



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

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA DISTRIBUCIÓN Y EVOLUCIÓN DEL DAÑO EN CABLES METÁLICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EXEQUIEL IGNACIO INOSTROZA CORREA

PROFESOR GUÍA

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

RICARDO HERRERA MARDONES

RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Por: Exequiel Ignacio Inostroza Correa

Profesor Guía: Juan Felipe Beltrán Morales

Fecha 18/05/2021

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA DISTRIBUCIÓN Y EVOLUCIÓN DEL DAÑO EN CABLES METÁLICOS

El presente trabajo consiste en el estudio del daño en cables metálicos que tienen hebras inicialmente fracturadas de manera asimétrica, abarcando así las distintas configuraciones de asimetrías que pudieran existir en cables compuestos de un núcleo y seis hebras perimetrales. El objetivo principal es poder llegar a crear una forma de medición del daño en cables a partir del daño de sus hebras, que, a su vez, son dañadas con relación a la asimetría del cable producto de los gradientes de deformaciones que se generan.

Para la realización de lo previamente mencionado se utilizan datos bibliográficos para así obtener las propiedades de algunos aluminios y aceros, con los que se lleva a cabo el estudio. Junto a esto se realiza una programación en Matlab para obtener los resultados de deformaciones, tensiones, fuerzas y daños de hebras y de cables.

Se realiza además una comparación en cuanto a la capacidad de acumulación de daño entre las diferentes configuraciones y entre los diferentes materiales, llegando a la conclusión de que los daños críticos son controlados mayoritariamente por la asimetría de la sección transversal del cable, por sobre las características del metal en estudio.

Además del daño, en este trabajo se confirma que la asimetría provocada por las hebras rotas influye directamente en la degradación de las capacidades mecánicas de los cables. Lo anteriormente mencionado se ve reflejado en una clara disminución de energía que puede acumular un cable mientras más asimétrico es, llegando a un límite máximo de asimetría con tres hebras fracturadas.

Es preciso mencionar el alcance de este estudio, ya que los cables estudiados son con hebras rotas de manera adyacente, siendo el único caso diferente el cable virgen, que no tiene hebras rotas. Por lo tanto, es claro que en ninguna configuración estudiada el núcleo está fracturado.

También se destaca el hecho de que, desde tres hebras rotas en adelante, el daño crítico es muy similar, pero no así la energía necesaria para llegar a ese daño crítico, necesitando más energía los cables que tienen más hebras vivas. A su vez, para los cables con menos de tres hebras fracturadas, el daño crítico del cable es mayor a medida que hay más hebras vivas, y así también la energía para llegar a dicho daño.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3	METODOLOGÍA	2
1.4	ALCANCE Y LIMITACIONES	2
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	EFFECTOS DE CABLES DAÑADOS	3
2.2	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	4
2.3	EFFECTO DAÑO	7
2.3.1	MECANISMOS DE DAÑO	8
2.3.2	MÉTODOS DE MEDICIÓN	9
3	MEDICIONES DE DAÑO A USAR	15
3.1	MÉTODO DE LEMAITRE & DESMORAT	15
3.2	MÉTODO PROPUESTO	23
3.3	VALIDACIÓN PROPUESTA	25
4	APLICACIÓN	31
4.1	APLICACIÓN EN ENSAYOS DISPONIBLES	31
4.1.1	ACERO GALVANIZADO	32
4.1.2	ALUMINIO	34
4.2	APLICACIÓN EN CABLES	35
4.2.1	ACERO GALVANIZADO	36
4.2.2	ALUMINIO	45
5	RESUMEN DE RESULTADOS	55
5.1	ACERO GALVANIZADO	55
5.2	ALUMINIO	60
5.3	COMPARACIÓN DE MATERIALES	64
6	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	66
7	BIBLIOGRAFÍA	68
	ANEXO 1	69
	ANEXO 2	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Detalle de ensayos de alambres	5
Tabla 2: Parámetros curva sin daño Aluminio 7075-T6	25
Tabla 3: Parámetros curva sin daño Aluminio 2024-T851	26
Tabla 4: Parámetros curva sin daño Aluminio 6061-T651	28
Tabla 5: Parámetros curva sin daño Aluminio 7075-T6	29
Tabla 6: Datos para cálculo de daño de acero galvanizado.....	33
Tabla 7: Datos para cálculo de daño de aluminio	34
Tabla 8: Deformación máxima para cada configuración del cable del acero galvanizado	55
Tabla 9: Deformación máxima para cada configuración del cable del aluminio	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Ejemplo de cable virgen y dañado	4
Figura 2: distribución de esfuerzos de cable dañado [7].....	4
Figura 3: Ley constitutiva del acero galvanizado [4].....	5
Figura 4: Ley constitutiva del aluminio [4].....	6
Figura 5: Representación del daño [13].....	8
Figura 6: Representación del daño según Bonora [14].....	10
Figura 7: Componentes de la ecuación de daño [9]	12
Figura 8: Ciclo carga descarga [11].....	13
Figura 9: Ejemplo para identificación de parámetros de Lemaitre & Desmorat [15]	14
Figura 10: Gráfico de daño Aluminio 7075-T6 según paper [17].....	16
Figura 11: Gráfico tensión-deformación extendido Aluminio 7075-T6.....	16
Figura 12: Daño de Aluminio 7075-T6 según Lemaitre & Desmorat.....	17
Figura 13: Comparación de daños para Aluminio 7075-T6	17
Figura 14: Gráfico de daño Aluminio 2024-T851 según paper [17].....	18
Figura 15: Gráfico tensión-deformación extendido Aluminio 2024-T851	18
Figura 16: Daño de Aluminio 2024-T851 según Lemaitre & Desmorat	19
Figura 17: Comparación de daños para Aluminio 2024-T851.....	19
Figura 18: Gráfico de daño Aluminio 6061-T651 según paper [17].....	20
Figura 19: Gráfico tensión-deformación extendido Aluminio 6061-T651	20
Figura 20: Daño de Aluminio 6061-T651 según Lemaitre & Desmorat	21
Figura 21: Comparación de daños para Aluminio 6061-T651.....	21
Figura 22: Gráfico de daño Acero DP 590 según documento [11].....	22
Figura 23: Gráfico tensión-deformación extendido Acero DP 590	22
Figura 24: Daño de Acero DP 590 según Lemaitre & Desmorat.....	23
Figura 25: Comparación de daños para Acero DP 590.....	23
Figura 26: Ejemplo método propuesto	24
Figura 27: Gráfico propuesto de Aluminio 7075-T6 para método sin daño	25
Figura 28: Comparación de métodos de cálculo de daño para Aluminio 7075-T6.....	26
Figura 29: Gráfico propuesto de Aluminio 2024-T851 para método sin daño.....	27
Figura 30: Comparación de métodos de cálculo de daño para Aluminio 2024-T851.....	27
Figura 31: Gráfico propuesto de Aluminio 6061-T651 para método sin daño	28
Figura 32: Comparación de métodos de cálculo de daño para Aluminio 6061-T651.....	29
Figura 33: Gráfico propuesto de Acero DP 590 para método sin daño.....	30
Figura 34: Comparación de métodos de cálculo de daño para Acero DP 590	30
Figura 35: Ley constitutiva del acero galvanizado a usar	31
Figura 36: Ley constitutiva del aluminio a usar.....	32
Figura 37: Ley constitutiva extendida del acero galvanizado a usar.....	33
Figura 38: Función de daño a usar en acero galvanizado.....	33
Figura 39: Ley constitutiva extendida del aluminio a usar	34
Figura 40: Función de daño a usar en aluminio	35
Figura 41: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 0 hebras rotas.....	37
Figura 42: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 0 hebras rotas.....	38
Figura 43: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 0 hebras rotas.....	39

Figura 44: Daño total en función de deformación del cable para acero con 0 hebras rotas	40
Figura 45: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 1 hebra rota.....	41
Figura 46: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 1 hebra rota.....	42
Figura 47: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 1 hebra rota.....	43
Figura 48: Daño total en función de deformación del cable para acero con 1 hebra rota	44
Figura 49: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 0 hebras rotas	45
Figura 50: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 0 hebras rotas	46
Figura 51: Comparación de resultados experimentales con numéricos para cable virgen	47
Figura 52: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 0 hebras rotas	48
Figura 53: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 0 hebras rotas	49
Figura 54: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 1 hebra rota.....	50
Figura 55: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 1 hebra rota.....	51
Figura 56: Comparación de resultados experimentales con numéricos para cable con 1 hebra rota.....	52
Figura 57: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 1 hebra rota.....	53
Figura 58: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 1 hebra rota	54
Figura 59: Deformación máxima para cada configuración del cable del acero galvanizado.....	56
Figura 60: Daño máximo para cada configuración del cable del acero galvanizado	57
Figura 61: Máxima energía por cada configuración del cable del acero galvanizado.....	58
Figura 62: Energía para llegar a daños críticos de cable de acero	58
Figura 63: Comparación de daños por energía para acero galvanizado	59
Figura 64: Comparación de daño total acumulado con daño por energía para acero galvanizado.....	59
Figura 65: Deformación máxima para cada configuración del cable del aluminio	60
Figura 66: Daño máximo para cada configuración del cable del acero galvanizado	61
Figura 67: Máxima energía por cada configuración del cable del acero galvanizado.....	62
Figura 68: Energía para llegar a daños críticos de cable de aluminio	62
Figura 69: Comparación de daños por energía para aluminio	63
Figura 70: Comparación de daño total acumulado con daño por energía para aluminio	63
Figura 71: Comparación de deformaciones máximas para ambos metales	64
Figura 72: Comparación de daños máximos para ambos metales	65
Figura 73: Comparación de energías máximas acumuladas para ambos metales.....	65
Figura 74: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 2 hebras rotas.....	69

Figura 75: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 3 hebras rotas.....	70
Figura 76: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 4 hebras rotas.....	70
Figura 77: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 5 hebras rotas.....	71
Figura 78: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 2 hebras rotas.....	72
Figura 79: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 3 hebras rotas.....	72
Figura 80: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 4 hebras rotas.....	73
Figura 81: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 5 hebras rotas.....	73
Figura 82: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 2 hebras rotas.....	74
Figura 83: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 3 hebras rotas.....	74
Figura 84: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 4 hebras rotas.....	75
Figura 85: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 5 hebras rotas.....	75
Figura 86: Daño total en función de deformación del cable para acero con 2 hebras rotas.....	76
Figura 87: Daño total en función de deformación del cable para acero con 3 hebras rotas.....	76
Figura 88: Daño total en función de deformación del cable para acero con 4 hebras rotas.....	77
Figura 89: Daño total en función de deformación del cable para acero con 5 hebras rotas.....	77
Figura 90: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 2 hebras rotas.....	78
Figura 91: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 3 hebras rotas.....	79
Figura 92: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 4 hebras rotas.....	79
Figura 93: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 5 hebras rotas.....	80
Figura 94: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 2 hebras rotas.....	81
Figura 95: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 3 hebras rotas.....	81
Figura 96: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 4 hebras rotas.....	82
Figura 97: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 5 hebras rotas.....	82
Figura 98: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 2 hebras rotas.....	83

Figura 99: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 3 hebras rotas	83
Figura 100: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 4 hebras rotas	84
Figura 101: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 5 hebras rotas	84
Figura 102: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 2 hebras rotas	85
Figura 103: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 3 hebras rotas	85
Figura 104: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 4 hebras rotas	86
Figura 105: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 5 hebras rotas	86

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los cables, como elementos estructurales, son empleados en muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo grúas, ascensores, sistema de soporte en minas, puentes, conductores eléctricos, atraque de naves marinas en puertos, sistema de anclaje, entre otros. Esta diversidad de usos motiva a los fabricantes a proveer una gama de configuraciones de cables adecuados para diferentes propósitos, teniendo éstos diferente número y distribución de componentes que los conforman, en donde los componentes pueden estar hechos de distintos materiales, tales como acero, fibra natural y sintética, y aleaciones [18, 19].

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

El entendimiento de la interacción de los factores que inducen daño al cable y su dependencia con las condiciones de operación, son esenciales para estimar tanto la vida útil del cable en la etapa de diseño, como para establecer los métodos y criterios apropiados para la inspección y retiro de cables respectivamente. De esta forma, la vida útil de un cable puede ser prolongada siguiendo un programa de planificación de instalación, operación, mantención e inspección [20]. En este contexto, la evaluación de la tolerancia al daño de un cable resulta esencial para el diseño de éste.

En este trabajo de título se busca encontrar numéricamente una ley isotrópica de acumulación de daño para los elementos que forman cables metálicos (acero y aluminio) cuyos diámetros varían entre 9.5 mm y 14.3 mm. Determinada la ley, esta es aplicada a cables de manera de determinar la distribución de daño en la sección transversal de éstos y su evolución con respecto a su nivel de deformación. En particular, se estudia el caso base de un cable inicialmente intacto (virgen) en que se carga hasta su fractura. Luego, se estudian cables con diferentes configuraciones de elementos fracturados en su sección trasversal de manera de determinar el impacto en la distribución y evolución del daño en el cable debido a la presencia de elementos fracturados. De esta manera, se puede estimar el nivel de daño que presenta un cable en servicio luego de que se haya determinado el nivel de carga y número y distribución de elementos fracturados en una sección en particular.

Esta información puede ser de utilidad en la toma de decisiones asociada a la mantención y reemplazo de cables en servicio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de tesis es determinar una ley de acumulación de daño para los componentes que forman cables metálicos (acero y aluminio).

1.2.2 Objetivos específicos

- Incorporar en un modelo numérico para cables con componentes fracturados un módulo que estime el nivel de daño de sus componentes.
- Incorporar una ecuación para el daño en función de la energía en cables con componentes fracturados.
- Obtener numéricamente la distribución y evolución de daño en cables metálicos (acero y aluminio) cuyos diámetros varían entre 9.5 mm y 14.3 mm.
- Encontrar una métrica que permita estimar el nivel de daño de un cable en base al nivel de daño de sus componentes.

1.3 Metodología

- Revisión Bibliográfica
 - Conceptos de mecánica de medios dañados.
 - Modelos numéricos de cables con componentes fracturados
 - Experimentos en cables con componentes fracturados.
- Incorporar la ley de evolución del daño de los componentes de un cable en un algoritmo numérico para determinar nivel de daño de un cable.
- Conclusiones.

1.4 Alcance y limitaciones

Resultados esperados:

- Obtener función que describa la evolución del daño de los componentes de un cable metálico.
- Distribución y evolución del daño en cables con componentes fracturados en su sección transversal.
- Parámetro que estime el nivel de daño de un cable en base a geometría, nivel de carga y distribución de componentes fracturados en su sección transversal.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Efectos de cables dañados

Según el trabajo titulado “Efectos de la distribución asimétrica de daño en la sección transversal de un cable: modelación numérica” por Enzo De Vico [7], los cables que tienen una o más hebras dañadas tienen un comportamiento distinto a un cable intacto al ser cargados axialmente. Esto no solo repercute en una merma en su capacidad como es esperable de un elemento estructural que cuenta con una menor superficie para recibir una carga, sino que además le genera un gradiente de deformación y de esfuerzos internos al área transversal del cable, lo que hace que algunas hebras sufran mayores deformaciones y reciban mayores cargas que otras. El estudio comienza con una modelación mediante elementos finitos donde se simulan diferentes tipos de cables, con diferente cantidad de hebras dañadas, y en distintas disposiciones. El estudio continúa con una comparación con resultados de estudios bibliográficos y de un modelo propuesto, cosa que no afecta el desarrollo de este estudio. Lo importante es que en este estudio se observa una mayor deformación para cables dañados asimétricamente que para otro cable dañado de forma equivalente, pero con una disposición más simétrica.

Lo anteriormente expuesto se reafirma en el estudio hecho por Ismael Silva, titulado, “Análisis de cables superficialmente dañados en forma asimétrica con geometría multicapa: modelos numéricos en elementos finitos” [8], donde se estudian los cables dañados superficialmente de forma asimétrica con modelos en elementos finitos en 3D más sofisticados en los cuales se intenta imitar cada uno de los esfuerzos que siente cada hebra del cable. Mediante ese estudio se vuelve a apreciar un gradiente de deformación y de esfuerzos internos. Se destaca además la conclusión de que la asimetría del daño produce desplazamientos ortogonales al eje del cable significativo debido a un desequilibrio en las fuerzas radiales que es necesario equilibrar desplazando el eje de simetría de la sección.

Luego se estudió cómo cambia la capacidad de los cables por la geometría de su daño en el trabajo de Fernanda Núñez, titulado “Influencia de la distribución del daño en curvas de capacidad de cables: análisis experimental” [6], en el cual mediante experimentos de tracción se comparan curvas de capacidad de cables con diferentes geometrías de daño, así como también cables vírgenes. Todo esto se hace para diferentes diámetros de cable y para dos materiales, aluminio y acero galvanizado. Las conclusiones de ese estudio tienen armonía con los dos anteriores debido a que mediante curvas deformación-carga se observa que a medida que las cargas de tracción aumentan, las hebras más cercanas a los elementos faltantes tienen una mayor deformación, cosa que ocurre para ambos materiales y cada diámetro de cable que se ensayó, lo que hace notar que no depende del material ni de la geometría, la distribución de las deformaciones es una propiedad de los cables dañados.

En la figura 1 a continuación se presentan ejemplos de los elementos estudiados en los trabajos anteriormente mencionados:

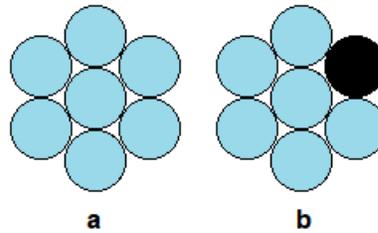


Figura 1: Ejemplo de cable virgen y dañado

En la figura 1a se puede apreciar un cable virgen, o sin daño, y en la figura 1b se observa un cable con un elemento dañado, o más simplemente dicho, con un daño.

Los estudios mencionados dan a conocer que este fenómeno no se puede pasar por alto ya que luego de que el cable pierde algunas hebras superficiales, las hebras restantes no se comportan de forma simétrica, y eso es lo que se presenta a continuación como un ejemplo de los resultados que obtuvo Enzo De Vico [7].

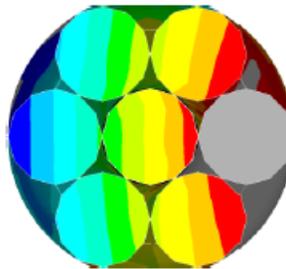


Figura 2: distribución de esfuerzos de cable dañado [7]

En la figura 2 se muestra la distribución de esfuerzos internos de un cable dañado sometido a tracción, donde el color rojo representa mayores tensiones y va degradando hasta el azul que representa las tensiones más bajas. Debido a que mostrar todo el contexto de los resultados no es parte de este estudio solo se presenta la distribución sin datos numéricos, para así familiarizar al lector con la idea de distribución de esfuerzos o deformaciones. Estos datos fueron obtenidos a partir de la deformación de las hebras, es por ello que se habla indistintamente de tensiones y deformaciones.

2.2 Propiedades de los materiales

Respecto de los materiales, el trabajo de Tomás Bravo [4] formula una ley constitutiva para alambres que componen cables tanto de acero como de aluminio. Esta ley constitutiva la deduce a partir de ensayos realizados a tracción a alambres que componían hebras de cables de distintos diámetros. Los detalles y resultados de sus ensayos se presentan gráficamente a continuación.

Tabla 1: Detalle de ensayos de alambres

Material	Φ_{cable} (mm)	#Probetas
Acero	9,5	3
Acero	12,7	3
Aluminio	14,3	3
Aluminio	25,3	3

Como muestra la tabla 1, se realizaron ensayos de tres probetas para alambres provenientes de dos distintos diámetros por cada material. A continuación, se muestran también los gráficos de los ensayos realizados para ese trabajo.

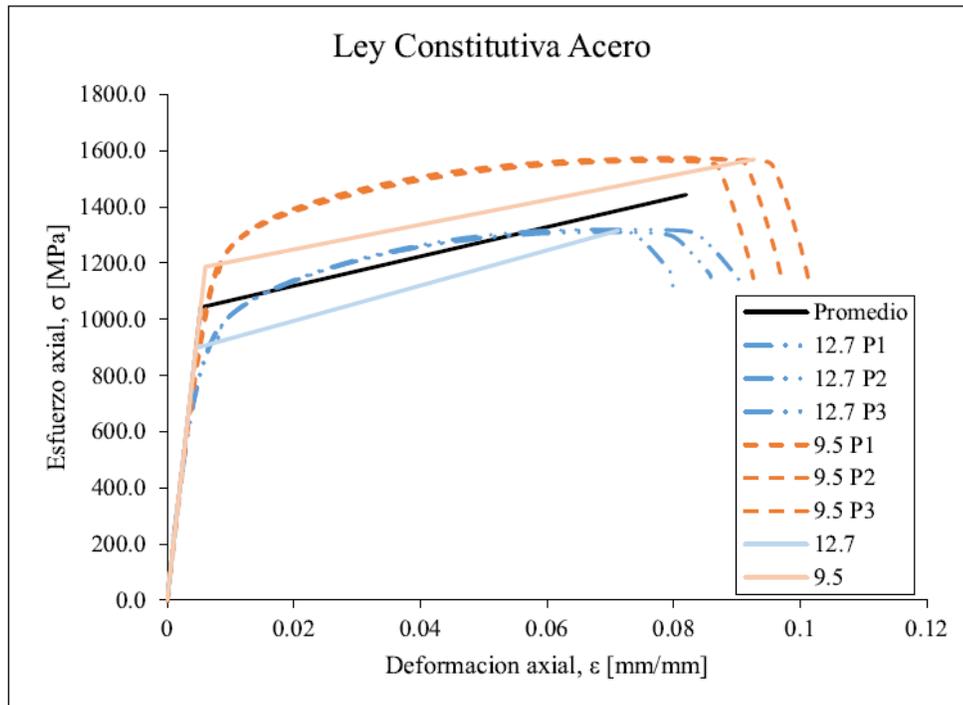


Figura 3: Ley constitutiva del acero galvanizado [4]

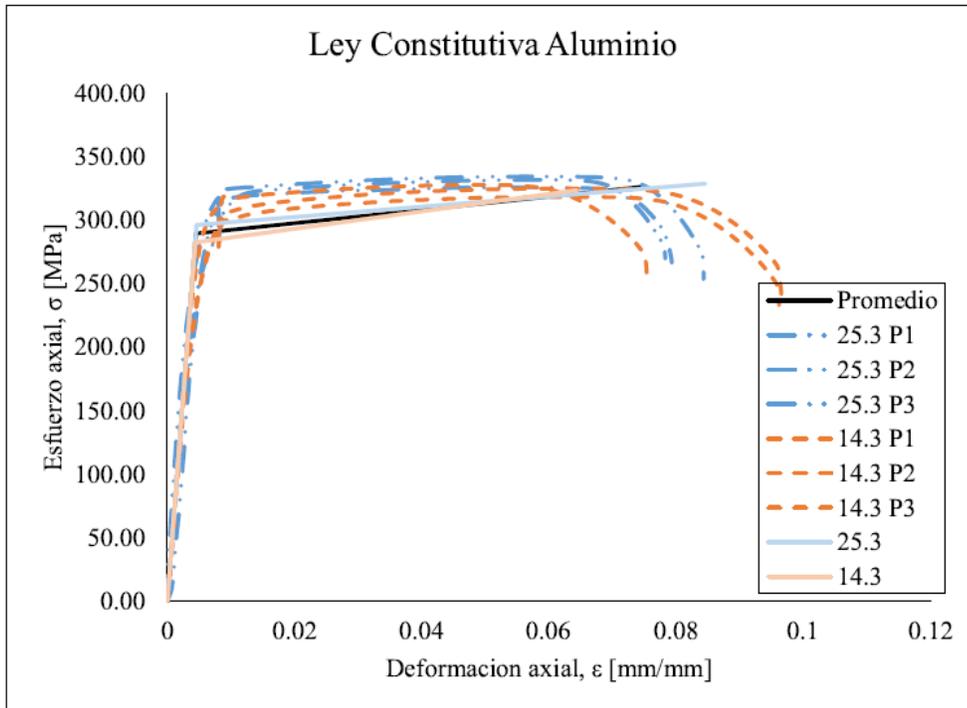


Figura 4: Ley constitutiva del aluminio [4]

Las figuras 3 y 4 muestran el comportamiento de los materiales en un ensayo de tracción, lo que facilita la creación de una ley constitutiva.

