañados y el caso sin daño son consistentes con los resultados obtenidos por Zyl [14] en su estudio. Los modelos muestran que la razón de fuerza residual para un caso con daño (FEM/SD) es mayor que la razón de área neta dañada. Esto quiere decir que, para un porcentaje $x\%$ de pérdida de sección transversal del espécimen, el porcentaje $y\%$

de pérdida de fuerza máxima resistente es siempre mayor. Por lo tanto, suponer que, por ejemplo (y de acuerdo a lo que dictan las normas internacionales), al perderse el 10% de las fibras de un cable se pierde sólo el 10% es un error y, como se aprecia, esas pérdidas en realidad pueden más altas.

10. Se aprecia que los modelos simplificados son capaces de predecir con una precisión de un 91% la rigidez axial elástica de los cables, lo que muestra que un modelo mecánico analítico es una muy buena aproximación al comportamiento elástico de los cables. Estos modelos analíticos, sin embargo, sobrestiman en todos los casos la rigidez al compararse con modelos en EF, lo que se condice con los resultados obtenidos por Judge [20], Shibu [21] y Jiang [13] [14]. La explicación de lo anterior podría venir del efecto que tienen las interacciones de contacto que aceleran la plastificación de los elementos en los puntos en que las fibras se tocan, disminuyendo la rigidez de cada una y, con esto, flexibilizando el comportamiento global cable. El caso con dos elementos dañados muestra la mayor diferencia, lo que se puede atribuir al desarrollo de mayores tensiones y deformaciones plásticas por efectos de contacto, lo que los modelos simplificados no incorporan en sus ecuaciones.
11. Es posible calcular satisfactoriamente la rigidez tanto elástica como plástica de un cable dañado a partir de la curva de carga-deformación del cable sin daño (SD) obtenida a través de la modelación en EF utilizando el concepto de área neta efectiva ($1 - \%Daño$). El rango de precisión es de entre 1 y 14,8%, con un error promedio de 6,4% para el diámetro de 3,5 mm y 9,2% para el de 22,22 mm, al compararse con los valores obtenidos directamente de cada modelo FEM dañado. Mayores niveles de daño y asimetría de éste aumentan el margen de diferencia entre los valores.
12. La evolución de las tensiones y deformaciones totales muestra un gradiente con su máximo en el núcleo y su mínimo en el perímetro del cable para todas las configuraciones con y sin daño en la fase inicial de elongación axial ($\varepsilon = 0,2\%$). Esto se condice con la elongación que sufren los elementos en cada capa en función de su largo; el núcleo es el más corto, mientras que los de la capa externa son los más largos. Posteriormente, a medida que aumenta el desplazamiento axial del extremo del cable, este gradiente centrado en el núcleo comienza a mutar hacia uno lineal con un máximo en la zona perimetral vecina al daño y su mínimo en el sector opuesto al daño, también en la tercera capa. Es decir, el impacto de la asimetría del daño en la distribución de tensiones es gradual y paulatino, y, para pequeñas deformaciones, el efecto del IA es casi imperceptible, en lo referente a tensiones y deformaciones.
13. El efecto de viga con múltiples apoyos, conocido como efecto *trellis*, se aprecia en todas las configuraciones de daño, pero con distintas características. Este fenómeno ocurre cuando, al traccionar un alambre enrollado en torno a una capa de fibras, se producen contactos radiales puntuales entre el elemento externo y las

fibras subyacentes, haciendo que aparezcan momentos positivos en los vanos entre apoyos y negativos en el punto en que la fibra entra en contacto con una de la capa más interna. Debido a la naturaleza del origen de este efecto, se observa que, en las fibras opuestas a la zona dañada, al disminuir las tensiones axiales sobre ellas, producto de la flexión global del cable, los *trellis* desaparecen casi completamente. Esto pues, al no existir fuerzas radiales en un alambre, éste no ejerce presión sobre la capa subyacente.