Los gráficos de ambos materiales se dividen en tres, una parte elástica y lineal, otra parte polinómica que sirve para suavizar el encuentro de las rectas, y la siguiente lineal, casi horizontal que representa la parte plástica de los metales. A partir de eso se genera la ley constitutiva del trabajo de Tomás Bravo [4].

La ley constitutiva propuesta por Bravo es:

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} E_e \epsilon, & \epsilon < \epsilon'_y \\ a(\epsilon - \epsilon'_y)^3 + b(\epsilon - \epsilon'_y)^2 + c(\epsilon - \epsilon'_y) + d, & \epsilon'_y \leq \epsilon < \epsilon''_y \\ E_p(\epsilon_y - \epsilon'_y) + E_e \epsilon'_y, & \epsilon > \epsilon''_y \end{cases}$$

Donde la mayoría de los parámetros son constantes que dependen del material.

Constantes para el acero galvanizado:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_y' &= 0.005 \\
\varepsilon_y'' &= 0.006 \\
E_e &= 196603.774 \text{ MPa} \\
E_p &= 5228.162 \text{ MPa} \\
a &= 76550244766.427 \\
b &= -210513173.108 \\
c &= 196603.774 \\
d &= 983.019
\end{aligned}$$

Constantes para el aluminio:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_y' &= 0.003 \\
\varepsilon_y'' &= 0.0095 \\
E_e &= 64509.800 \text{ MPa} \\
E_p &= 207.000 \text{ MPa} \\
a &= 639105211.930 \\
b &= -11177645.047 \\
c &= 64509.800 \\
d &= 193.529
\end{aligned}$$

Se observa entonces que los valores del esfuerzo interno de ambos materiales dependen solo de la deformación que han sufrido, y que la ley constitutiva tiene una parte lineal, otra parte que es una ecuación de grado tres, y una última parte que también es lineal como la primera.

2.3 Efecto daño

Según el libro “Mecánica del daño continuo” de Luccioni [13], en términos generales, el daño en los materiales es el proceso por el cual estos se terminan rompiendo. Por lo tanto, la mecánica del daño es el estudio de los mecanismos que revelan el deterioro de un material cuando se somete a una carga. En una microescala se entiende como los vacíos que se van generando en el interior del material sometido a una carga, mientras que en la macroescala se ve representado ya en el crecimiento de dichos vacíos o fisuras.

Para poder medir el daño de forma sencilla se crea la variable escalar D , la cual está acotada entre 0 y 1.

$$0 \leq D \leq 1$$

Esta medición mencionada implica que si el valor de D es 0 el material está no dañado, y si D vale 1 el material está totalmente dañado (elemento ya separado en dos partes). Es preciso señalar que generalmente la falla de materiales ocurre antes de que el valor del daño sea 1, por un proceso de inestabilidad o descohesión atómica; por esta razón se define un valor de daño crítico menor que 1 que representa el inicio de fractura.

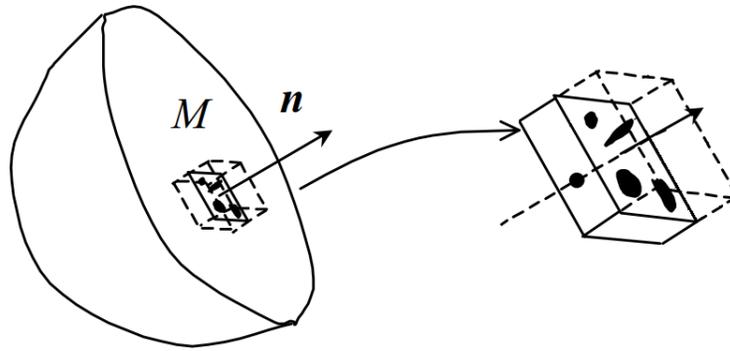


Figura 5: Representación del daño [13]

En la figura 5 mostrada arriba, se observa la representación de las microfisuras observables en la superficie de un material.

2.3.1 Mecanismos de daño

A pesar de que en la microescala es siempre el mismo mecanismo el que explica el daño de los materiales, en la escala macro existen varias formas diferentes en las que se manifiesta el daño, dependiendo del material, del tipo de carga y de la temperatura. Estos tipos de manifestaciones se proceden a detallar a continuación.

Daño frágil:

El daño se llama frágil cuando la fisura se inicia sin una cantidad apreciable de deformación plástica. Esto significa que las fuerzas no son suficientes para producir deslizamientos, pero son mayores que las fuerzas de despegue.

Daño dúctil:

El daño se denomina dúctil cuando ocurre simultáneamente con deformaciones plásticas mayores que un cierto umbral que normalmente es pasando el punto de mayores tensiones.

Daño por creep:

Este daño ocurre normalmente debido a la acción de altas temperaturas que normalmente son superiores al tercio de la temperatura de fusión del material. Esto hace que el material se pueda deformar a tensiones constantes. Al ser grandes las deformaciones se empiezan a generar vacíos dentro del material produciendo un daño.

Daño por fatiga de bajos ciclos:

Cuando un material es sometido a cargas cíclicas para valores altos de la tensión o de la deformación se comienzan a generar vacíos, y estos a su vez crecen con cada ciclo de carga o deformación. Debido a los altos valores de tensión, la fatiga de bajos ciclos está caracterizada por valores bajos del número de ciclos de ruptura.

Fatiga de altos ciclos:

Cuando se carga un material con valores bajos de tensión, las deformaciones plásticas permanecen pequeñas y son prácticamente despreciables. En este caso, el número de ciclos para producir la falla puede ser muy alto (Mayor de 100000).

2.3.2 Métodos de medición

En relación al daño en metales, se tienen los estudios titulados “Experimental techniques for ductile damage characterization” [1], “Identification of damage parameters for Ti-6Al-4V titanium alloy using continuum damage mechanics” [2], y “Practical applicability and limitations of the elastic modulus degradation technique for damage measurements in ductile metals” [3] que muestran una fórmula para calcular el daño en metales en función del módulo de elasticidad, en la que el daño va de 0 a 1, donde 0 equivale al primer módulo y 1 al módulo cuando ya el elemento no puede tomar más carga. La ecuación se presenta a continuación.

$$D = 1 - \frac{E_i}{E_0} \quad (\text{Ec. 1})$$

Los valores de E se van comparando para diferentes ciclos, tomando como E_0 el valor máximo del módulo de elasticidad inicial, y como valor E_i el módulo en cada punto de la curva.

Cabe destacar que el documento “Identification of damage parameters for Ti-6Al-4V titanium alloy using continuum damage mechanics” [2] utiliza la ecuación anterior para identificar parámetros de un modelo propuesto, es decir, la ecuación de daño en ciclos de carga ha sido utilizada como método de comparación de resultados para validar otro modelo.

Bonora en su publicación titulada “A nonlinear CMD model for ductile failure” [14] propone un método que requiere de cuatro parámetros para ser utilizado, estos son el daño crítico, la deformación donde el daño comienza a acumularse, la deformación de ruptura, y el exponente de daño α .

$$D_{Bonora} = D_0 + (D_{cr} - D_0) * \left(1 - \left(1 - \frac{\ln(\varepsilon/\varepsilon_{th})}{\ln(\varepsilon^f/\varepsilon_{th})} \right)^\alpha \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

El exponente de daño otorga el grado de no linealidad de la ley de evolución de daño en función de la deformación plástica.

A continuación, se muestra una figura ejemplificadora de tres diferentes formas de acumulación de daño de las cuales habla Bonora en su publicación [14].

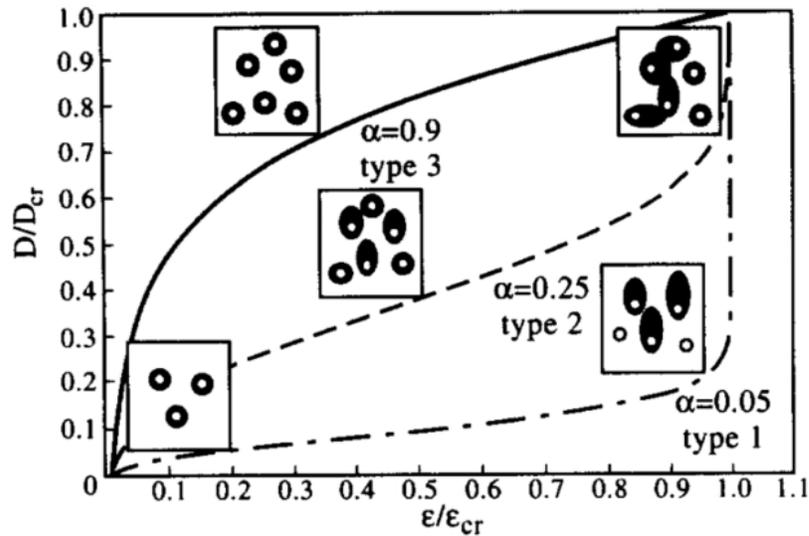


Figura 6: Representación del daño según Bonora [14]

Como se ve en la figura anterior hay tres casos, el primero (tipo 1) muestra un caso de un metal que tiene pocos vacíos en su sección transversal y a medida que la deformación aumenta, este también aumenta los vacíos, cosa que se traduce en una lenta y lineal acumulación de daño. Ya cuando la deformación se acerca a la deformación crítica estos vacíos que son más grandes comienzan a unirse, desgarrando el material y reduciendo rápidamente su sección de resistencia provocando su ruptura.

El tercer caso (tipo 3) se caracteriza por una gran cantidad de pequeños huecos que se nuclean. Cuando aumenta la tensión, la dimensión del vacío existente permanece casi constante mientras se nuclean más vacíos nuevos. Como se ve en la figura, crece rápidamente el daño producto de esos muchos vacíos, los cuales luego permanecen constantes. Una vez que el proceso se empieza a saturar por el poco espacio disponible para crear nuevos vacíos, estos provocan la ruptura repentina del material.

Finalmente, la acumulación de daño tipo 2 muestra un material que cuando inicia el daño se crean pocos vacíos, con los cuales se incrementan de tamaño al ser sometido el material a deformación, junto con otros vacíos que se van generando en el proceso. Como es costumbre, cuando se llegan a propagar los vacíos y se unen concluyen con la fractura del material.

Otra ecuación distinta de daño se aplica en el documento de nombre "Energy method for experimental life prediction of central core" [5], donde se estudian cables dañados (con hebras rotas), y se muestra un nivel de daño en función del porcentaje de hebras que aun trabajan en el cable tomando como parámetro la energía necesaria para ir fracturándole hebras. La ecuación usada es la siguiente.

$$D = \frac{U_{ur}(\beta) - U_u(0)}{U_a(1) - U_u(0)} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

β : número de hebras rotas dividido en la cantidad total de hebras del cable.

U_{ur} : valor de la energía final residual.

U_a : energía justo antes de romperse la hebra en cuestión.

U_u : valor de energía final residual de la hebra central sin daño.

El problema con esta ecuación es que no aclara la geometría del daño, por lo que no diferencia daño para cables con hebras fracturadas de forma simétrica o asimétrica, cosa que tiene influencia al momento de entender el daño del cable.

En el documento de nombre “Tensile damage evolution and notch sensitivity of Al₂O₃ fiber-ZrO₂ matrix minicomposite-reinforced Al₂O₃ matrix composites” [9] se muestra una forma de encontrar el daño de un material a partir de la variación del módulo tangente sin necesidad de un ciclo de carga, pues a la ecuación usada anteriormente que considera ciclos le añade una corrección a partir de energía. La ecuación utilizada en este estudio es la que se presenta a continuación.

$$D = \left(1 - \frac{(d\sigma_c/d\varepsilon_c)_i}{(d\sigma_c/d\varepsilon_c)_0}\right) * \left(\frac{U_{p,i}}{U_p^*}\right) \quad (\text{Ec. 4})$$

De la ecuación se puede observar que el término encerrado en el primer paréntesis corresponde al mostrado en la primera ecuación de daño, ya que la derivada de la tensión en la deformación es el módulo tangente del compuesto, E_c , donde el numerador es el módulo variable y el denominador es el módulo inicial. Pero a diferencia de la fórmula anterior esta tiene un factor corrector que considera las energías para poder comparar el módulo de elasticidad dentro de un mismo ciclo y así obtener el valor del daño.

Los valores $U_{p,i}$ y U_p^* son respectivamente el valor de la energía inelástica acumulada en cada momento y el valor de la energía inelástica acumulada en el momento en que el elemento ensayado llega a la tensión máxima que puede soportar. En la figura 7 se muestra detalladamente los componentes de la ecuación.

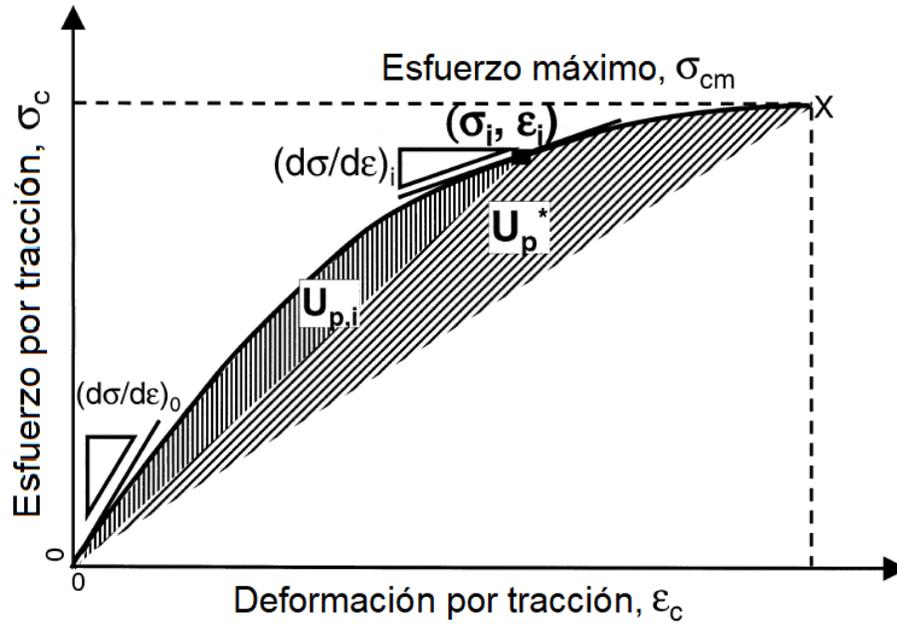


Figura 7: Componentes de la ecuación de daño [9]

Como se aprecia en la figura 7, las energías se calculan como las integrales de las curvas menos el triángulo que forma la recta desde el origen hasta el punto en cada instante o hasta que la curva se aplanea.

La forma matemática de ingresar los valores de las energías es:

$$U_{p,i} = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_c * d\varepsilon_c - \frac{1}{2} * \sigma_i * \varepsilon_i \quad (\text{Ec. 5})$$

$$U_p^* = \int_0^{\varepsilon_{cm}} \sigma_c * d\varepsilon_c - \frac{1}{2} * \sigma_{cm} * \varepsilon_{cm} \quad (\text{Ec. 6})$$

Al ser una ecuación que toma como parámetros el módulo tangente de Young y la energía en el punto de máxima tensión, es normal que los valores finales de la ecuación lleguen hasta 1 o hasta valores muy cercanos, dado que el punto donde las curvas de tensión-deformación llegan a la máxima tensión, el módulo tangente se hace cero y los valores de $U_{p,i}$ y U_p^* se igualan.

Con esto se cuenta con una ecuación para determinar el daño de un ensayo de tracción sin necesidad de hacer ciclos, solo llevando el ensayo hasta el punto de fractura del material estudiado.

La ecuación de daño corregido por energía es mencionada también en el documento “Damage evolution and damage tolerance in ceramic matrix composites: empirical measurements and analytical/numerical modeling” [10], donde se le compara con la expresión sin la corrección que se usa para ensayos ciclicos, aplicada a una curva no cíclica de tensión-deformación. Lo expresado en el documento muestra que la forma en

que se acumula el daño es mejor representada por la ecuación corregida, ya que la curva de daño se parece más a la de ensayos cíclicos.

En el paper titulado “Computational and numerical analysis of ductile damage evolution under a load-unload tensile test in dual-phase steel” [11] se muestran ensayos cíclicos hechos a un acero y el posterior cálculo del daño. El gráfico del ensayo cíclico se presenta a continuación.

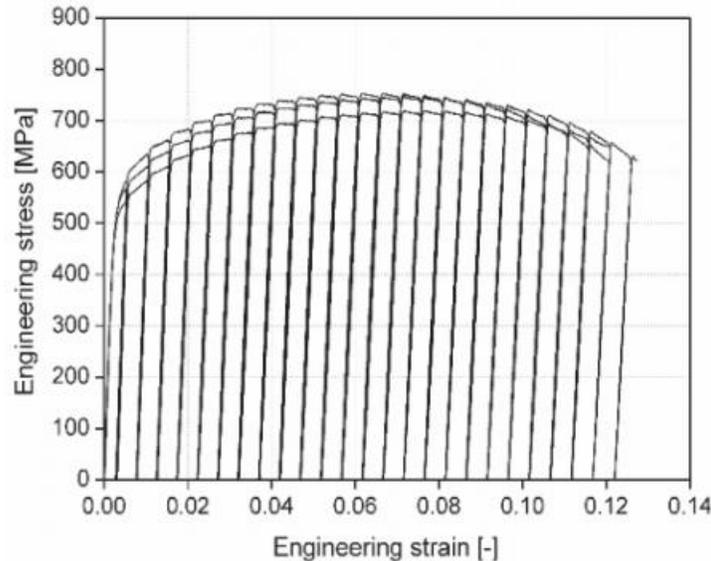


Figura 8: Ciclo carga descarga [11]

Como se aprecia en el gráfico, es común que el módulo de elasticidad no varíe tanto en los ensayos cíclicos, es por ello que los valores de daño tienden a no verse mayores que 0.2 en los gráficos.

El trabajo titulado “On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model” [12] Se muestra una forma diferente de calcular el daño. Basado en las formas anteriores del cálculo de daño a ensayos cíclicos, se toma un daño crítico, y se calcula un nuevo daño como una proporción de ese daño crítico en función de la deformación.

Con lo usado en el trabajo de Bonora [12], se puede llegar a trabajar con datos que se acercan a los daños que muestran los ensayos cíclicos, usando proporciones y coeficientes representativos del material para determinar su daño.

Según el libro “Engineering Damage Mechanics Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures” de Lemaitre y Desmorat [15], el daño se calcula con la fórmula:

$$D = D_{cr} * \left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{pD}}{\varepsilon_{pR} - \varepsilon_{pD}} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

En el caso del daño crítico, el mismo libro dice que se puede calcular simplifícadamente de la forma:

$$D_{cr} = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u} \quad (\text{Ec. 8})$$

Se adjunta un ejemplo gráfico que es parte del libro para facilitar el entendimiento.

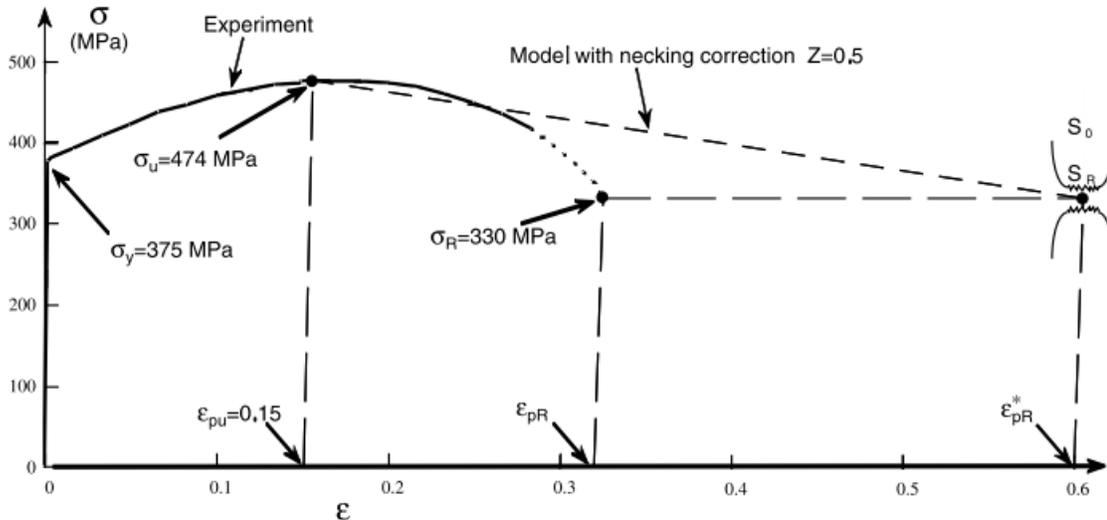


Figura 9: Ejemplo para identificación de parámetros de Lemaitre & Desmorat [15]

El método que se propone en este libro indica que la curva experimental se debe corregir mediante este parámetro Z que representa el adelgazamiento.

$$Z = \frac{S_0 - S_R}{S_0} \quad (\text{Ec. 9})$$

En la ecuación 9, S_0 representa la superficie transversal del material al inicio del ensayo, mientras que S_R es la superficie luego de que el material sufrió la ruptura. Este proceso se debe realizar debido a la dificultad de medir correctamente previo a la ruptura, o si el ensayo no se terminó de realizar correctamente hasta la ruptura.

Conociendo el parámetro Z se encuentra el término ϵ_{pR}^* con la fórmula:

$$\epsilon_{pR}^* = 2 * (1 - \sqrt{1 - Z}) \quad (\text{Ec. 10})$$

Luego se encuentra el valor de σ_R trazando una recta desde el punto de tensión máxima con una pendiente:

$$m = - \frac{\sigma_u - \sigma_y}{\epsilon_{pu}} * Z \quad (\text{Ec. 11})$$

Finalmente

$$\sigma_R = \sigma_u - m * (\varepsilon_{pR}^* - \varepsilon_{pu}) \quad (\text{Ec. 12})$$

Ya solo faltaría extender la curva del ensayo para intersectarla con σ_R y así obtener como resultado ε_{pR} y con ello todos los parámetros necesarios para poder calcular el daño de un material según este método de Lemaitre.

Se puede observar la simplicidad para utilizar este método dado que solo se necesita la curva monótonica de un ensayo de tracción además de las mediciones de la superficie al momento del inicio y ruptura del material.

Lo otro que se destaca en este método es la aseveración fuerte de que el daño parte desde donde el material llega a la tensión máxima que puede soportar y no antes, como se revela en mediciones de ensayos cíclicos. Esta afirmación la comparte también Celentano y Chaboche en el documento “Experimental and numerical characterization of damage evolution in steels” [16] donde mencionan que la forma de fallar en ambos casos es diferente, es por ello que se deben utilizar diferentes fórmulas de cálculo y se deben tratar e interpretar de manera distinta.

Se debe tener claro que para todo efecto, el daño crítico debe considerarse el mismo, dado que representa la cantidad de vacíos con los que el material se rompe.

3 MEDICIONES DE DAÑO A USAR

En esta sección se compara una metodología de medición existente en la bibliografía con un método de medición propuesto para la acumulación de daño. Para este efecto se utilizan unos datos conocidos de aluminio y acero obtenidos de algunas publicaciones.

3.1 Método de Lemaitre & Desmorat

Se ha adoptado el método de Lemaitre & Desmorat como el método a usar en el cálculo del daño en cables debido a que es un método simple y documentado para calcular daño en ensayos de tracción de manera desacoplada.

Con el método mencionado se estudia la evolución de daño de tres aluminios tomados del documento “Damage characterization of four wrought aluminum alloys” [17] y de un acero tomado del documento “Computational and numerical analysis of ductile damage evolution under a load-unload tensile test in dual-phase steel” [11]. Estos documentos tienen sus propias mediciones de daño calculados a partir de ensayos cíclicos, los cuales se utilizan para comparar resultados.

Aluminio 7075-T6:

Se comienza mostrando la curva de daño del material que registra el paper asociado [17] a partir de ensayos cíclicos.

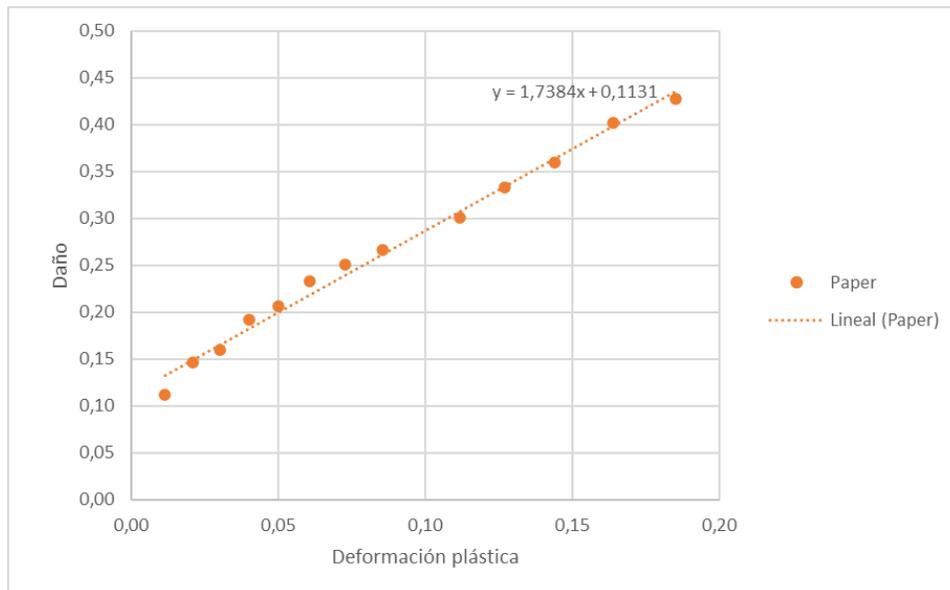


Figura 10: Gráfico de daño Aluminio 7075-T6 según paper [17]

La figura anterior puede guiar para crear la función de daño según el método de Lemaitre & Desmorat, brindando los parámetros necesarios para realizar dicha función.

Primeramente, se obtiene el daño crítico, con lo cual, teniendo la información de la curva tensión-deformación se puede obtener la tensión de ruptura, la deformación de ruptura y el parámetro Z. Ya con todo esto se procede a graficar la curva extendida del material como se muestra en la figura a continuación.

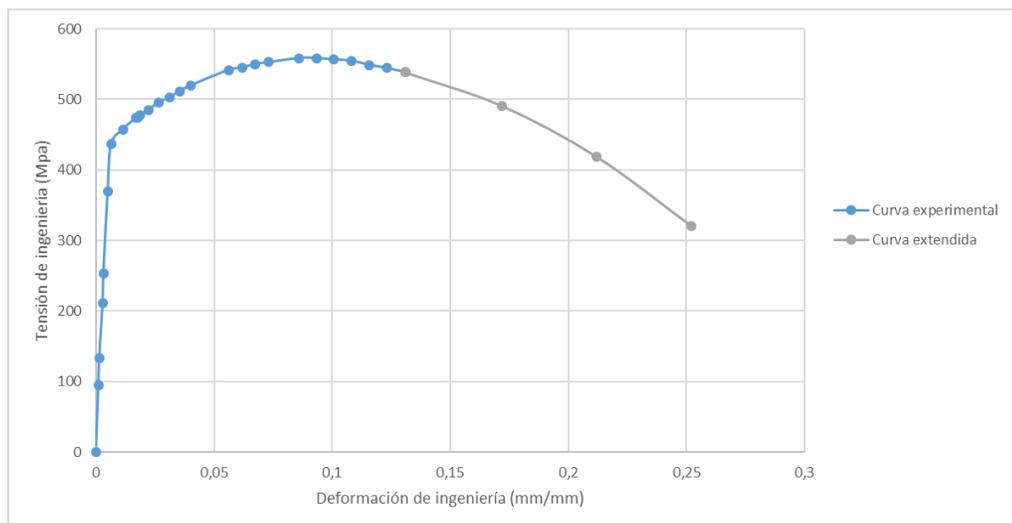


Figura 11: Gráfico tensión-deformación extendido Aluminio 7075-T6

Además, se puede ya realizar la curva de daño con los datos conocidos.

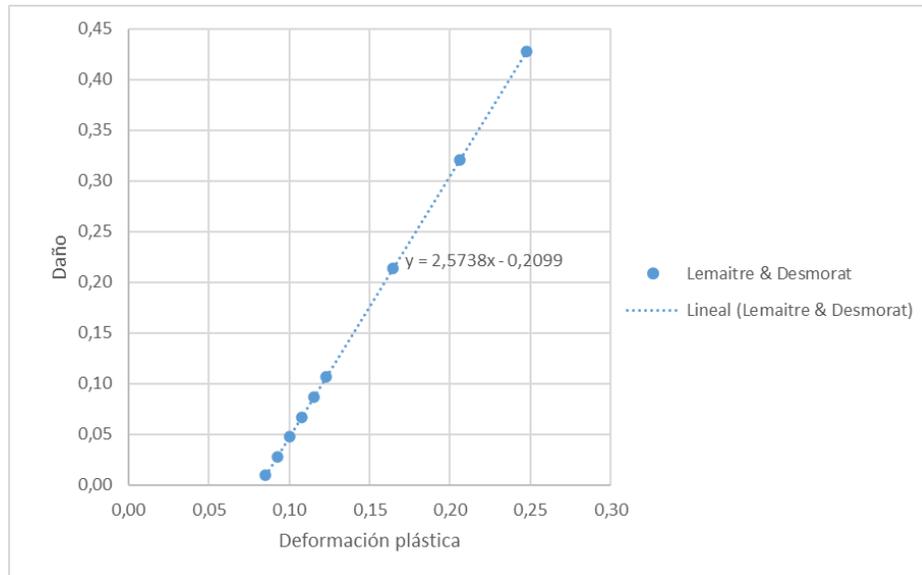


Figura 12: Daño de Aluminio 7075-T6 según Lemaitre & Desmorat

Ahora con la función de daño calculado según la metodología de esta sección, se procede a comparar con la ley de acumulación de daño presentado en el documento del que fueron tomados los datos.

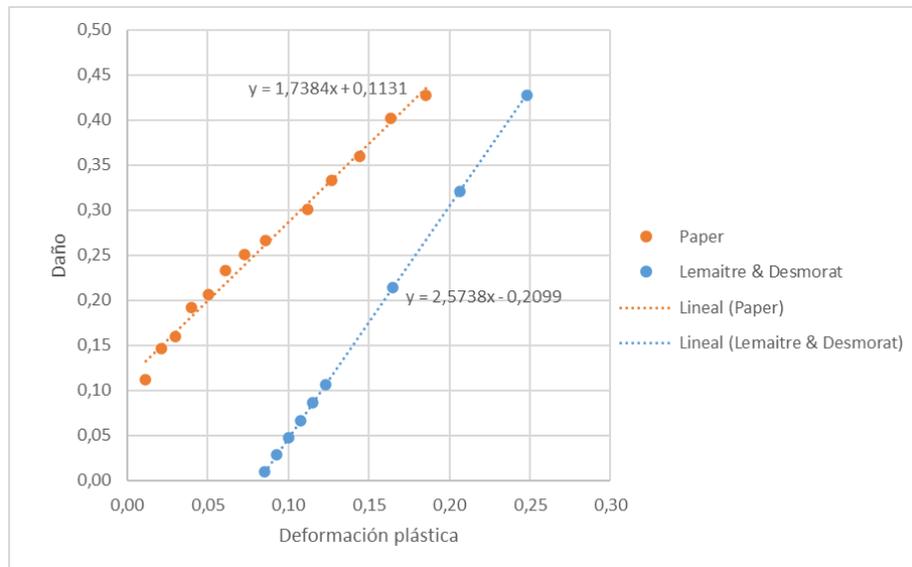


Figura 13: Comparación de daños para Aluminio 7075-T6

De la comparación de la figura anterior se destaca que ambos llegan al mismo daño crítico, ya que la función azul fue creada para eso, pero se ven diferencias en las deformaciones que producen los inicios del daño y las deformaciones que definen el daño crítico. Lo anteriormente mencionado tiene sentido al leer lo que dice Celentano & Chaboche en su trabajo [16] donde mencionan que el daño por ciclos y el daño por

ensayo de tracción son diferentes, dado que para un ensayo de tracción un material presenta daño casi nulo antes de que la pendiente del gráfico sea negativa.

Aluminio 2024-T851:

Este segundo aluminio se trata de la misma manera que el anterior, presentando inicialmente el gráfico de daño dado por el paper en la figura a continuación.

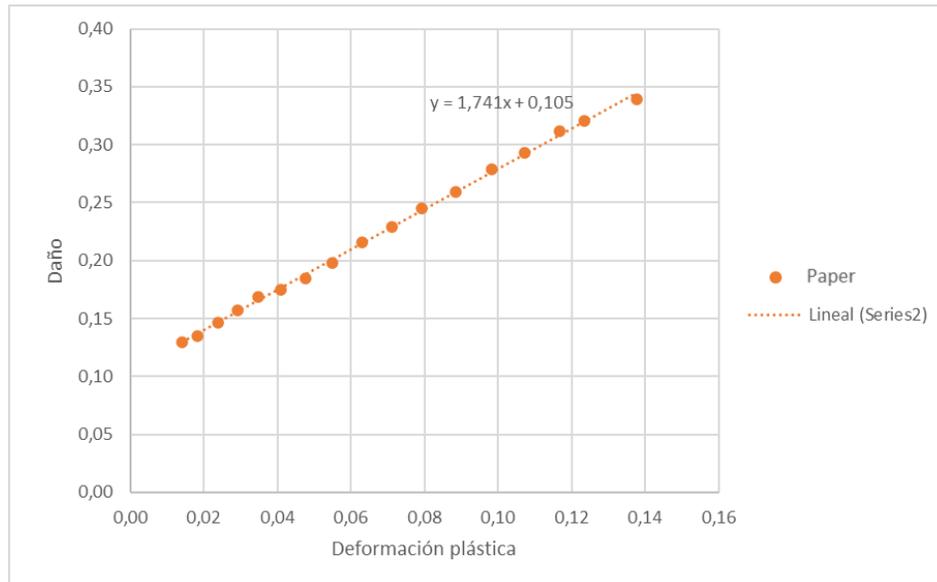


Figura 14: Gráfico de daño Aluminio 2024-T851 según paper [17]

Se trabajan los datos de la misma manera para obtener la curva extendida del material y luego la función de daño.

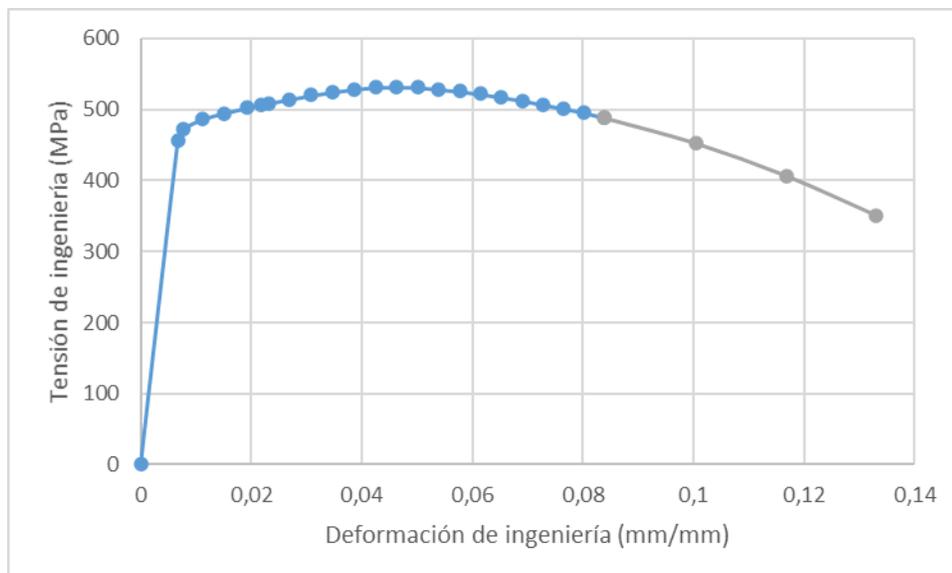


Figura 15: Gráfico tensión-deformación extendido Aluminio 2024-T851

A continuación, se presenta el gráfico de daño según el método de Lemaitre & Desmorat.

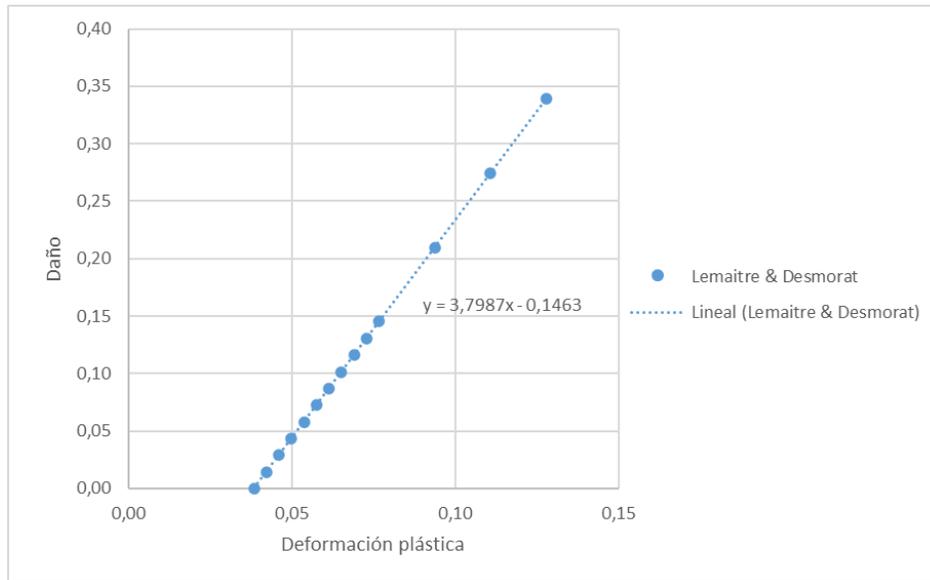


Figura 16: Daño de Aluminio 2024-T851 según Lemaitre & Desmorat

Con los datos de daño calculado se procede a comparar con el gráfico mostrado en el paper.

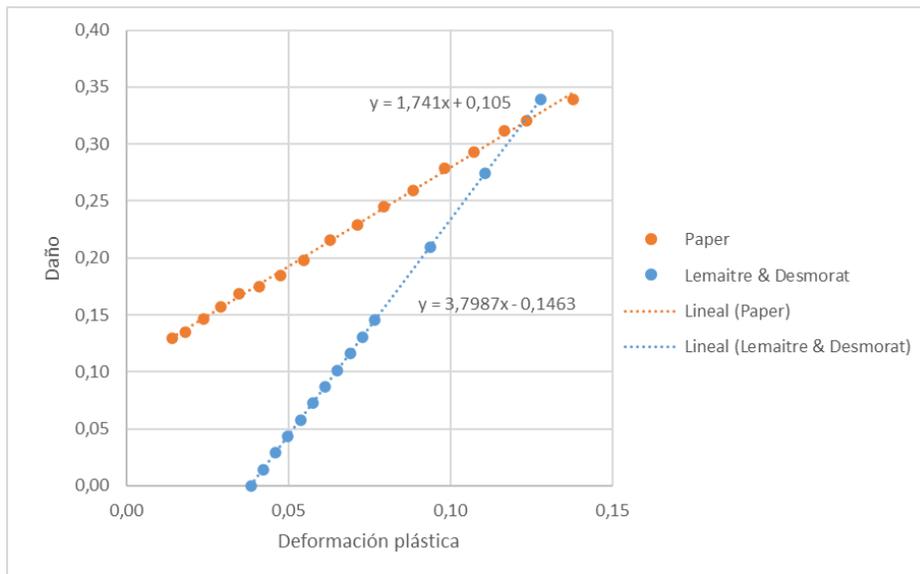


Figura 17: Comparación de daños para Aluminio 2024-T851

Para este caso se observan las mismas similitudes y diferencias que para el caso anterior ya que los daños críticos son iguales, pero no lo son las deformaciones que implican el inicio del daño ni el final.

Aluminio 6061-T651:

El tercer y último aluminio se trata de la misma manera que el primero y segundo, presentando inicialmente el gráfico de daño dado por el paper en la figura a continuación.

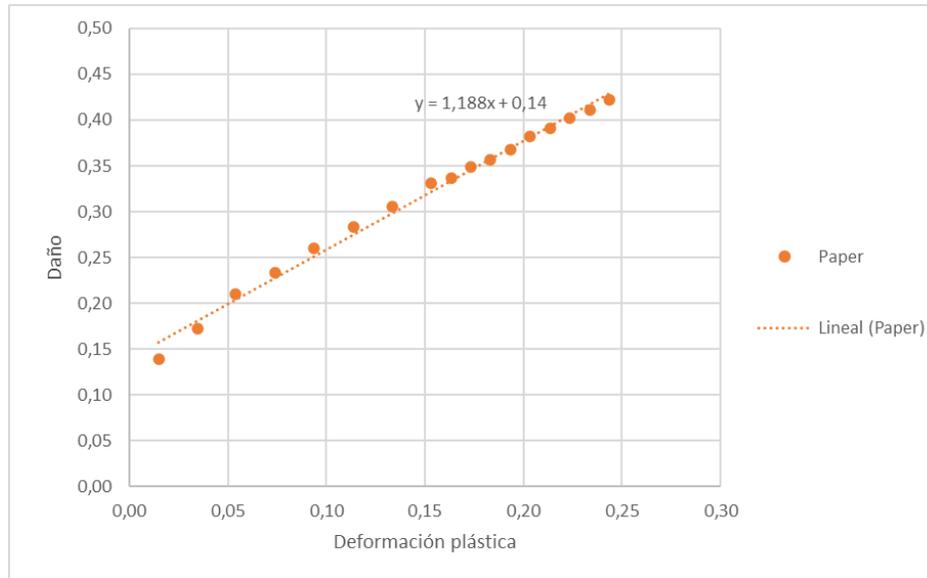


Figura 18: Gráfico de daño Aluminio 6061-T651 según paper [17]

Se trabajan los datos de la misma manera para obtener la curva extendida del material y luego la función de daño.

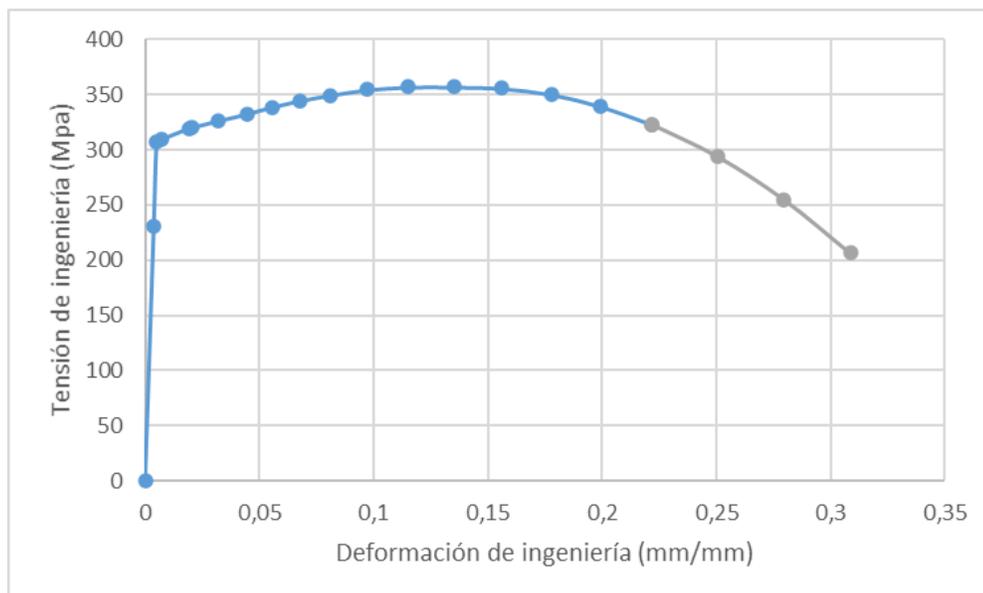


Figura 19: Gráfico tensión-deformación extendido Aluminio 6061-T651

En la siguiente figura se presenta el gráfico de daño según el método de Lemaitre & Desmorat.

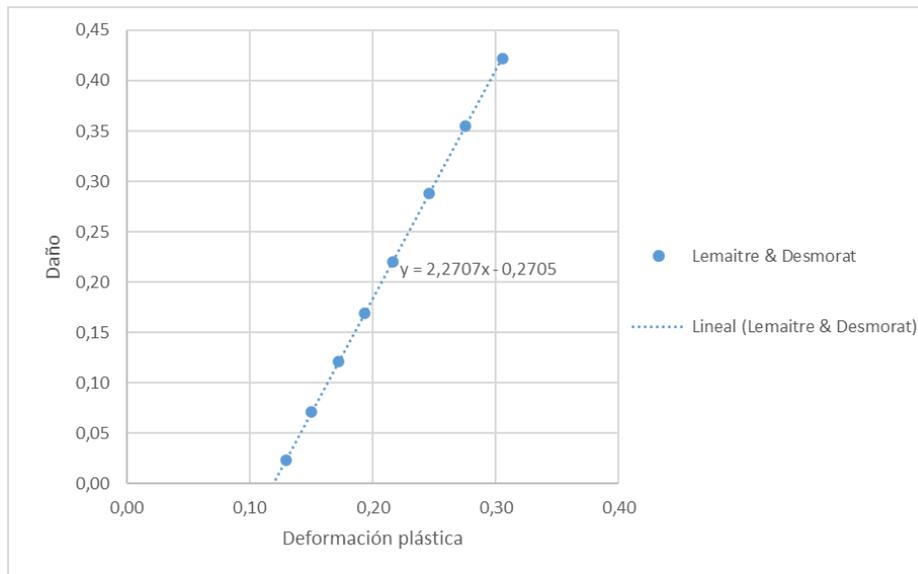


Figura 20: Daño de Aluminio 6061-T651 según Lemaitre & Desmorat

Con los datos de daño calculado se procede a comparar con el gráfico mostrado en el paper.