14. El desarrollo de deformaciones plásticas en todos los cables ocurre antes de lo esperado, de acuerdo a la ley constitutiva, la que dice que la plastificación debería ocurrir con $\varepsilon = 0,53\%$. Basta ver que, en todos los casos estudiados, el núcleo presenta zonas plastificadas para valores de elongación menores a un 0,4%. Esta misma aparición prematura de deformaciones plásticas ocurre para las fibras de la segunda. Se observa que todas estas apariciones ocurren inicialmente en el manto de los alambres y se extienden gradualmente hacia su centro, además de originarse en los puntos en que éstos se tocan. Se deduce entonces que son las presiones de contacto las que adelantan la plastificación de las fibras y, con esto, la plastificación global del cable, volviéndolo más flexible y menos dúctil. Vale la pena hacer notar el que caso que presenta mayores presiones de contacto coincide con el que logra menor capacidad de deformación última (D2), mientras que los más dúctiles muestran presiones más bajas (SD y D6).
15. Las presiones de contacto desarrolladas por el cable de 22,22 mm de diámetro son, individualmente y en promedio, siempre más altas que las de los cables de 3,5 mm (54% más presión promedio para el cable mayor). Esto puede explicar el hecho de que, para cada configuración de estudio, el espécimen de mayores dimensiones muestra menor capacidad de deformación. Lo anterior, ya que, como se mencionó en el punto anterior, mayores presiones aceleran el desarrollo de mayores tensiones y deformaciones plásticas.
16. Los gradientes de tensiones equivalentes se observan siempre menores que los axiales. Además, estos diferenciales muestran una correlación directa con la capacidad de deformación del espécimen: un menor gradiente implica mayor ductilidad; uno mayor, menor deformación última. Por otra parte, cuando se considera la tensión axial, los gradientes crecen a medida que aumenta el daño y el IA. Además, es posible observar tensiones axiales negativas (compresiones) en pequeñas zonas de las fibras opuestas al sector dañado, lo que muestra que el efecto de flexión global es tan grande que logra contrarrestar, en algunos casos, la tracción axial del cable.
17. De la misma manera que con las tensiones, los gradientes de deformaciones muestran un comportamiento que correlaciona la capacidad de deformación con un menor gradiente equivalente y el nivel de daño y asimetría con un mayor gradiente axial. Además, se observan deformaciones negativas, es decir, existe una compresión en ciertos puntos de las fibras opuestas al daño. Esto se condice con

los resultados experimentales de Evans [35], quien, a través de *strain gages*, midió deformaciones negativas en fibras de especímenes dañados que ensayó.

18. Se observa que los gradientes de tensiones y deformaciones en la sección transversal del cable, tanto equivalentes con axiales, son mayores cuando el diámetro del espécimen es mayor. Esto se podría deber al aumento de presiones entre fibras cuando sus dimensiones crecen, lo que produce un cambio tensional en el cable que se ve amplificado con radios más grandes de los componentes.
19. Se puede concluir que los criterios de descarte de la industria podrían ser revisados, de manera de incorporar las variables del diámetro de los cables y la distribución del daño en ellos puesto que, como se ha visto en el presente trabajo, son variables que afectan el comportamiento de un espécimen que ha perdido fibras. Si bien los resultados obtenidos en este estudio no son concluyentes debido a factores como la falta de validación experimental o los criterios de falla definidos, existe una tendencia que apunta hacia la necesidad de replantear las metodologías y parámetros bajo los cuales la industria exige reparar o descartar los elementos que presentan daños. Esto se condice con el trabajo realizado por Zyl [14], donde es claro que medir la capacidad residual como relación directa con la pérdida de área efectiva de la sección del cable produce una sobreestimación sustantiva de la capacidad de carga real que tiene un cable dañado.

Recomendación para Estudios Futuros

Se recomienda realizar una validación experimental para el presente trabajo, mediante ensayos de cables con la configuración acá estudiada. Además, se sugiere extender el estudio a geometrías que permitan una mayor variabilidad de índices de asimetría. Se sugiere considerar una variedad mayor de diámetros en los especímenes a analizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GA Costello, *Theory of Wire Rope*, 2nd ed. Springer, 1997.
- [2] D. Vargas, “Estimación Numérica de la Influencia de la Distribución Asimétrica de Daño en la Respuesta Estática de Cables con Geometría Multicapa-Multinivel”, Universidad de Chile, 2010.
- [3] E. De Vico, “Efectos de la Distribución Aasimétrica en la Sección Trnasversal de un Cable: Modelación Numérica”, Universidad de Chile, 2013.
- [4] T. Bravo, N. Ramírez y J. F. Beltrán, “Evaluación Numérica de la Influencia de la Distribución Asimétrica de Daño Superficial en Cables con Geometría Multicapa”. Sociedad Chilena de Mecánica Computacional, Arica, Chile, p. 10, 2016.
- [5] International Organization for Standarization, “ISO 4309”, vol. 2, 2010.
- [6] C. Macdougall y F. M. Bartlett, “Mechanical Model for Unbonded Seven-Wire Tendon with Symmetric Wire Breaks”, *J. Eng. Mech.*, vol. 131, nº 12, pp. 1239–1247, 2005.
- [7] C. Macdougall y F. M. Bartlett, “Mechanical Model for Unbonded Seven-Wire Tendon with Single Broken Wire”, *J. Eng. Mech.*, vol. 131, nº 12, pp. 1239–1247, 2006.
- [8] J. F. Beltrán, “Computational Modelling of Synthtic-Fiber Ropes”, University of Texas, 2006.
- [9] J. F. Beltrán y E. B. Williamson, “Investigation of the Damage-Dependent Response of Mooring Ropes”, *J. Eng. Mech.*, vol. 135, nº 11, pp. 1237–1247, 2009.
- [10] S. Machida y A. J. Durelli, “Response of a Strand to Axial and Torsional Displacements”, *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 15, pp. 241–251, 1973.
- [11] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 17.2, 2016.
- [12] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 15.0, 2013.
- [13] International Organization for Standarization, ISO4309, vol. 2, 2010.
- [14] M. Van Zyl, “Discard criteria for mine winder ropes Executive summary”, September, 2000.
- [15] D. Li, a Miyase, J. G. Williams y S. S. Wang, “Damage Tolerance of Synthetic-Fiber Mooring Rope : Small-Scale Experiments and Analytical Evaluation of Damaged Subropes and Elements”, *Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl.*, nº 472, 2002.