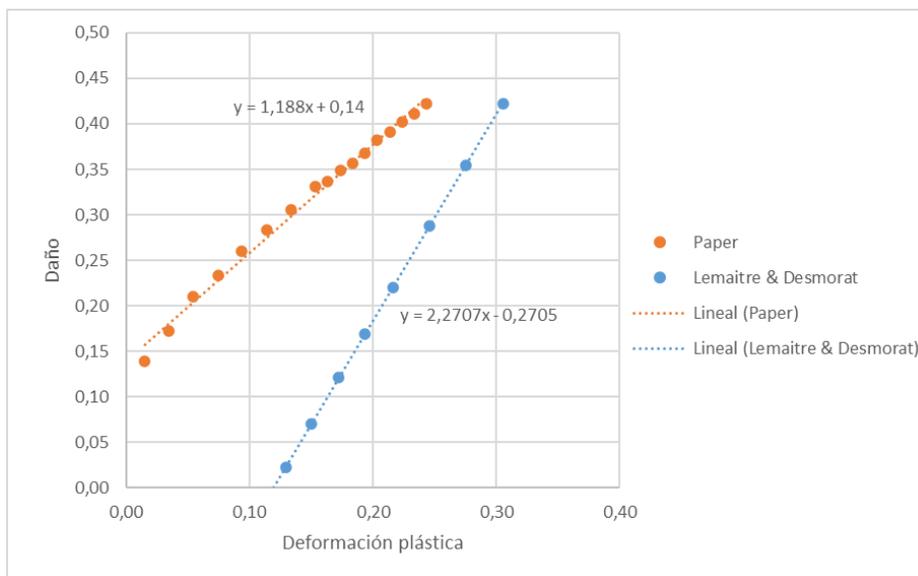


Figura 21: Comparación de daños para Aluminio 6061-T651

Para este caso se observan las mismas similitudes y diferencias que para ambos casos anteriores ya que los daños críticos son iguales, pero no lo son las deformaciones que implican el inicio del daño ni el final.

Acero DP 590:

Para el caso del acero se estudia los datos obtenidos del documento “Computational and numerical analysis of ductile damage evolution under a load-unload tensile test in dual-

phase steel” [11]. Con estos datos se muestra en principio el daño calculado por ensayos cíclicos y se grafica a continuación.

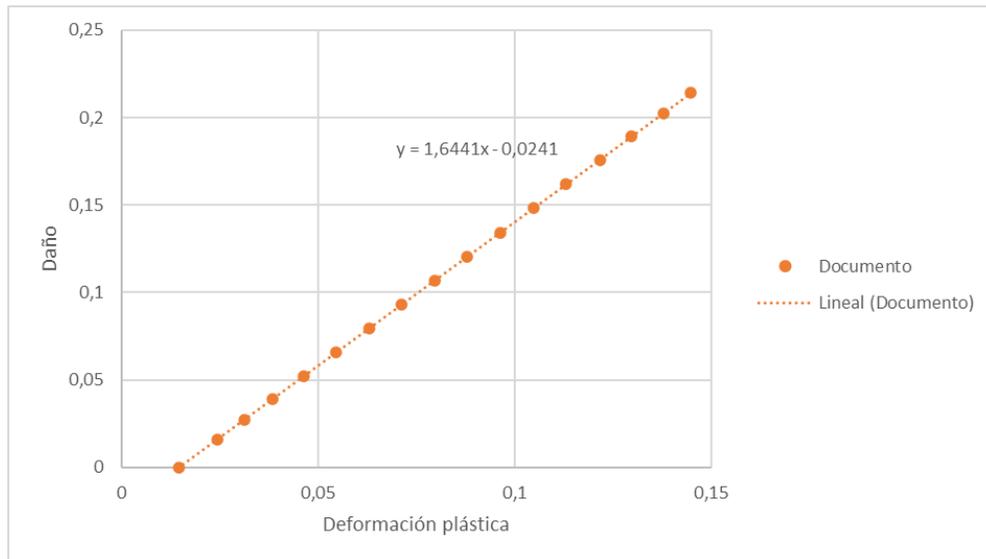


Figura 22: Gráfico de daño Acero DP 590 según documento [11]

Se trabajan los datos de la misma manera que con los aluminios para obtener la curva extendida del material y luego la función de daño.

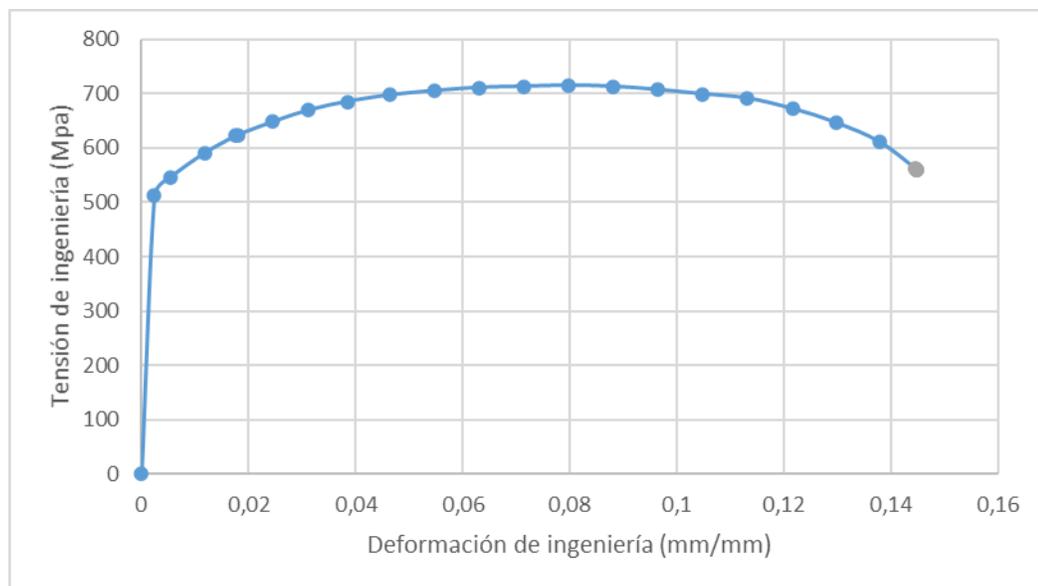


Figura 23: Gráfico tensión-deformación extendido Acero DP 590

Se destaca que para este caso la curva se ha tenido que extender mucho menos de lo que se hace para los casos anteriores de aluminios.

A continuación, se presenta el gráfico de daño según el método de Lemaitre & Desmorat

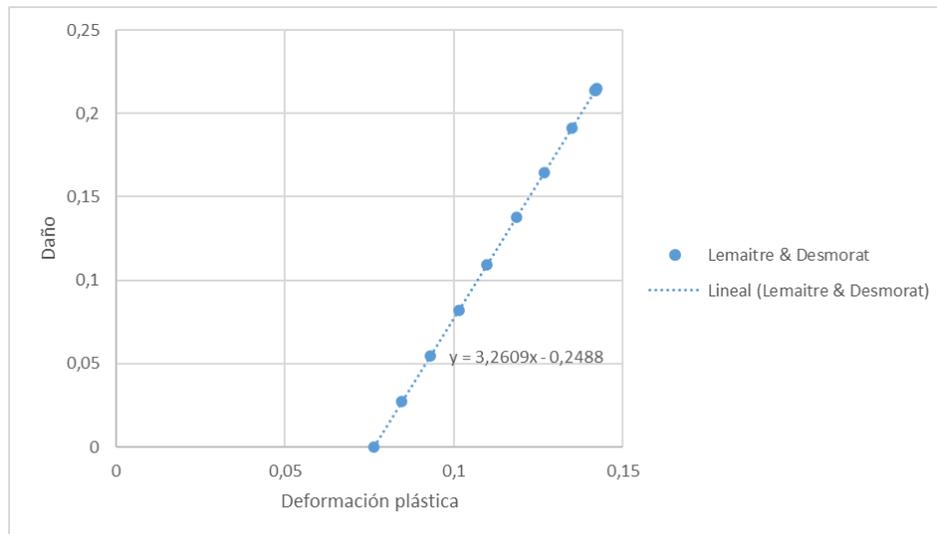


Figura 24: Daño de Acero DP 590 según Lemaitre & Desmorat

Con los datos de daño calculado se procede a comparar con el gráfico mostrado en el paper.

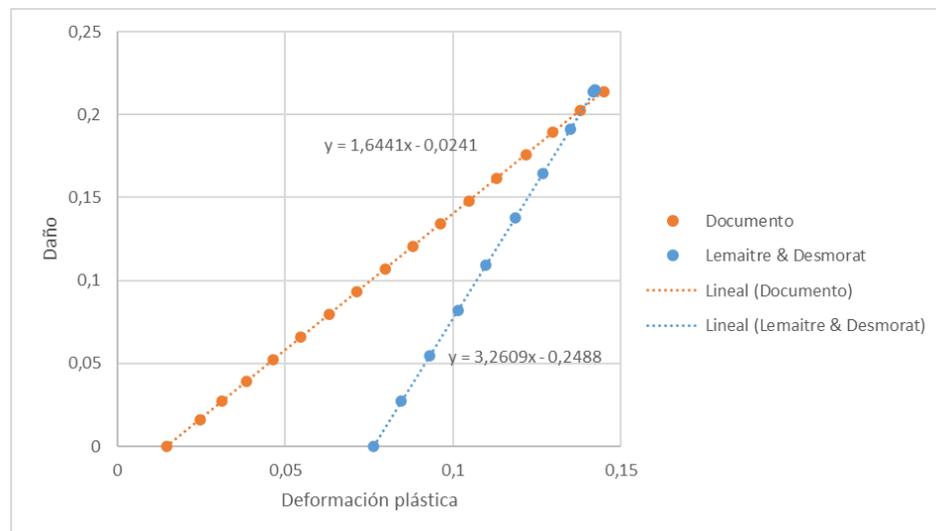


Figura 25: Comparación de daños para Acero DP 590

Al igual que en el caso de aluminios, se observan las mismas similitudes y diferencias. También los daños críticos son iguales, pero no las deformaciones iniciales. Cabe destacar que las deformaciones que llevan al material al daño crítico son similares en este caso.

3.2 Método propuesto

Con base en la ecuación 1, se propone usar una curva sin daño tipo Ramberg-Osgood para comparar con la curva experimental y hacer así una ley de daño basada en el cociente entre módulos secantes.

La curva sin daño debe cumplir con la ecuación:

$$\sigma_{R-O} = K * \varepsilon^n \quad (\text{Ec. 13})$$

En esta ecuación K representa un coeficiente de fuerza y n representa el comportamiento de endurecimiento por trabajo del material. Para conocer dichos parámetros se deben conocer dos puntos de la curva experimental donde se sepa que el material no está dañado. Luego se traza esta curva desde donde se cruza con la experimental para que vaya existiendo desde ahí una separación entre la curva teóricamente no dañada y la experimental.

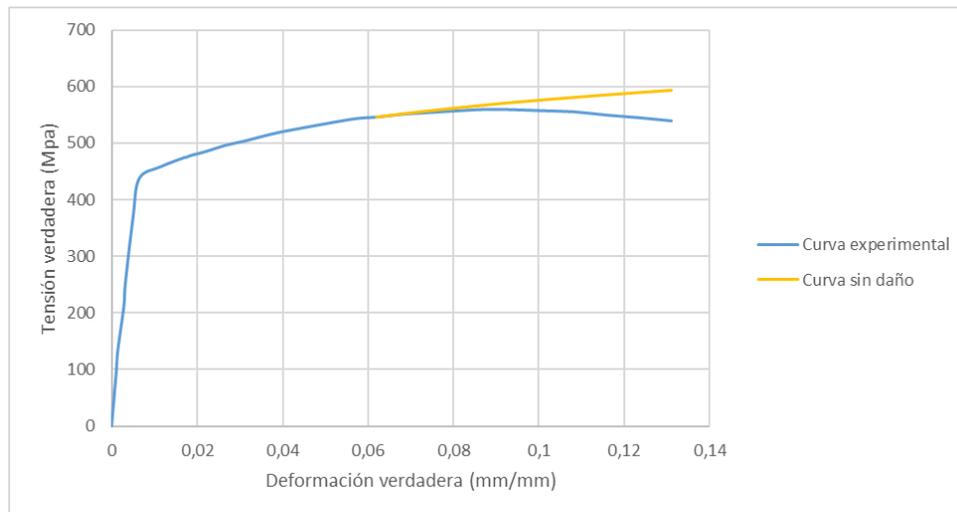


Figura 26: Ejemplo método propuesto

Con esta nueva curva se aplica la fórmula de cocientes de módulos secantes:

$$D = 1 - \frac{E_{sec,exp}}{E_{sec,R-O}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_{exp}/\varepsilon}{\sigma_{R-O}/\varepsilon} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_{exp}}{\sigma_{R-O}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Con esta ecuación se puede calcular el daño de un elemento para cada deformación solo teniendo los datos de una curva tensión-deformación.

3.3 Validación propuesta

Para validar la propuesta se procede a comparar el método con el de Lemaitre & Desmorat que es un método preciso de medición. Se ha utilizado en este caso los mismos materiales expuestos en el punto 3.1 para hacer la comparación de leyes de acumulación de daño.

Aluminio 7075-T6:

A partir de la figura 11 se crea una curva propuesta sin daño que proviene del gráfico original y que sale tangente a este, de acuerdo a lo planteado en el punto 3.2. De esta manera los parámetros para aplicar el método propuesto son los siguientes.

Tabla 2: Parámetros curva sin daño Aluminio 7075-T6

K (MPa)	n
748,94	0,11415

Quedando el gráfico de la siguiente manera:

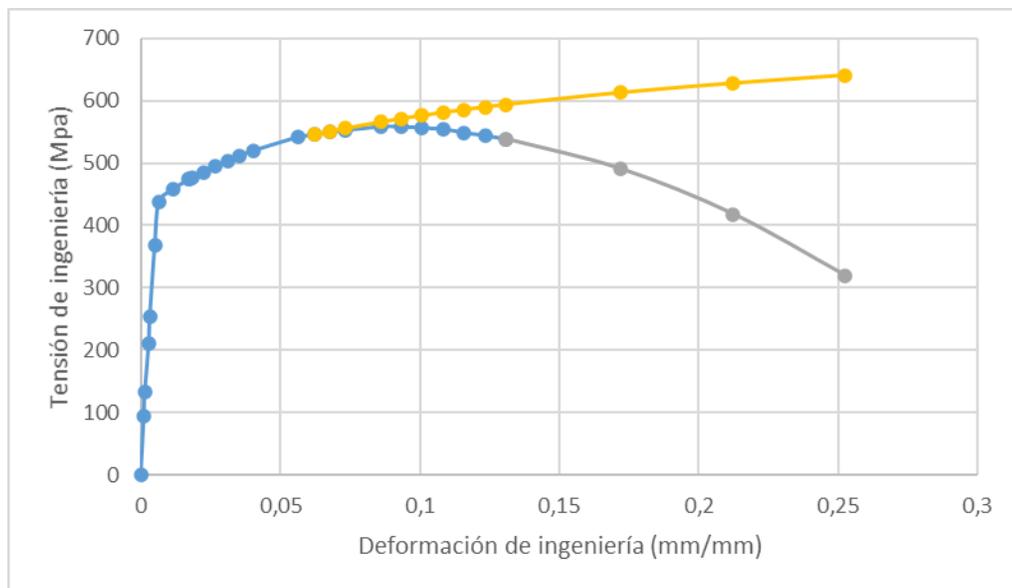


Figura 27: Gráfico propuesto de Aluminio 7075-T6 para método sin daño

Donde la curva amarilla es la propuesta sin daño.

A partir de los resultados, se calcula la acumulación de daño según el método propuesto dada la ecuación 16. Esto es graficado a continuación.

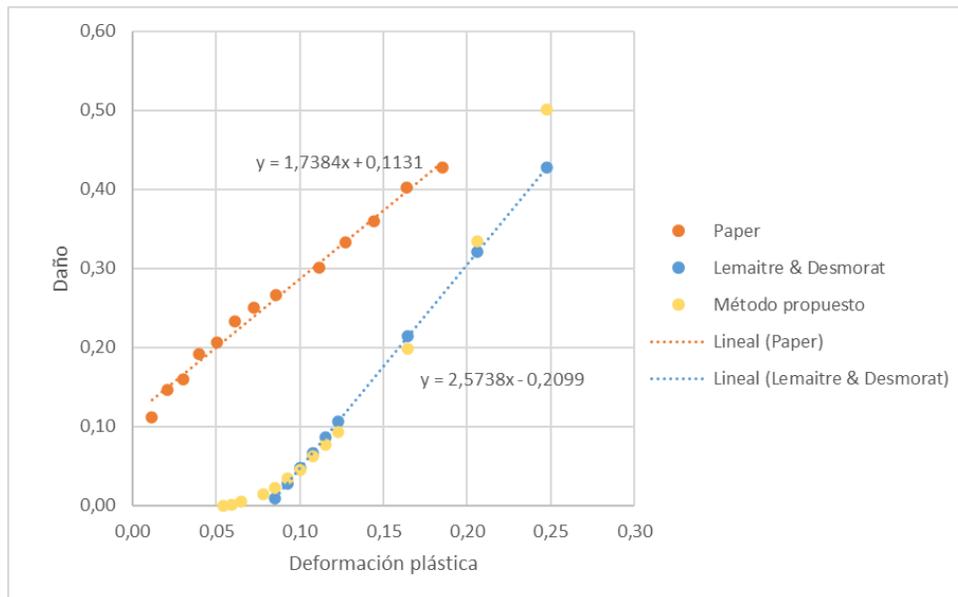


Figura 28: Comparación de métodos de cálculo de daño para Aluminio 7075-T6

Se observa en este caso que el método propuesto aproxima bastante bien los valores de daño luego de que este se inicia. Así también se puede destacar que antes de que inicie el daño según Lemaitre & Desmorat, ya existe un poco de daño, pero es casi nulo y despreciable, tal como mencionan en su trabajo Celentano & Chaboche [16]. La principal diferencia del método propuesto es que no estima bien el daño crítico, llegando al final de la curva con un daño considerablemente mayor al expuesto en el documento del que fueron tomados los datos y por ende también mayor al mostrado según método de Lemaitre & Desmorat.

Aluminio 2024-T851:

Al igual que en el caso anterior, se crea una curva propuesta sin daño a partir de la figura 15 que proviene del gráfico original y que sale tangente a este, de acuerdo a lo planteado en el punto 3.2. De esta manera los parámetros para aplicar el método propuesto son los siguientes.

Tabla 3: Parámetros curva sin daño Aluminio 2024-T851

K (MPa)	n
685,657	0,07636

Quedando el gráfico de la siguiente manera:

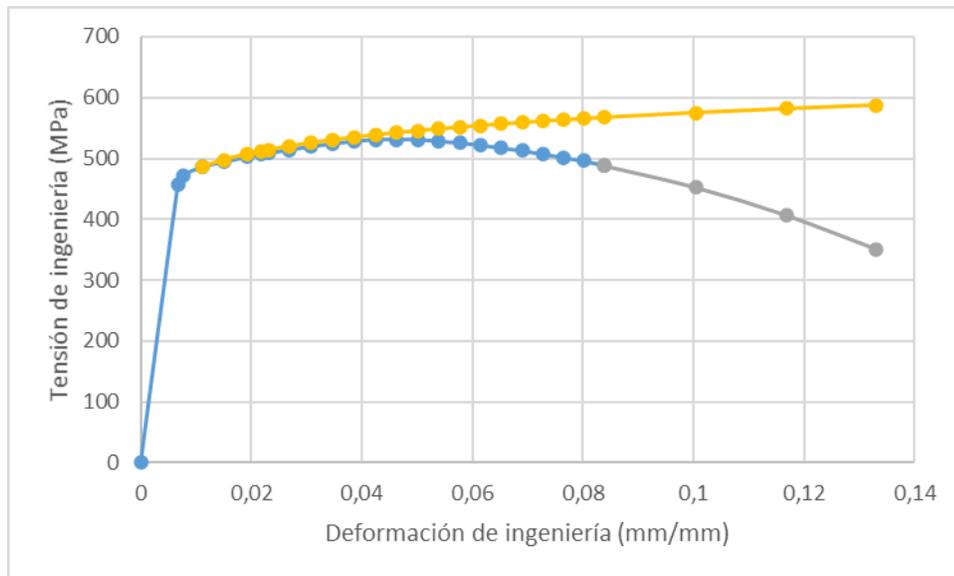


Figura 29: Gráfico propuesto de Aluminio 2024-T851 para método sin daño

Donde la curva amarilla es la propuesta sin daño.

De acuerdo a los resultados, se calcula la acumulación de daño según el método propuesto dada la ecuación 16. Esto es graficado a continuación.

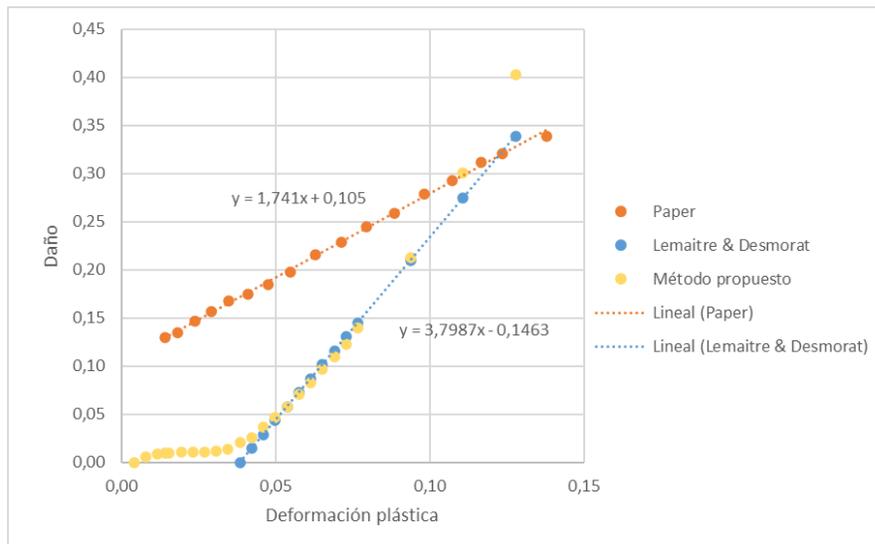


Figura 30: Comparación de métodos de cálculo de daño para Aluminio 2024-T851

En este caso se observan las mismas similitudes y diferencias que en el caso anterior entre el método propuesto y el mencionado por Lemaitre & Desmorat en su libro [15].

Aluminio 6061-T651:

Como en los casos anteriores, a partir de la figura 19 se crea una curva propuesta sin daño que proviene del gráfico original y que sale tangente a este, de acuerdo a lo planteado en el punto 3.2. De esta manera los parámetros para aplicar el método propuesto son los siguientes.

Tabla 4: Parámetros curva sin daño Aluminio 6061-T651

K (MPa)	n
420,798	0,07457

Quedando el gráfico de la siguiente manera:

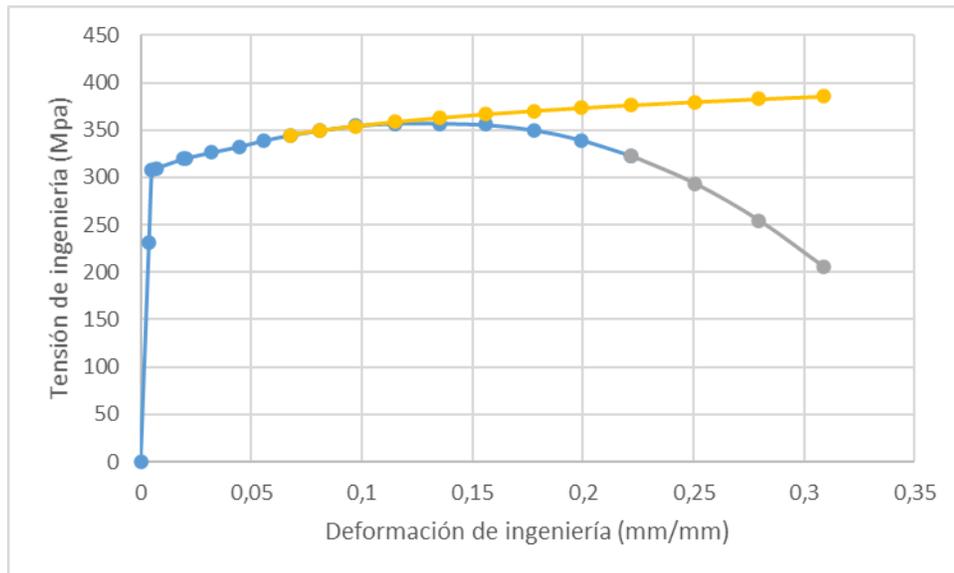


Figura 31: Gráfico propuesto de Aluminio 6061-T651 para método sin daño

Donde la curva amarilla es la propuesta sin daño.

A partir de los resultados, se calcula la acumulación de daño según el método propuesto dada la ecuación 16. Lo cual se grafica en la siguiente figura.

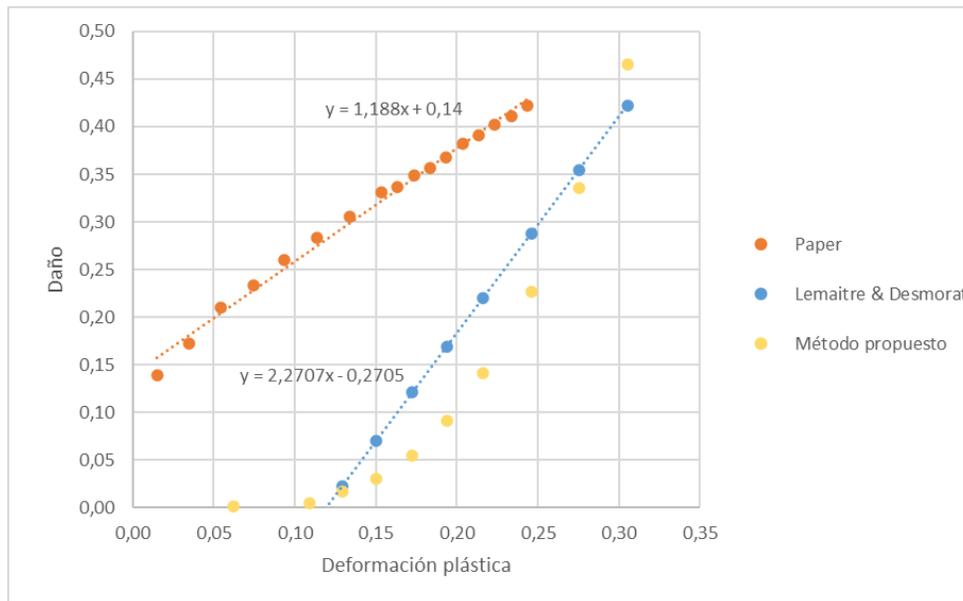


Figura 32: Comparación de métodos de cálculo de daño para Aluminio 6061-T651

A diferencia de los otros aluminios, este aluminio muestra que el gráfico con el método propuesto es bastante lejano al daño que se obtiene mediante el método de Lemaitre & Desmorat, solo siendo similar en el punto donde se empieza a hacer considerable la acumulación de daño.

Acero DP 590:

Para el caso del acero DP 590, al igual que para los aluminios, se crea una curva propuesta sin daño que proviene del gráfico original en la figura 23 y que sale tangente a este, de acuerdo a lo planteado en el punto 3.2. De esta manera los parámetros para aplicar el método propuesto son los siguientes.

Tabla 5: Parámetros curva sin daño Aluminio 7075-T6

K (MPa)	n
999,041	0,1171

Quedando el gráfico de la siguiente manera:

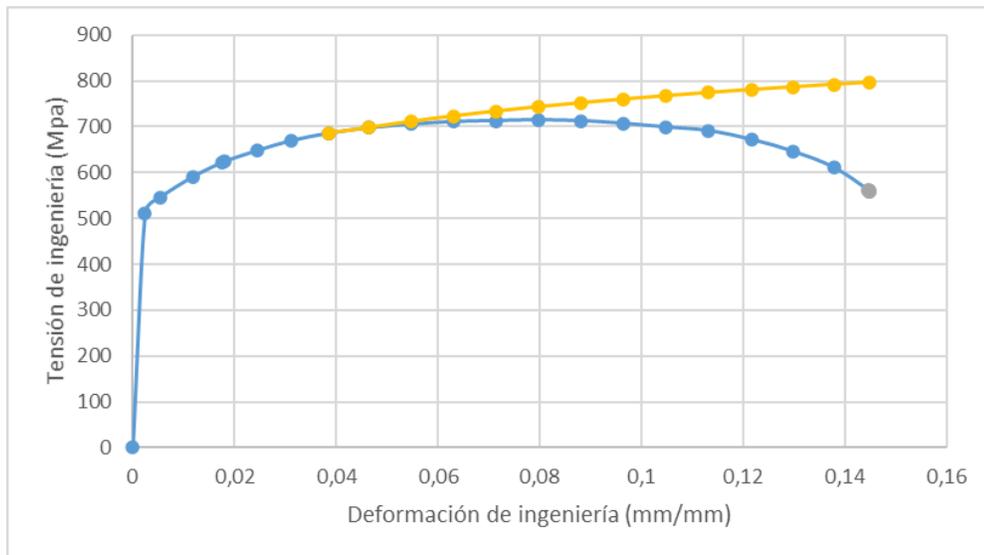


Figura 33: Gráfico propuesto de Acero DP 590 para método sin daño

Donde la curva amarilla es la propuesta sin daño.

A partir de los resultados, se calcula la acumulación de daño según el método propuesto dada la ecuación 16. Esto es graficado a continuación.

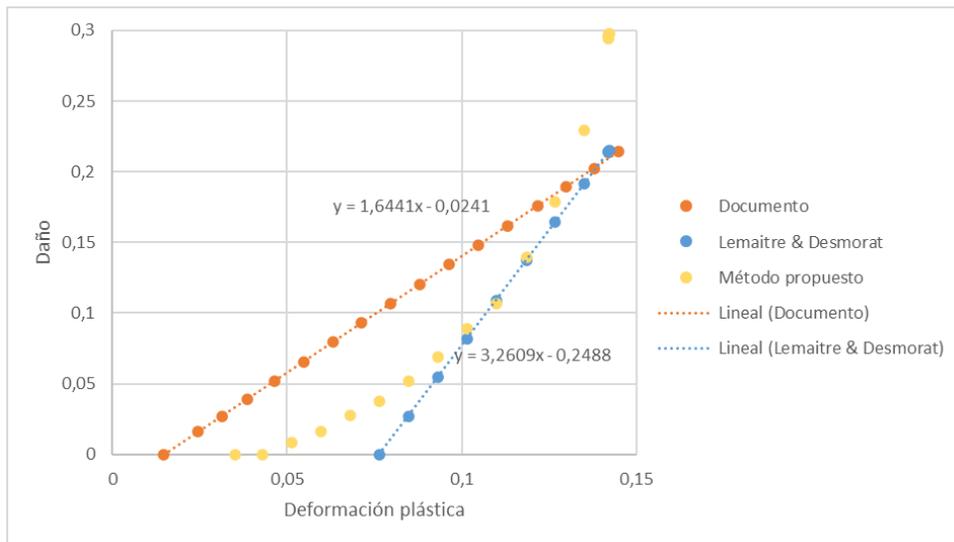


Figura 34: Comparación de métodos de cálculo de daño para Acero DP 590

Este caso muestra una gran diferencia entre el método propuesto y las otras mediciones de daño, ya que las deformaciones donde se inicia el daño son diferentes, así como también las deformaciones donde se llega al daño crítico y el mismo daño crítico es diferente.

Los dos últimos casos evidencian la gran diferencia entre el método propuesto y el método de Lemaître & Desmorat. Lo que ocurre es que a veces las curvas de gráficos tensión-deformación decrecen muy rápido haciendo que el cociente entre ambas curvas

esté lejos de ser una recta, por lo que el gráfico de daño se ve como una función de grado mayor a 1.

4 APLICACIÓN

4.1 Aplicación en ensayos disponibles

Para obtener resultados convincentes, se aplica la metodología de Lemaitre & Desmorat a los datos de alambres extraídos de cables metálicos. Estos datos provienen del trabajo de Tomás Bravo [4] dada la imposibilidad de hacer ensayos.

Se ha elegido esta metodología debido a que es un método ya establecido y se cuentan con todos los datos para aplicarlo correctamente.

Se cuenta con los datos necesarios para el estudio de cables de acero galvanizado y de aluminio. Los detalles de los materiales se encuentran en el punto 2.2 de este trabajo. Las curvas de los casos a usar se muestran en los siguientes gráficos.

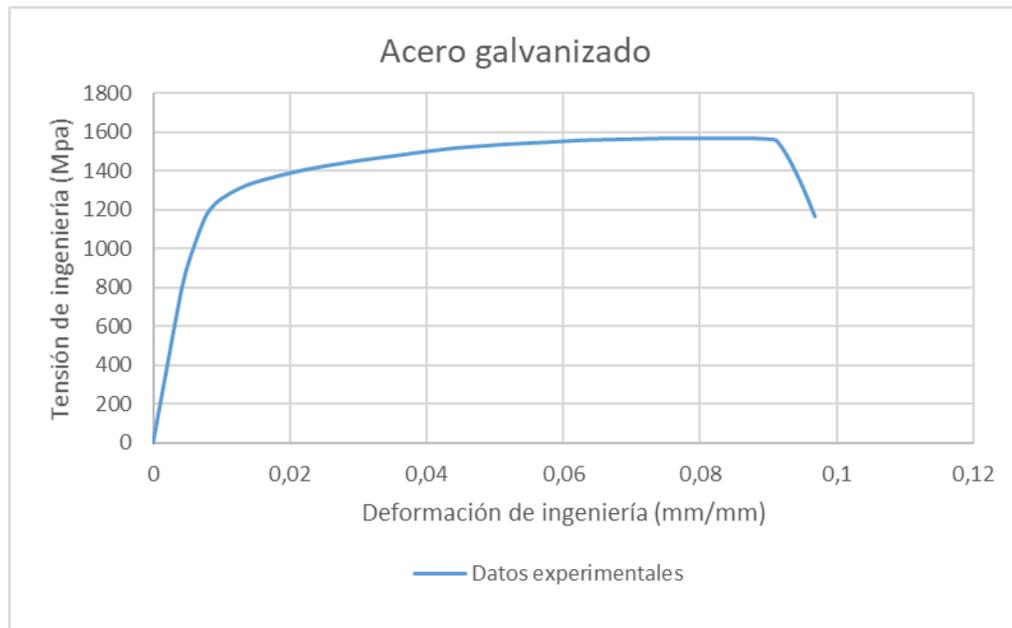


Figura 35: Ley constitutiva del acero galvanizado a usar

Respecto de los datos obtenidos del trabajo de Tomás Bravo [4], cabe destacar que no se ha utilizado su propuesta para aproximar la ley constitutiva debido a que el método propuesto por él es de una ley siempre creciente, cosa que no sirve para la medición de daño. Por el contrario, se ha utilizado una curva representativa del ensayo de un alambre proveniente de un cable de 9,5 mm de diámetro. Curva mostrada en la figura 3.

Así mismo se ha hecho para el caso del aluminio, del cual se desprende una curva representativa del ensayo de un alambre proveniente de un cable de 14,3 mm de diámetro. Estos datos vienen de la figura 4 y son graficados a continuación.

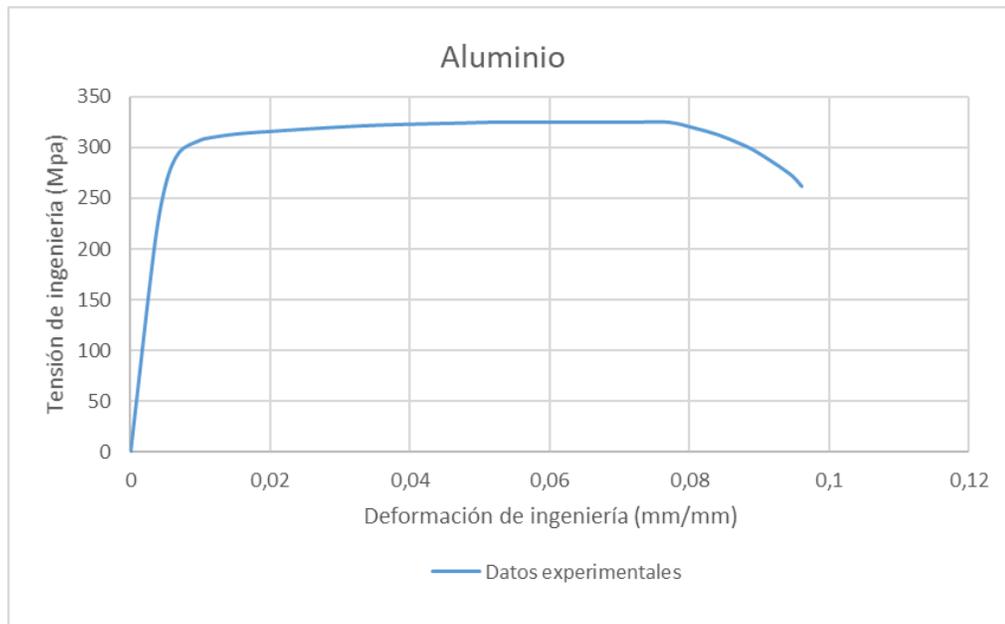


Figura 36: Ley constitutiva del aluminio a usar

De los datos de los gráficos se obtienen los parámetros necesarios para formular una ley de evolución de daño para los materiales de los cuales están hechos los cables a estudiar. El valor de Z no se concluye a partir de los gráficos, pero se tiene ese dato medido de forma empírica.

Para hacer ordenado el trabajo se procede a dividir esta sección de acuerdo al material, para que sea más sencillo para el lector seguir los pasos realizados para encontrar la función daño.

4.1.1 Acero galvanizado

Las dimensiones del elemento de acero ensayado son las siguientes:

$$\text{Diámetro inicial de hebra} = 2,950 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro final de hebra} = 2,197 \text{ mm}$$

Con esto se obtienen las superficies transversales iniciales y finales:

$$S_0 = 6,835 \text{ mm}^2$$

$$S_R = 3,791 \text{ mm}^2$$

Ahora se calcula el valor de Z con la ecuación 9:

$$Z = 0,445$$

El resto de los datos son los siguientes:

Tabla 6: Datos para cálculo de daño de acero galvanizado

Datos Lemaitre & Desmorat					
Dc (-)	σ_R (Mpa)	σ_u (Mpa)	ϵ_{pD} (-)	ϵ_{pR} (-)	ϵ_{pR}^* (-)
0,532	734,0	1569,3	0,080	0,097	0,510

Con los parámetros listos, la curva extendida se ve de la siguiente manera:

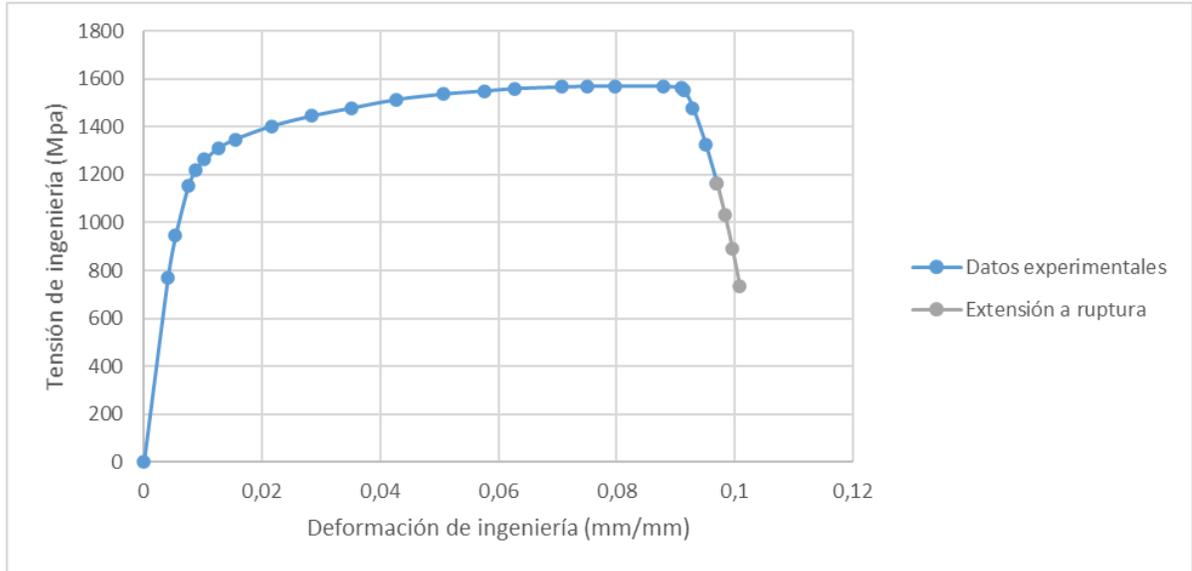


Figura 37: Ley constitutiva extendida del acero galvanizado a usar

Mientras que la ley de acumulación de daño se ve como a continuación:

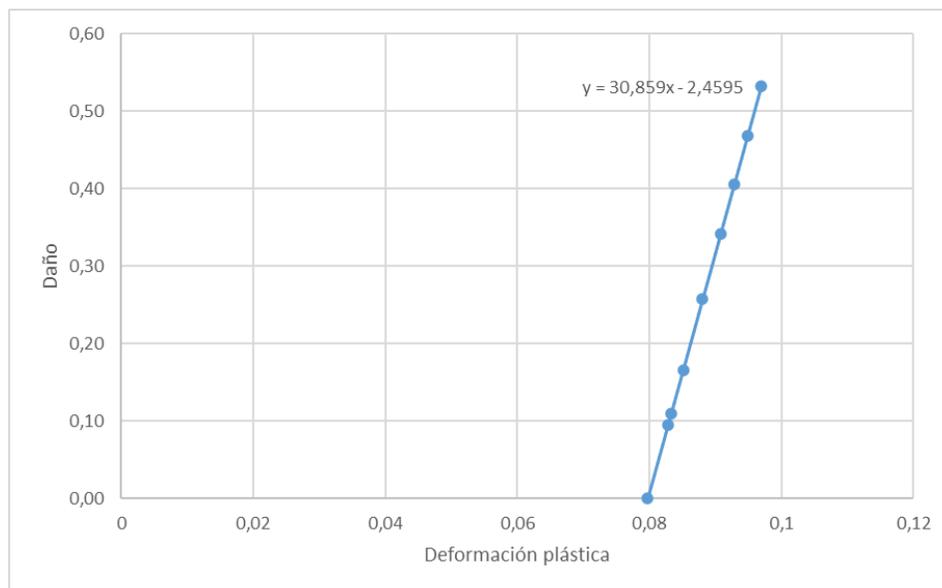


Figura 38: Función de daño a usar en acero galvanizado

Con esto ya están los datos necesarios para pasar a los cables de acero galvanizado.

4.1.2 Aluminio

Respecto al aluminio, las dimensiones del elemento ensayado son las siguientes:

$$\text{Diámetro inicial de hebra} = 4,70 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro final de hebra} = 2,39 \text{ mm}$$

Con esto se obtienen las superficies transversales iniciales y finales:

$$S_0 = 17,349 \text{ mm}^2$$

$$S_R = 4,486 \text{ mm}^2$$

Ahora se calcula el valor de Z con la ecuación 9:

$$Z = 0,741$$

El resto de los datos son los siguientes:

Tabla 7: Datos para cálculo de daño de aluminio

Datos Lemaitre & Desmorat					
Dc (-)	σ_R (Mpa)	σ_u (Mpa)	$\epsilon_p D$ (-)	$\epsilon_p R$ (-)	$\epsilon_p R^*$ (-)
0,44	181,1	324,6	0,072	0,100	0,982

Con los parámetros listos, la curva extendida se ve de la siguiente manera:

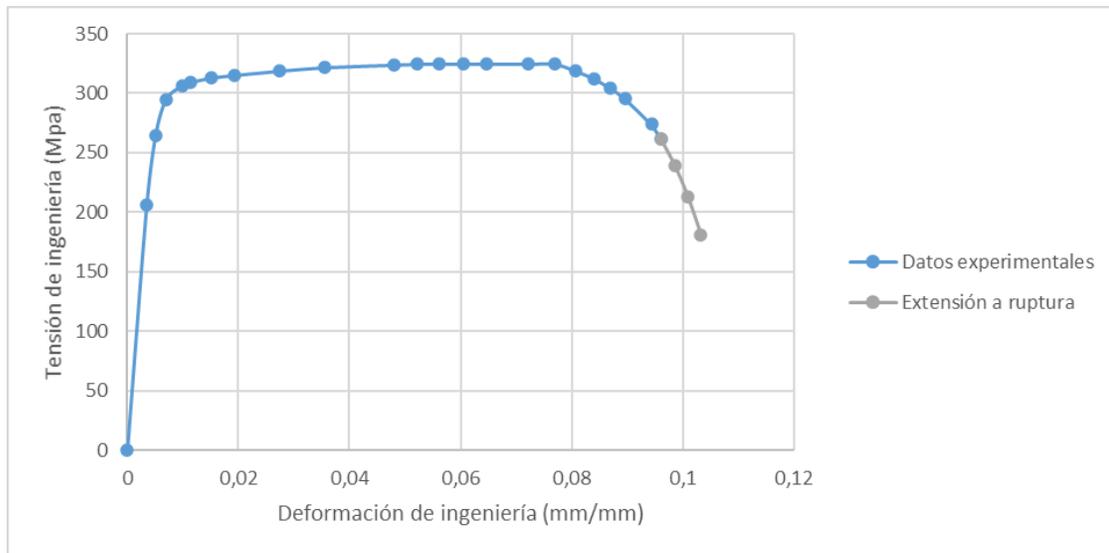


Figura 39: Ley constitutiva extendida del aluminio a usar

Y la ley de acumulación de daño se ve como sigue en la figura 40:

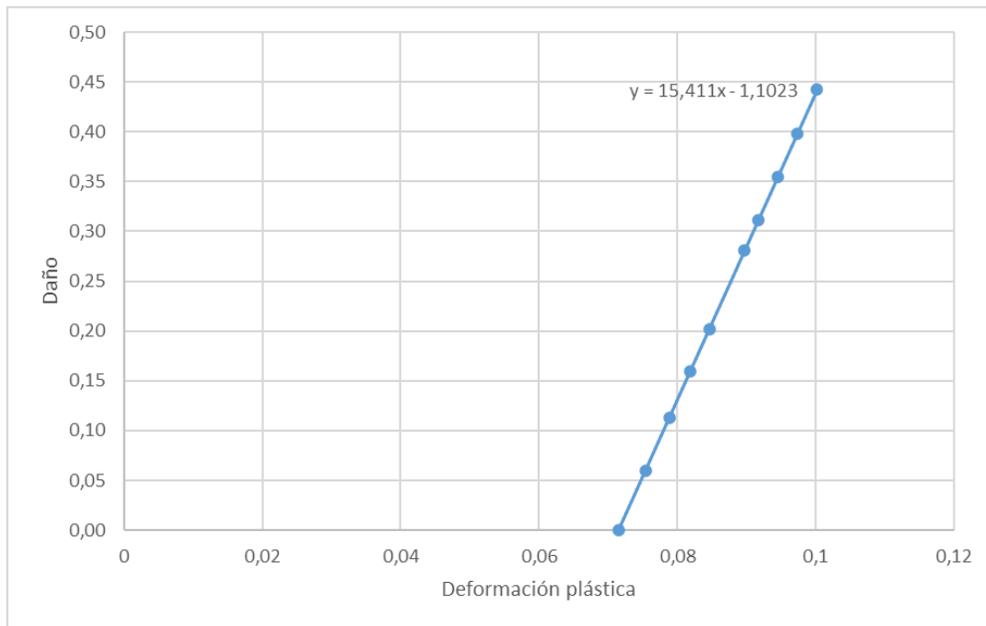


Figura 40: Función de daño a usar en aluminio

Ahora ya se cuentan con los datos necesarios para hacer cálculos de cables tanto de acero galvanizado como de aluminio.

4.2 Aplicación en cables

Las fórmulas vistas en el punto anterior son utilizadas para calcular el daño en hebras de cables. Estos comportamientos de hebras son obtenidos a partir de un programa de Matlab que, considerando la cantidad de hebras inicialmente fracturadas, es capaz de entregar la deformación de cada hebra independiente en función de una deformación global del cable.