- [16] S. R. Ghoreishi, T. Messenger, P. Cartraud y P. Davies, “Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 49, n° 11, pp. 1251–1261, 2007.
- [17] N. Ramírez, “Análisis de Cables de Sección Transversal sin Daño y con Daño Simétrico y Asimétrico Sujetos a Cargas Axisimétricas Utilizando Modelos Tridimensionales de Elementos Finitos”, Universidad de Chile, 2015.
- [18] W. G. Jiang, J. L. Henshall y J. M. Walton, “Concise finite element model for three-layered straight wire rope strand”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 42, n° 1, pp. 63–86, 2000.
- [19] W. G. Jiang, M. K. Warby y J. L. Henshall, “Statically indeterminate contacts in axially loaded wire strand”, *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 27, n° 1, pp. 69–78, 2008.
- [20] R. Judge, Z. Yang, S. W. Jones y G. Beattie, “Full 3D finite element modelling of spiral strand cables”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 452–459, 2012.
- [21] G. Shibu, K. V Mohankumar y S. Devendiran, “Analysis of a three layered straight wire rope strand using finite element method”, *Proc. World Congr. Eng. 2011, WCE 2011*, vol. 3, pp. 2588–2593, 2011.
- [22] V. Fontanari, M. Benedetti y B. D. Monelli, “Elasto-plastic behavior of a Warrington-Seale rope: Experimental analysis and finite element modeling”, *Eng. Struct.*, vol. 82, pp. 113–120, 2015.
- [23] G. Fedorko, E. Stanova, V. Molnar, N. Husakova y S. Kmet, “Computer modelling and finite element analysis of spiral triangular strands”, *Adv. Eng. Softw.*, vol. 73, pp. 11–21, 2014.
- [24] W. Zhou y H. Q. Tian, “A novel finite element model for single-layered wire strand”, *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, n° 6, pp. 1767–1771, 2013.
- [25] S. Lalonde, R. Guilbault y F. Légeron, “Modeling multilayered wire strands, a strategy based on 3D finite element beam-to-beam contacts - Part I: Model formulation and validation”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 126, pp. 281–296, 2017.
- [26] AISI, “Wire Rope User’s Manual”. 1979.
- [27] Prodinsa, Catálogo en línea. Disponible en: <http://www.prodinsa.cl/>.
- [28] T. Bravo, “Estimación numérica de la respuesta estética de un cable dañado: formulación viga-cable”, Universidad de Chile, 2017.
- [29] S. Imaoka, “Contact Analysis Tips”, *ANSYS Inc.*, pp. 1–12, 2009.
- [30] D. H. Johnson, “Principles of Simulating Contact Between Parts Using ANSYS”, *Penn State–Erie Univ. Erie, Pennsylvania*, p. 12, 2002.

- [31] J. T. Metrisin y F. T. Technologies, “2008 International ANSYS Conference Guidelines for Obtaining Contact Convergence”, pp. 1–29, 2008.
- [32] E. Wang, T. Nelson y R. Rauch, “Back to Elements - Tetrahedra vs . Hexahedra”, *CAD-FEM GmbH, Munich, Ger.*, p. 16, 2004.
- [33] AutoCAD 2014, Autodesk Inc., 2014.
- [34] S. E. Benzley, E. Perry, K. Merkley, B. Clark y G. Sjaardema, “A Comparison of All-Hexahedral and All-Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elasto-Plastic Analysis”, *4th Int. Meshing Roundtable, Sandia Natl. Lab.*, pp. 179–191, 1995.
- [35] J. J. Evans, I. M. L. Ridge y C. R. Chaplin, “Wire failures in ropes and their influence on local wire strain behaviour in tension-tension fatigue”, *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 36, n° 2, pp. 231–244, 2001.