Con cada deformación correspondiente a cada hebra se obtiene el daño característico de cada una de ellas hasta que la hebra más dañada alcance su daño crítico. Esta deformación se considera como la deformación máxima del cable, es decir, es el punto donde si se llega a deformar más, este cable perderá su configuración, pasando a tener una o dos hebras adicionales cortadas.

Con el daño de cada hebra calculado, se procede a crear una fórmula que, en función de la deformación del cable entregue una evolución de daño del cable. A partir de esto se deduce la ecuación presentada a continuación como un promedio ponderado de los daños de las hebras:

$$D_{cable} = \sum_{i=brk+1}^n \frac{A_i * d_i + 1 * A_{brk} * brk}{A_{total}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

brk : número de hebras rotas.

A_{brk} : área de hebra rota.

A_i : área de hebra i .

d_i : daño en hebra i .

A_{total} : área total de cable virgen original.

De la ecuación expuesta se puede destacar el hecho de que, tal como se espera, el cable comienza ya dañado si llega a tener hebras fracturadas. Además, como cada hebra se comienza a dañar cuando alcanza el punto de máxima tensión, y no todas las hebras alcanzan dicho punto en el mismo instante, la función de acumulación de daño del cable sufre cambios de pendientes a medida que más hebras comienzan a acumular daño.

A continuación, se presenta el estudio de dos diferentes cables metálicos. El primero, un cable de un núcleo y seis hebras perimetrales, de diámetro máximo de cable igual a 9,5 mm hecho de acero galvanizado; mientras que el segundo es un cable también de un núcleo y seis hebras perimetrales, pero de 14,3 mm de diámetro máximo de cable y hecho de aluminio.

Es importante mencionar que en las secciones 4.2.1 y 4.2.2 a continuación, solo se muestran gráficos de cables con cero y una hebra dañada. El resto de los casos se encuentran en los anexos 1 y 2 respectivamente para acero galvanizado y aluminio.

4.2.1 Acero galvanizado

0 hebras fracturadas

Para comenzar el estudio del daño del cable de acero galvanizado, es necesario calcular la deformación de cada hebra del cable en función de la deformación global de este. A continuación, en la figura 41 se muestra en forma gráfica lo anteriormente mencionado.

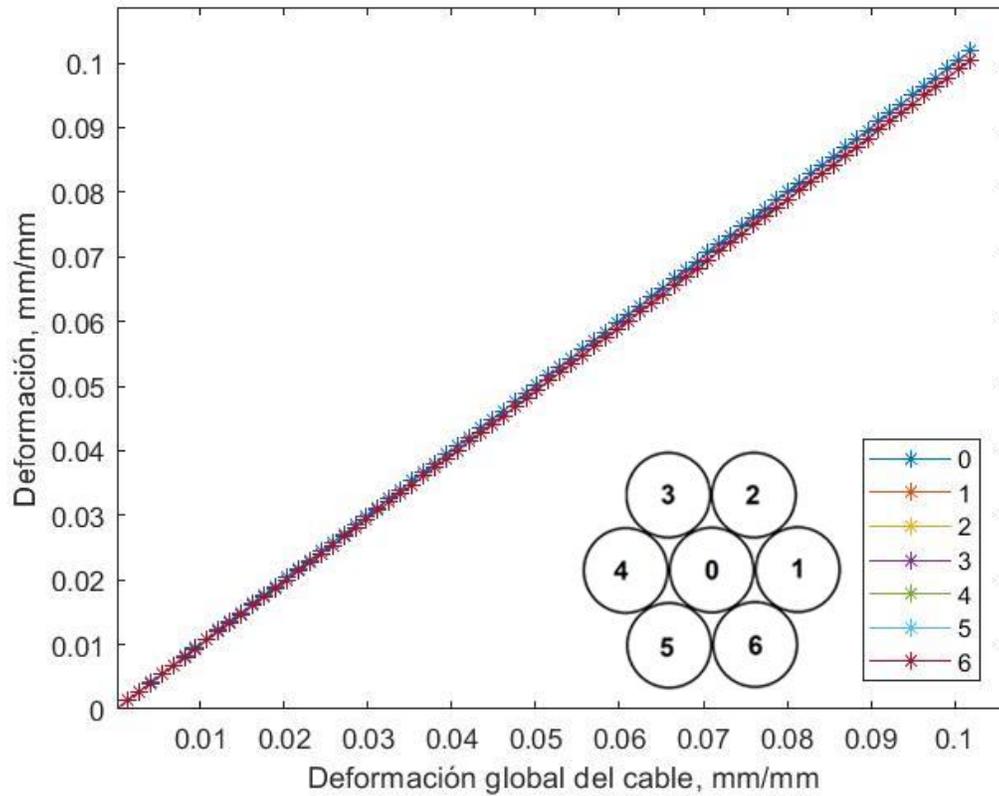


Figura 41: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 0 hebras rotas

En la figura 41 mostrada, se destaca el hecho de que el núcleo sufre una leve mayor deformación que el resto de las hebras.

De acuerdo a lo mostrado en la figura 41, se puede obtener el gráfico Tensión versus Deformación para cada hebra, ya que se tiene el conocimiento del comportamiento del material, dada la figura 37.

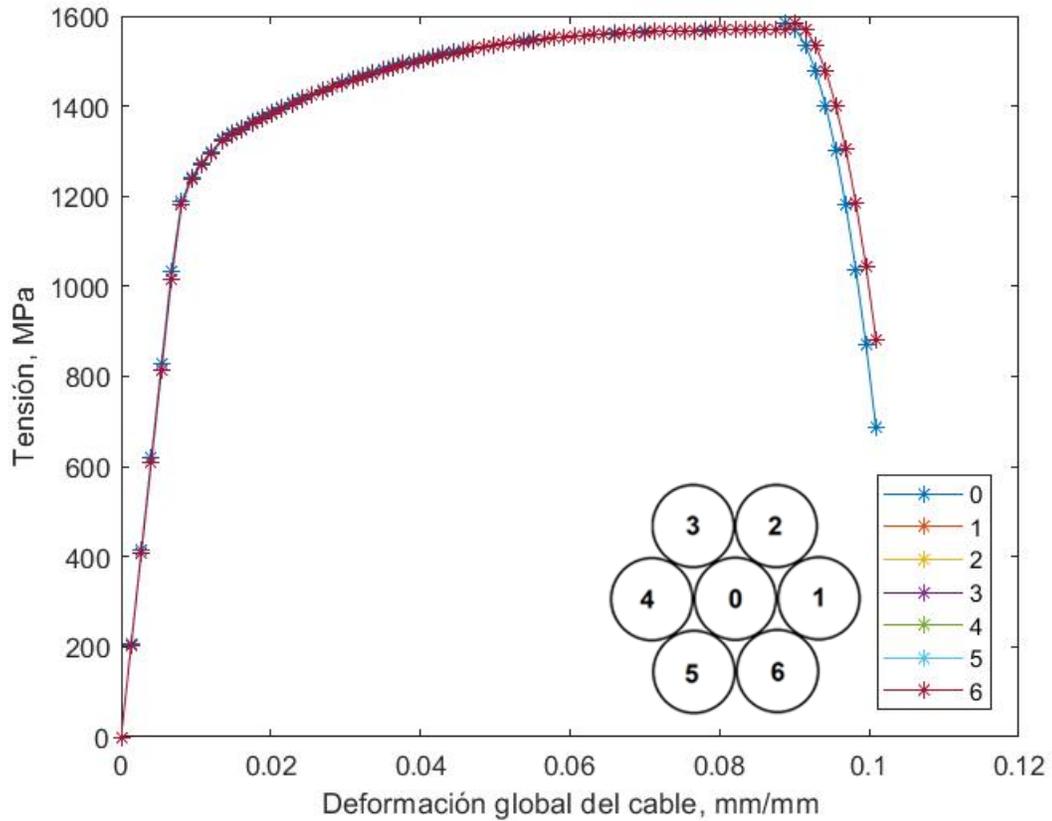


Figura 42: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 0 hebras rotas

Con los resultados expuestos en la Figura 41 se calcula el daño que sufre cada hebra hasta el momento en que la hebra más traccionada llega al daño crítico definido en la tabla 6. Este dato se presenta en la figura 43 a continuación. Cabe destacar que, para poder comparar con otros gráficos de daño, la figura es presentada como el daño acumulado en función de la deformación plástica del cable.

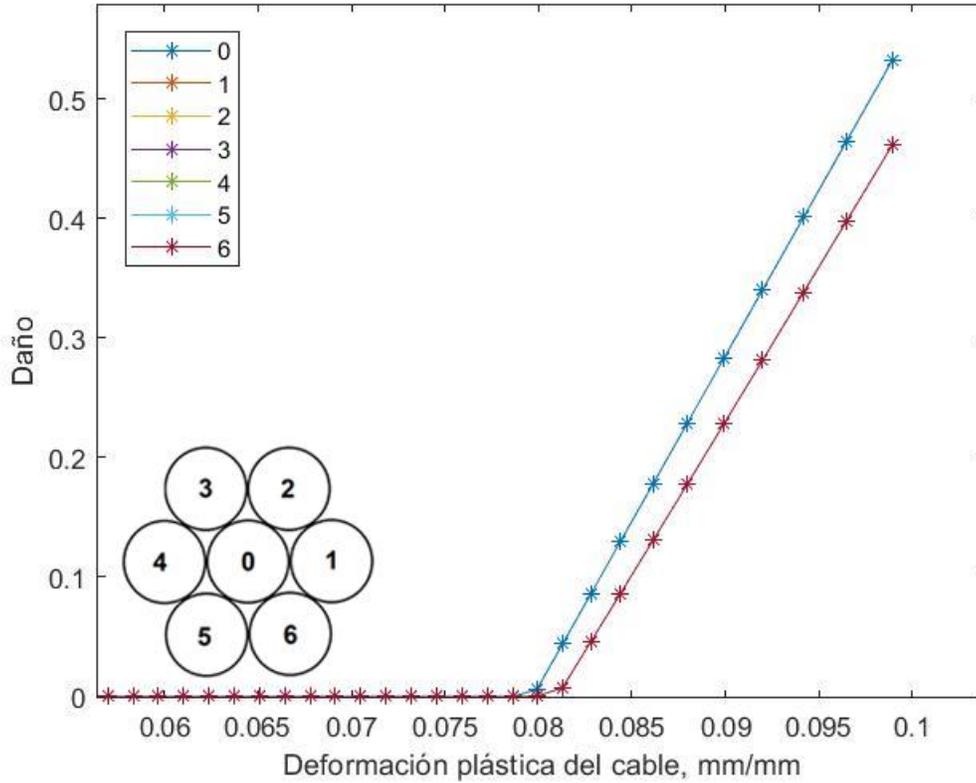


Figura 43: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 0 hebras rotas

En la figura 43 se aprecia fácilmente que hay hebras del cable que acumulan daño similar, lo que hace sencillo de notar que en este caso particular la hebra del núcleo llegará primero a su daño crítico y se fracturará.

Con esta información del daño individual de cada hebra se calcula la acumulación del daño global del cable, pero en función de la deformación global, ya que así es más fácil la comprensión y las conclusiones que se pudieran llegar a extraer.

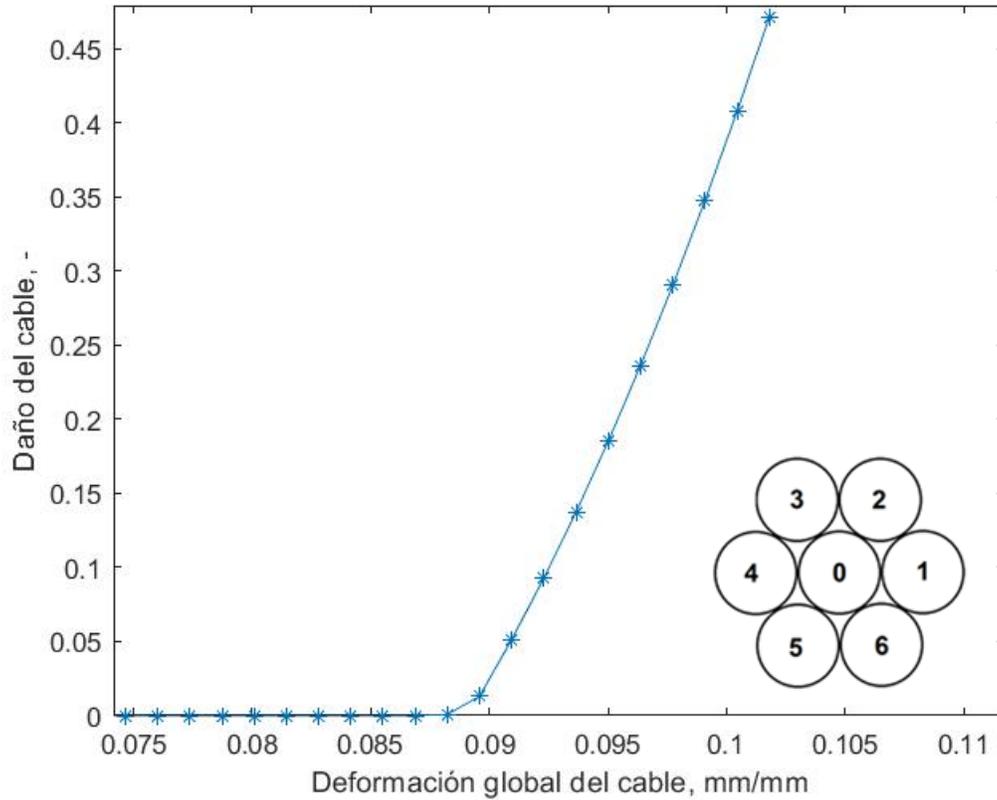


Figura 44: Daño total en función de deformación del cable para acero con 0 hebras rotas

La figura 44 muestra el resultado de la aplicación de la ecuación 17 con los datos de la figura 43. En esta figura se ve un pequeño cambio de pendiente al pasar de solo daño de núcleo a daño de todas las hebras. Además, se ve que, al ser un cable virgen, no presenta daño inicial.

La comparación del daño final de cable con otras configuraciones se encuentra en la sección 5.1 de acuerdo con los datos obtenidos tanto en esta sección como en el anexo 1.

1 hebra fracturada

También para este caso se comienza con el gráfico de deformación por hebra en función de la deformación global del cable

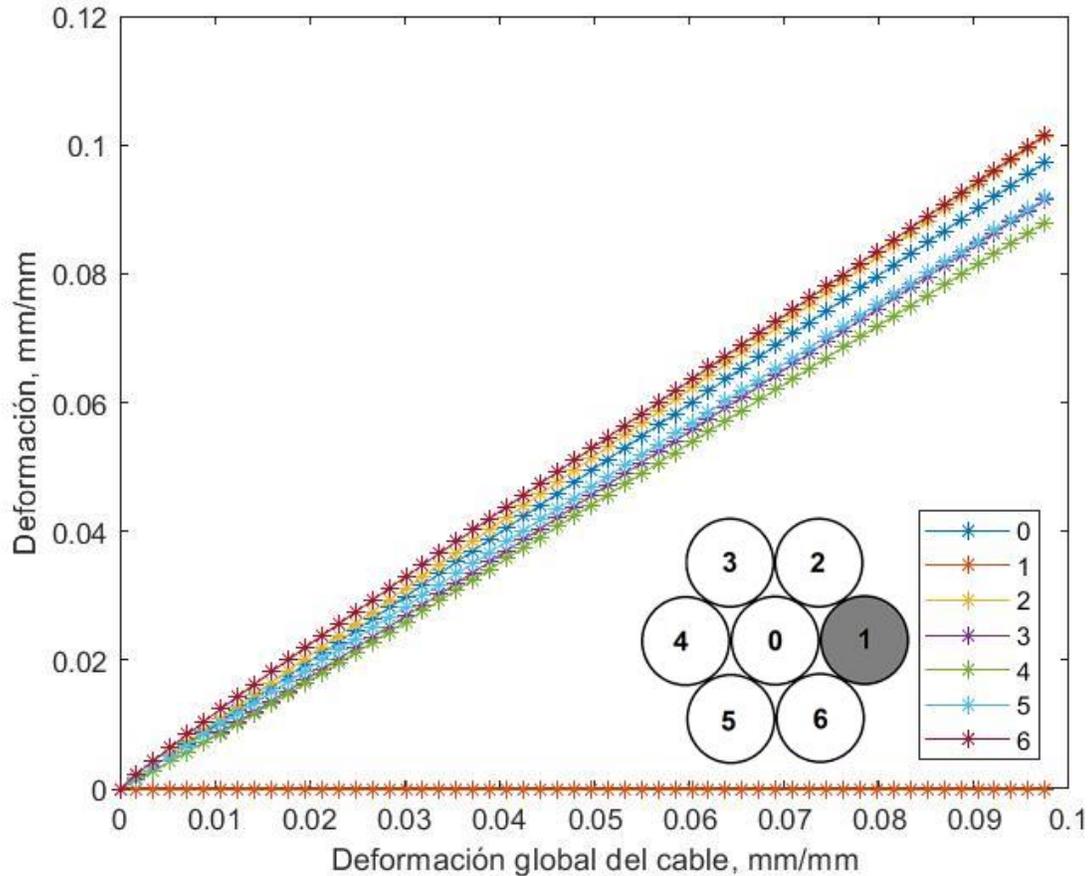


Figura 45: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 1 hebra rota

Se destaca en la figura 45 anterior el hecho de que al empezar con la hebra número 1 fracturada, las hebras que más deformación sufren son las número 2 y 6 que avanzan juntas en el gráfico, la que les sigue en deformación es la número 0, para continuar con las 3 y 5, y finalizar con la número 4. Estos resultados están en conformidad con lo expuesto por Enzo De Vico [7], y que es mencionado en este documento en el punto 2.1.

A partir de lo mostrado en la figura 45 se puede obtener el gráfico Tensión versus Deformación para cada hebra, ya que se tiene el conocimiento del comportamiento del material, dada la figura 37.

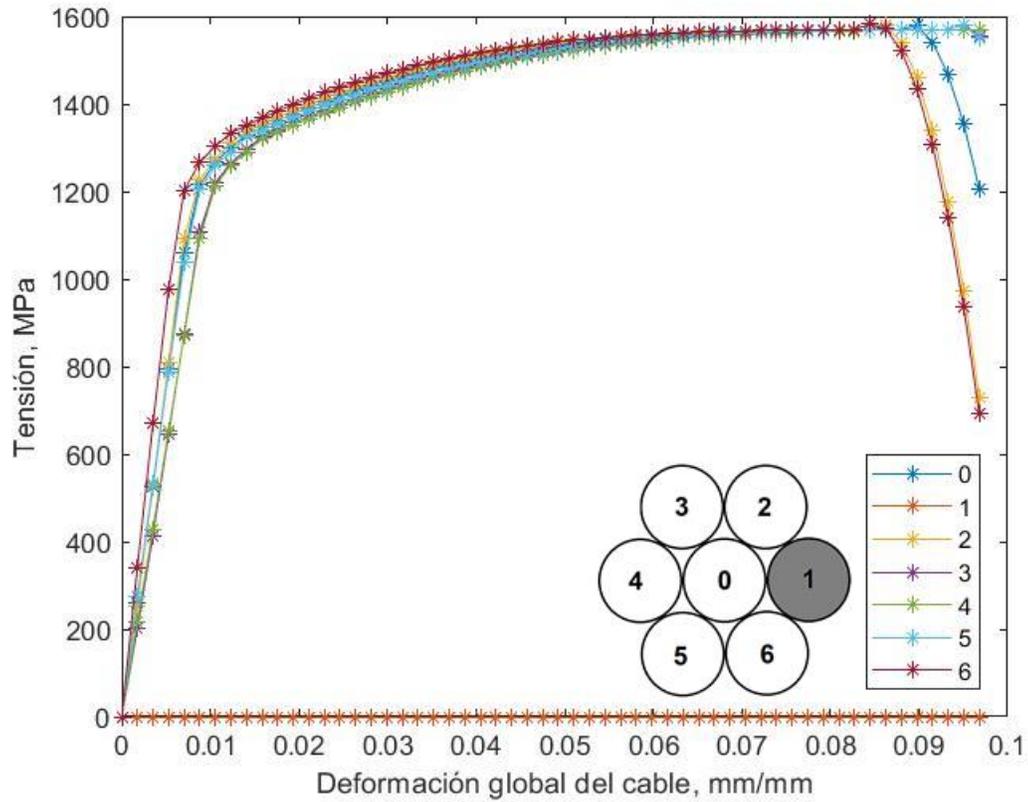


Figura 46: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 1 hebra rota

A partir de los resultados expuestos en la Figura 45 se calcula el daño que sufre cada hebra hasta el momento en que la hebra más traccionada llega al daño crítico definido en la tabla 6. Este dato se presenta en la figura 47 a continuación. Cabe destacar que, para poder comparar con otros gráficos de daño, la figura es presentada como el daño acumulado en función de la deformación plástica del cable.

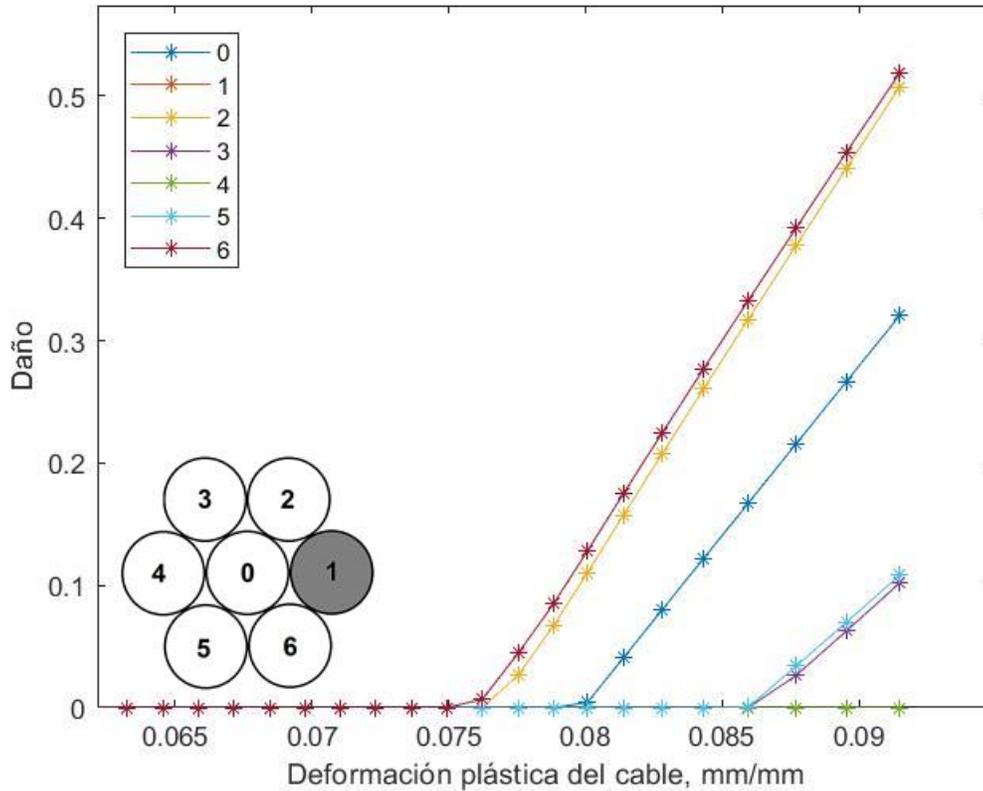


Figura 47: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 1 hebra rota

Se destaca de la figura 47 anterior que hay hebras del cable que acumulan daño similar, lo que hace fácil notar que en este caso particular las hebras número 2 y 6 llegarán al mismo tiempo a su daño crítico y se fracturarán, pasando así el cable a tener desde una a tres hebras cortadas debido a su configuración.

Con esta información del daño individual de cada hebra se calcula la acumulación del daño global del cable, pero en función de la deformación global, ya que así es más fácil la comprensión y las conclusiones que se pudieran llegar a extraer.

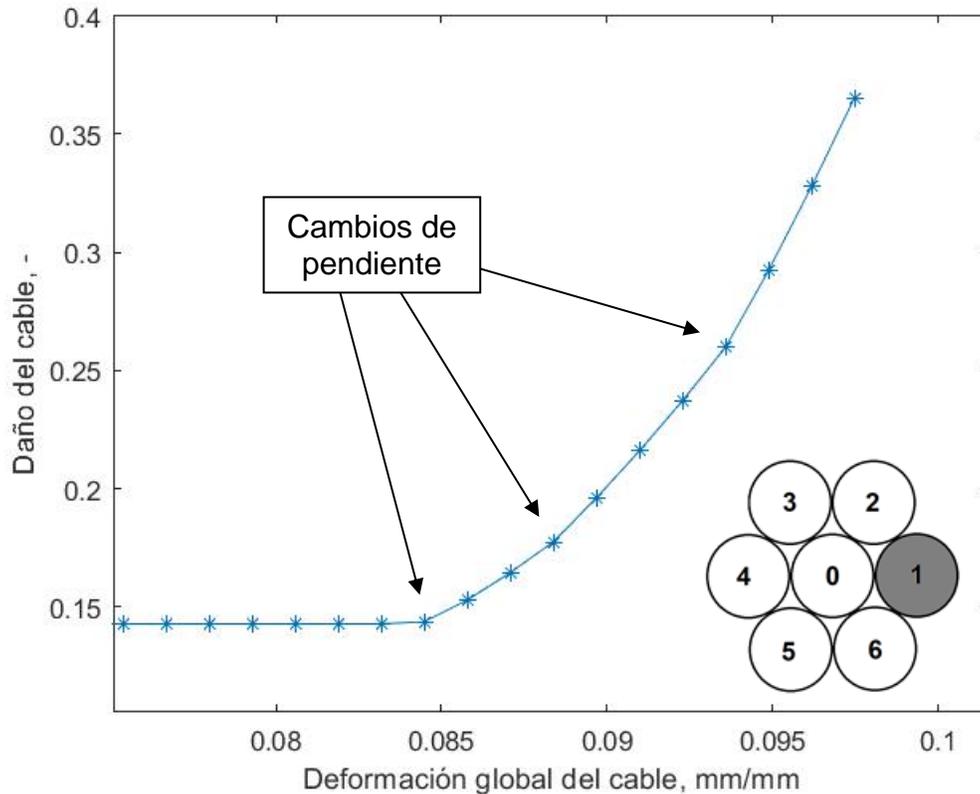


Figura 48: Daño total en función de deformación del cable para acero con 1 hebra rota

La figura 48 muestra el resultado de la aplicación de la ecuación 17 con los datos de la figura 47. En esta figura se destaca los tres cambios de pendiente que sufre la curva de acumulación de daño del cable dada esta configuración. Inicialmente el cable muestra un daño de $1/7$ que representa la fractura inicial de la hebra número 1 y sigue así hasta que las primeras hebras (2 y 6) lleguen al punto de máxima tensión, desde ahí tiene una pendiente creciente que vuelve a cambiar cuando el núcleo (hebra 0) comienza a acumular daño y la curva pasa a tener una pendiente mayor, la cual vuelve a aumentar cuando las hebras 3 y 5 empiezan a aportar daño al cable. Esta situación se mantiene hasta el final cuando las hebras 2 y 6 lleguen a su daño crítico marcado así el daño máximo que acumula el cable antes de su cambio de condición.

Se aprecia una convexidad en la forma de la curva global del daño del cable, esto, asociándolo a lo mencionado por Nicola Bonora [14] que es mostrado también en este documento en la figura 6, podría dar a entender una representación en macro escala de lo expresado para una microescala. En este caso se inicia con un daño, para luego dar cabida a nuevas iniciaciones de daño que van acelerando el crecimiento hasta la falla del cable.

Es importante mencionar, además, que este gráfico que se ve en la figura 48 está en función de la deformación global del cable para que así sea comparable con el gráfico de la figura 46 donde se muestran las curvas tensión-deformación de las diferentes hebras del cable dada la configuración inicial de una hebra fracturada.

La comparación del daño final de cable con otras configuraciones se encuentra en la sección 5.1 de acuerdo con los datos obtenidos tanto en esta sección como en el anexo 1.

4.2.2 Aluminio

0 hebras fracturadas

Al igual que en el caso del acero galvanizado, para el aluminio es necesario comenzar calculando la deformación de cada hebra del cable en función de la deformación global de este. En la figura 49 a continuación se muestra en forma gráfica lo anteriormente mencionado.

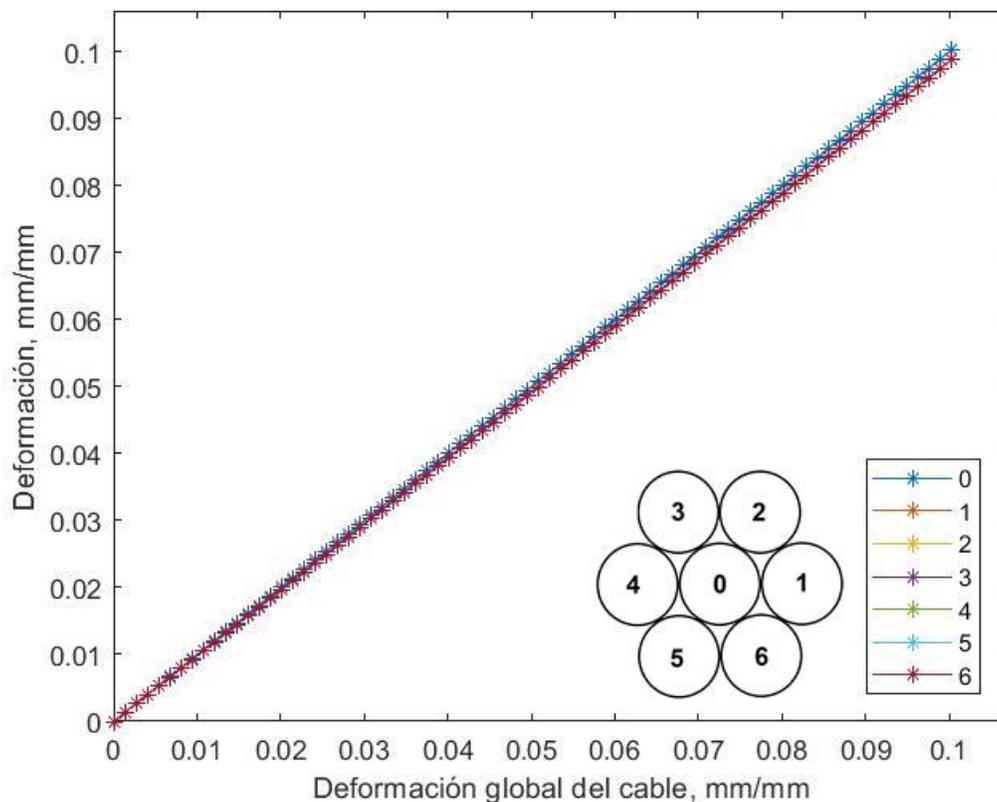


Figura 49: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 0 hebras rotas

En la figura 49 arriba mostrada, se destaca el hecho de que el núcleo sufre una leve mayor deformación que el resto de las hebras como es esperable al igual que en el acero.

De acuerdo a lo mostrado en la figura 49, se puede obtener el gráfico Tensión versus Deformación para cada hebra, ya que se tiene el conocimiento del comportamiento del material, dada la figura 39.

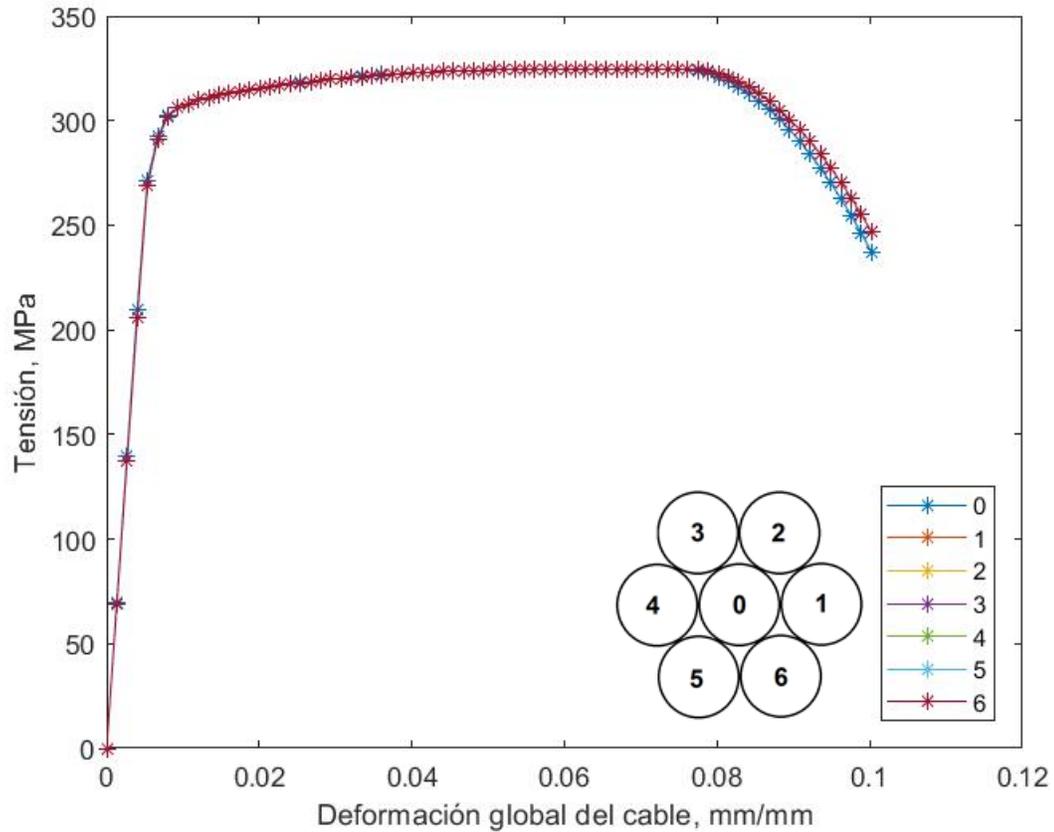


Figura 50: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 0 hebras rotas

Aprovechando que existen datos experimentales de las deformaciones de hebras en función de la fuerza aplicada al cable para dos configuraciones, se procede a comparar lo obtenido numéricamente con los resultados empíricos tomados del trabajo de Fernanda Nuñez [6].

Se presenta primeramente los gráficos de las deformaciones de hebras provenientes de un cable virgen.

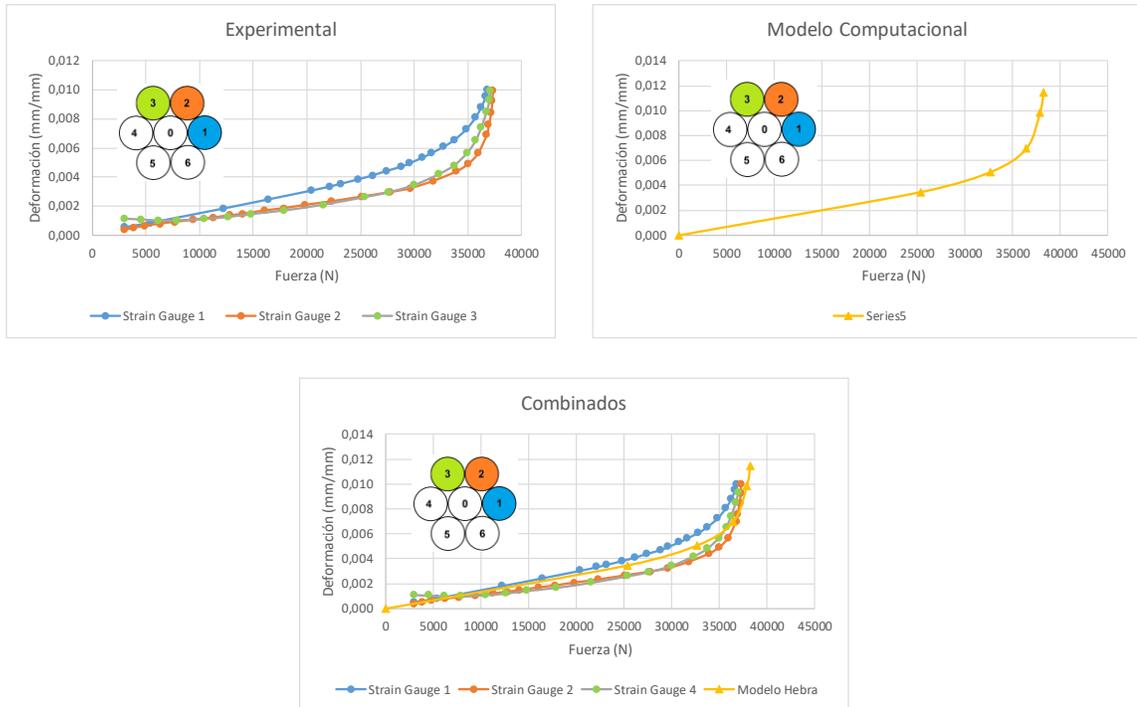


Figura 51: Comparación de resultados experimentales con numéricos para cable virgen

Se puede desprender de estos gráficos que siempre existe un error asociado a lo experimental, dado que para un cable virgen debería haber una deformación igual para cada hebra perimetral, cosa que no ocurre, pero sí sucede en la parte numérica, es por ello que solo se muestra una curva del modelo computacional. Otra cosa que también se puede notar es que la curva de la hebra modelada va por el centro de las mediciones empíricas, como si fuera un promedio.

Con los resultados expuestos en la Figura 49 se calcula el daño que sufre cada hebra hasta el momento en que la hebra más traccionada llega al daño crítico definido en la tabla 7. Este dato se presenta en la figura 52 a continuación. Cabe destacar que, para poder comparar con otros gráficos de daño, la figura es presentada como el daño acumulado en función de la deformación plástica del cable.

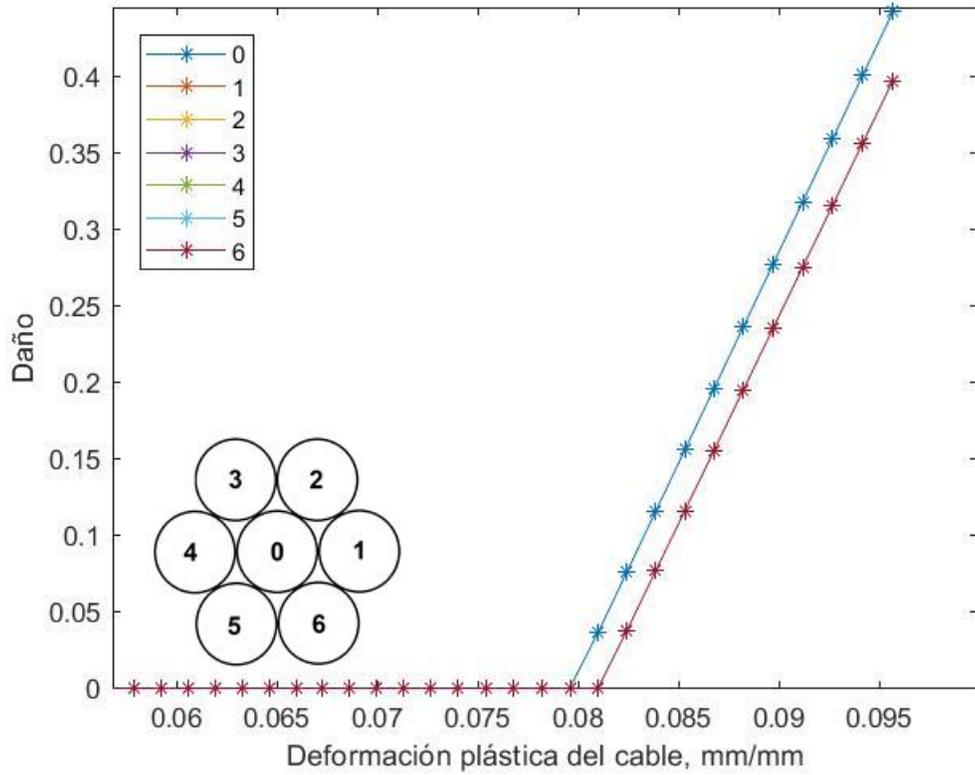


Figura 52: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 0 hebras rotas

En la figura 52 se aprecia, tal como para el caso del acero, que la hebra del núcleo llegará primero a su daño crítico y se fracturará antes que las hebras perimetrales.

Con esta información del daño individual de cada hebra se calcula la acumulación del daño global del cable en función de la deformación global.

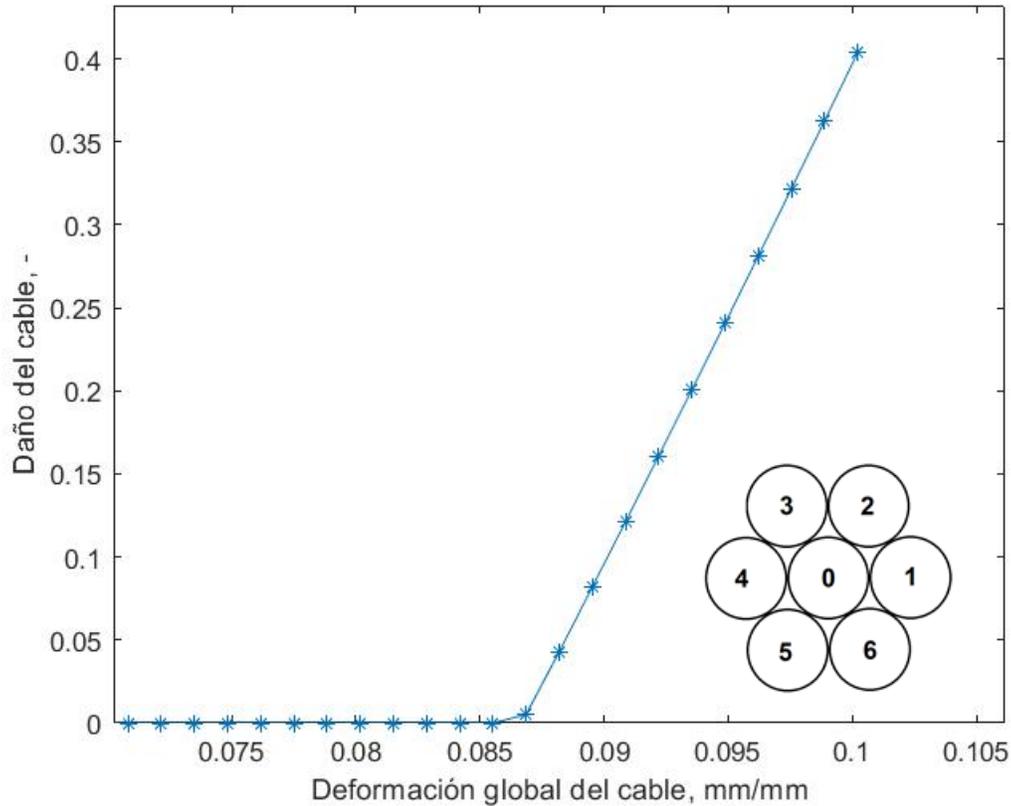


Figura 53: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 0 hebras rotas

La figura 53 muestra el resultado de la aplicación de la ecuación 17 con los datos de la figura 57. En esta figura se ve un pequeño cambio de pendiente al pasar de solo daño de núcleo a daño de todas las hebras. Además, se ve que, al ser un cable virgen, no presenta daño inicial.

La comparación del daño final de cable con otras configuraciones se encuentra en la sección 5.2 de acuerdo con los datos obtenidos tanto en esta sección como en el anexo 2.

1 hebra fracturada

También para este caso se comienza con el gráfico de deformación por hebra en función de la deformación global del cable.

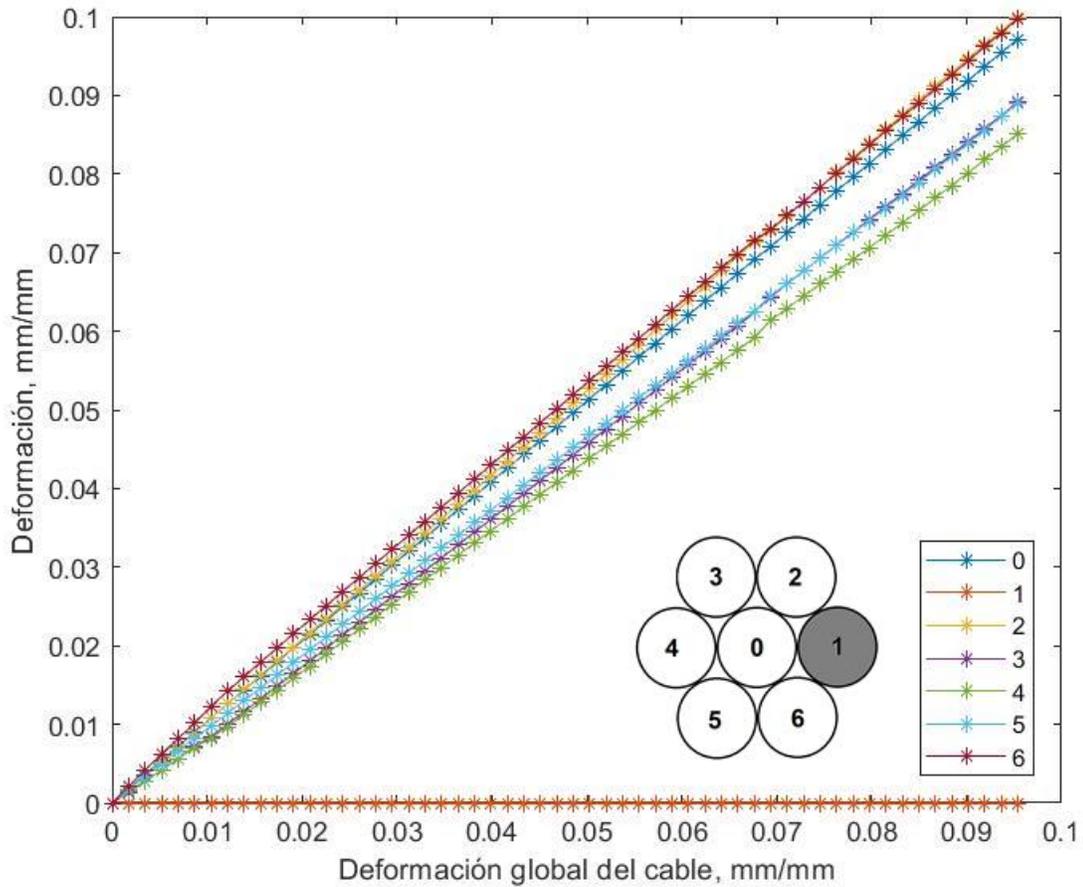


Figura 54: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 1 hebra rota

Se destaca en la figura 54 anterior el hecho de que al empezar con la hebra número 1 fracturada, las hebras que más deformación sufren son las número 2 y 6 que avanzan juntas en el gráfico, la que les sigue en deformación es la número 0, para continuar con las 3 y 5, y finalizar con la número 4. Estos resultados están en conformidad con lo expuesto por Enzo De Vico [7], y que es mencionado en este documento en el punto 2.1.

A partir de lo mostrado en la figura 54 se puede obtener el gráfico Tensión versus Deformación para cada hebra, ya que se tiene el conocimiento del comportamiento del material, dada la figura 39.

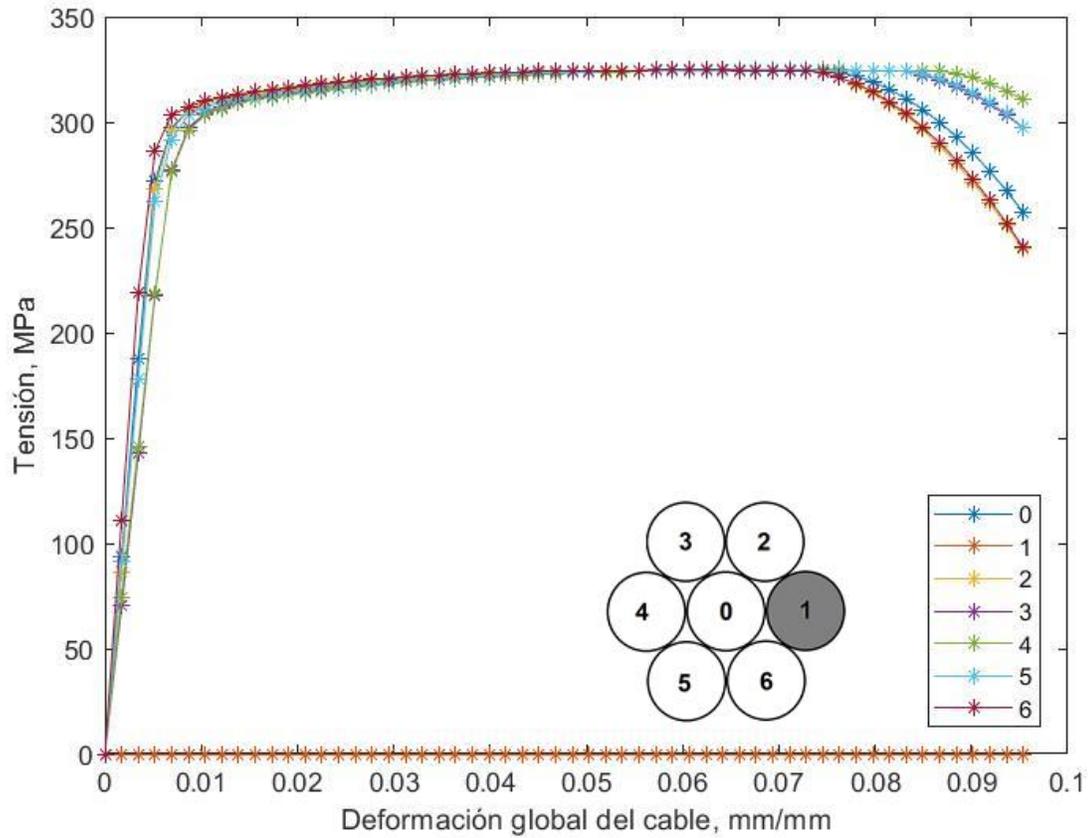


Figura 55: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 1 hebra rota

Habiendo estudiado la comparación de cables virgen se procede a comparar la configuración de una hebra fracturada inicialmente. Aprovechando nuevamente los datos experimentales del trabajo de Fernanda Nuñez [6].

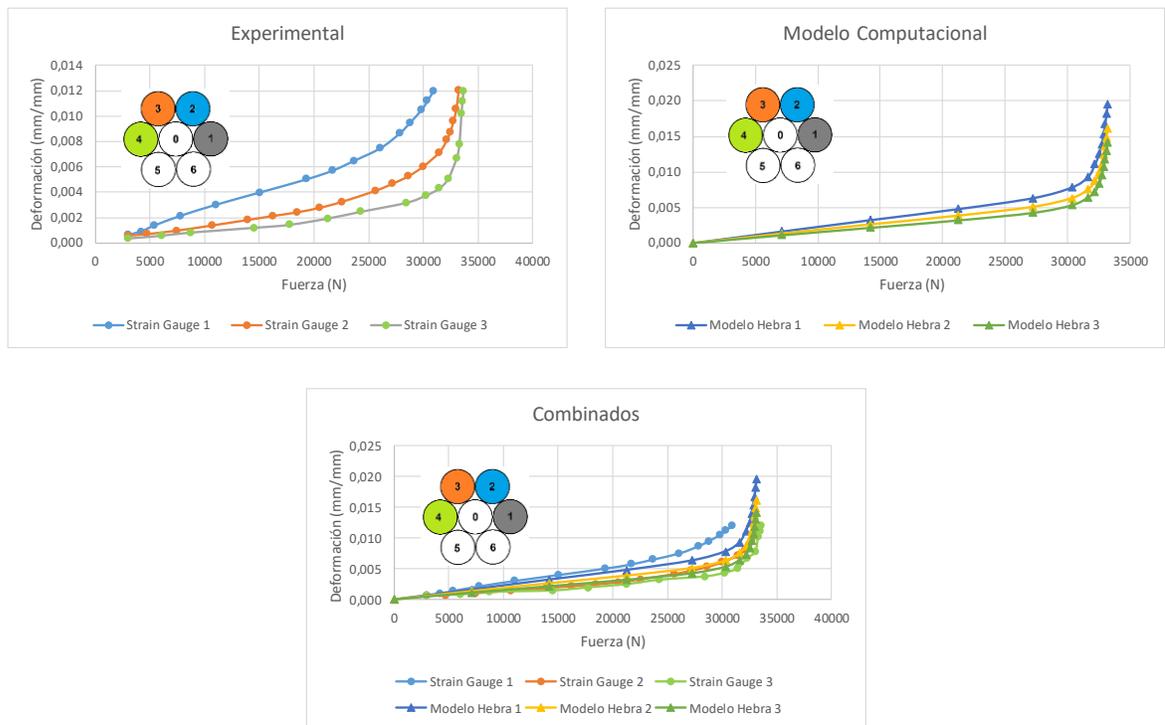


Figura 56: Comparación de resultados experimentales con numéricos para cable con 1 hebra rota

Respecto de la figura 56, se observa que en ambos casos se cumple que las hebras más deformadas para una fuerza dada son las más cercanas a la hebra faltante. Pero la gran diferencia está en que para el caso computacional las diferencias no son tan grandes como sí ocurre con los datos experimentales. Esto se podría atribuir a los errores de medición mencionados en el caso anterior. Se aprecia también que la deformación de la hebra 3 es más parecida a la hebra 4 que a la 2, lo que se cumple en ambos casos.

Volviendo al tema del estudio de daños, a partir de los resultados expuestos en la Figura 54, se calcula el daño que sufre cada hebra hasta el momento en que la hebra más traccionada llega al daño crítico definido en la tabla 7. Este dato se presenta en la figura 57 a continuación. Cabe destacar que, para poder comparar con otros gráficos de daño, la figura es presentada como el daño acumulado en función de la deformación plástica del cable.

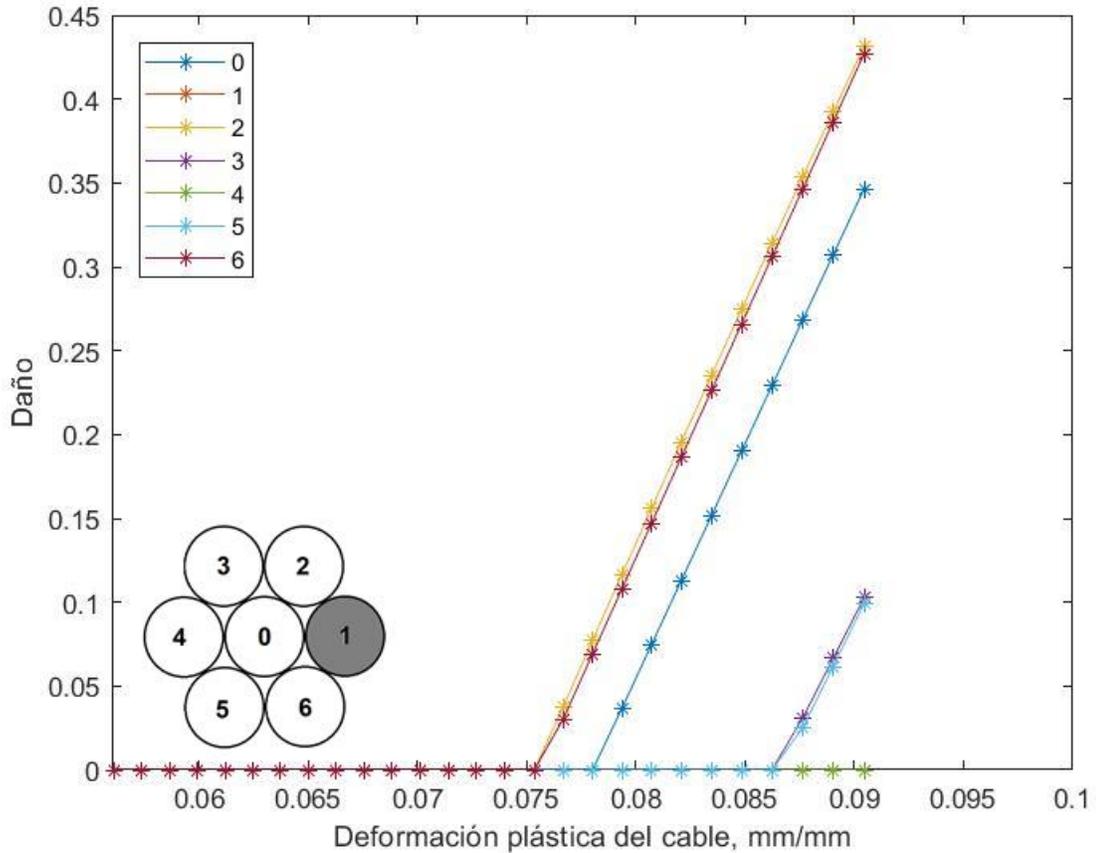


Figura 57: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 1 hebra rota

Tal como para el caso del acero, se destaca de la figura 57 anterior que hay hebras del cable que acumulan daño similar, lo que hace fácil notar que en este caso particular las hebras número 2 y 6 llegarán al mismo tiempo a su daño crítico y se fracturarán, pasando así el cable a tener desde una a tres hebras cortadas debido a su configuración.

Con esta información del daño individual de cada hebra se calcula la acumulación del daño global del cable, pero en función de la deformación global, para hacer más fácil la comprensión y las conclusiones que se pudieran llegar a extraer.

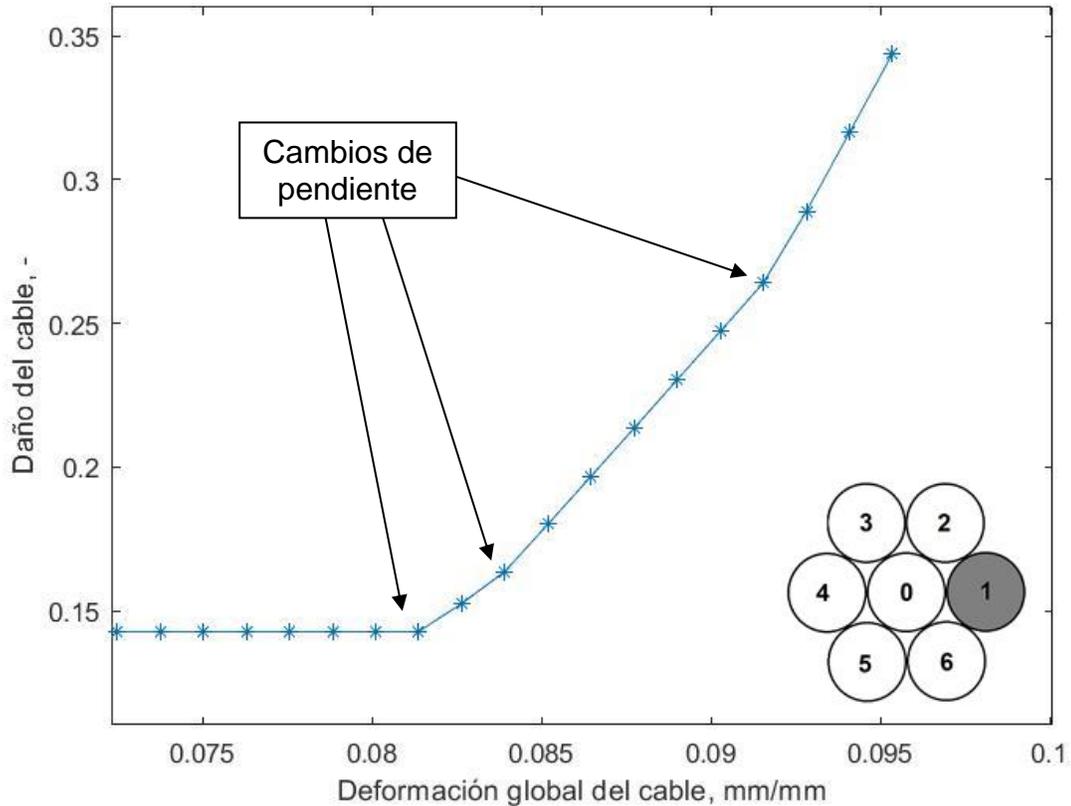


Figura 58: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 1 hebra rota

La figura 58 muestra el resultado de la aplicación de la ecuación 17 con los datos de la figura 64. En esta figura se destaca los tres cambios de pendiente que sufre la curva de acumulación de daño del cable dada esta configuración. Inicialmente el cable muestra un daño ya esperable de $1/7$ que representa la fractura inicial de la hebra número 1 y sigue así hasta que las primeras hebras (2 y 6) lleguen al punto de máxima tensión, desde ahí tiene una pendiente creciente que vuelve a cambiar cuando el núcleo (hebra 0) comienza a dañarse y la curva pasa a tener una pendiente mayor, la cual vuelve a aumentar cuando las hebras 3 y 5 empiezan a aportar daño al cable. Esta situación se mantiene hasta el final cuando las hebras 2 y 6 lleguen a su daño crítico marcado así el daño máximo que acumula el cable antes de su cambio de condición.

Al igual que en el caso del acero, se aprecia una convexidad en la forma de la curva global del daño del cable, esto, asociándolo a lo mencionado por Nicola Bonora [14] que es mostrado también en este documento en la figura 6, podría dar a entender una representación en macro escala de lo expresado para una microescala. En este caso se inicia con un daño, para luego dar cabida a nuevas iniciaciones de daño que van acelerando el crecimiento hasta la falla del cable.

Se reitera que este gráfico que se ve en la figura 58 está en función de la deformación global del cable porque así es comparable con el gráfico de la figura 55 donde se muestran las curvas tensión-deformación de las diferentes hebras del cable dada la configuración inicial de una hebra fracturada.

La comparación del daño final de cable con otras configuraciones se encuentra en la sección 5.2 de acuerdo con los datos obtenidos tanto en esta sección como en el anexo 2.

5 RESUMEN DE RESULTADOS

En esta sección se muestra de forma gráfica la comparación de resultados finales obtenidos a partir de las diferentes figuras expuestas tanto en las secciones anteriores como en anexos. De esta manera se observan diferencias y tendencias que rigen en las diferentes configuraciones para los diferentes materiales con la finalidad de poder hallar conclusiones en base a este estudio.

Como ha sido la tónica, se comienza con los resultados obtenidos del acero galvanizado para luego pasar al aluminio. Finalmente se hace una comparación de ambos materiales.

5.1 Acero galvanizado

Los primeros resultados a comparar son los de las deformaciones máximas, las cuales definen en qué momento el cable falla perdiendo su configuración. Estos datos son obtenidos a partir de las figuras 41, 45 y sus similares en el anexo 1, usando como deformación máxima la que implica que el cable más dañado llegue al daño crítico.

Los resultados se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 8: Deformación máxima para cada configuración del cable del acero galvanizado

Daños	Deformación Máxima
0	0,101
1	0,097
2	0,094
3	0,093
4	0,095
5	0,097
6	0,101

Y son graficados en la siguiente figura:

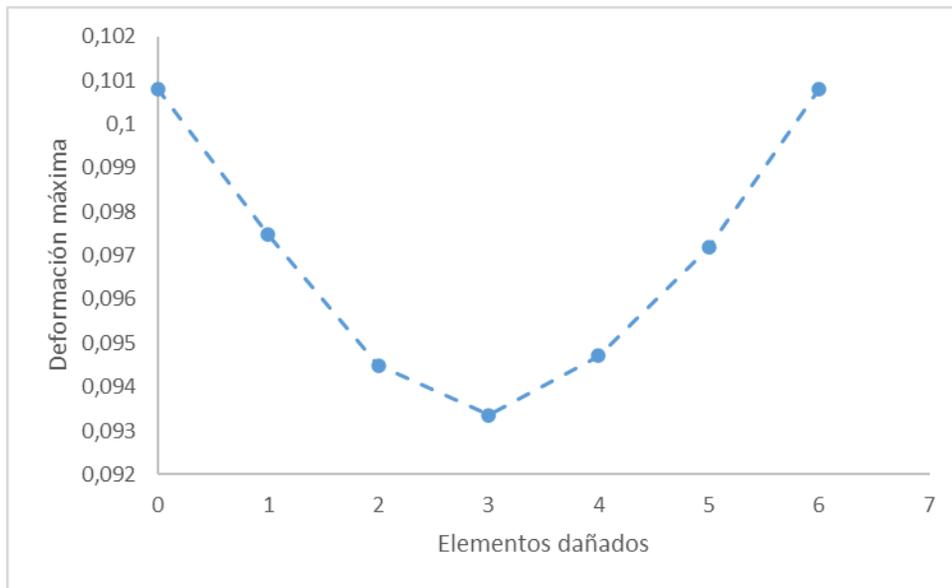


Figura 59: Deformación máxima para cada configuración del cable del acero galvanizado

Se destaca de la figura 59 el hecho de que las deformaciones máximas en los casos tanto del cable virgen como la del que solo le queda el núcleo son máximas globales. Además, se aprecia rápidamente que el caso más perjudicado es el que tiene tres hebras cortadas al comienzo, ya que tolera una deformación menor a cualquier otro caso.

Con los datos de daños de cables se grafica el máximo daño que acumula cada configuración de cable de la misma manera que se hizo con la deformación, pero basado en las figuras 44, 48 y sus similares en el anexo 1. Se muestra a continuación los datos de la máxima acumulación de daño total y de la máxima acumulación de daño adicional al daño inicial.

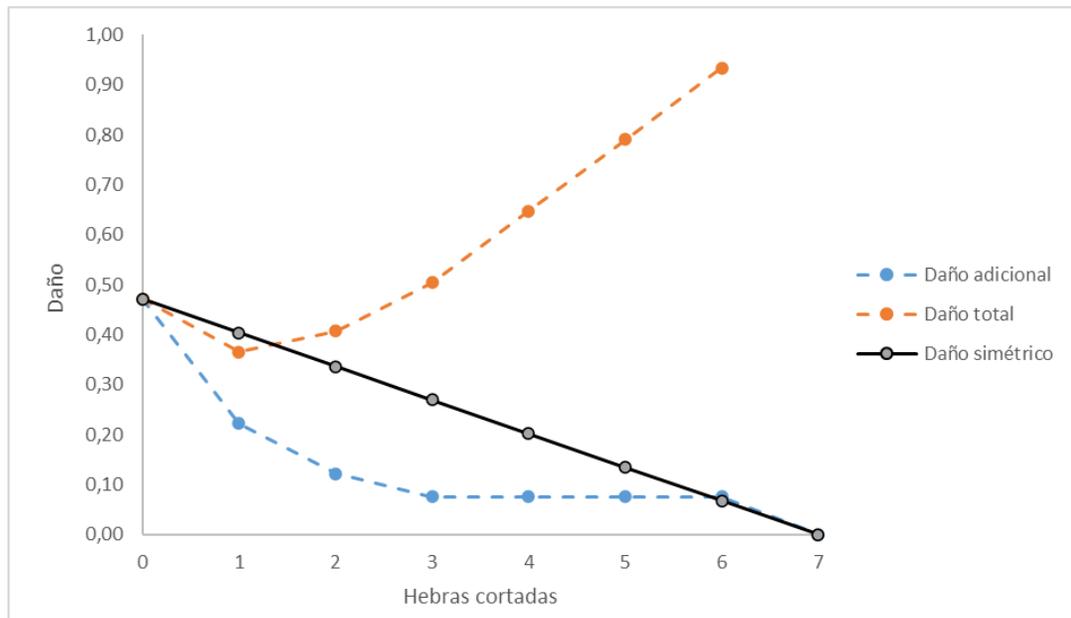


Figura 60: Daño máximo para cada configuración del cable del acero galvanizado

En la figura 60 se aprecia gráficamente la acumulación de daño total y adicional comparándose con un daño adicional proporcional al área perdida, para de esa manera ver cómo afecta la geometría de las hebras intactas del cable en su comportamiento.

Se destaca, además, que desde las tres hasta las seis hebras cortadas el daño adicional que puede acumular el cable es casi el mismo, esto es porque es prácticamente solo el núcleo quien acumula daño, haciendo que sea el mismo daño el que hace fallar todas estas configuraciones de cable.

Se grafica también la energía máxima que acumula cada configuración de cables para compararlo con una configuración donde el área reducida sea simétrica, es decir, donde exista siempre una proporción directa entre el área y la energía. Para lograr lo anteriormente mencionado se utiliza la tensión en cada hebra para calcular la fuerza total resistida por el cable en función de su deformación global. Este procedimiento se realiza sumando el producto de la tensión de cada hebra y su área respectiva. Luego se obtiene la energía normalizada por unidad de largo, en función de la deformación global del cable gracias a la integración de la función de fuerza del cable.

Esta energía se grafica a continuación a modo de porcentaje de la energía máxima, para que de esta manera sea más fácil comparar los resultados.

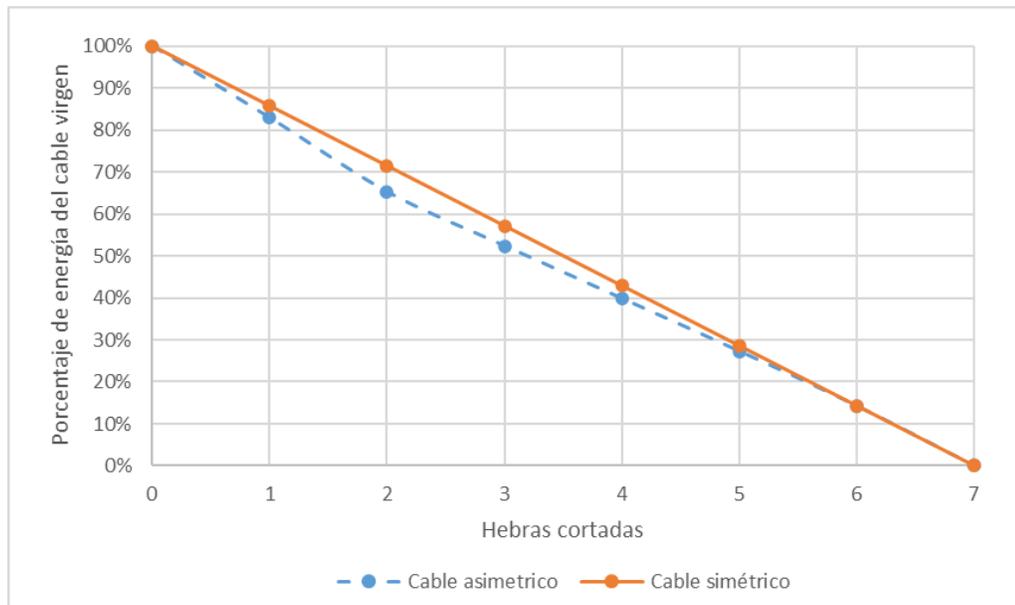


Figura 61: Máxima energía por cada configuración del cable del acero galvanizado

En la figura 61 se logra apreciar que la energía máxima acumulada por un cable con pérdida de área de forma asimétrica es menor que la de un cable con un área simétrica. Por lo tanto, queda aún pendiente graficar la energía necesaria para llevar a un cable a su daño crítico. Dicho gráfico se presenta en la figura a continuación considerando un cable de 0,2 metros.

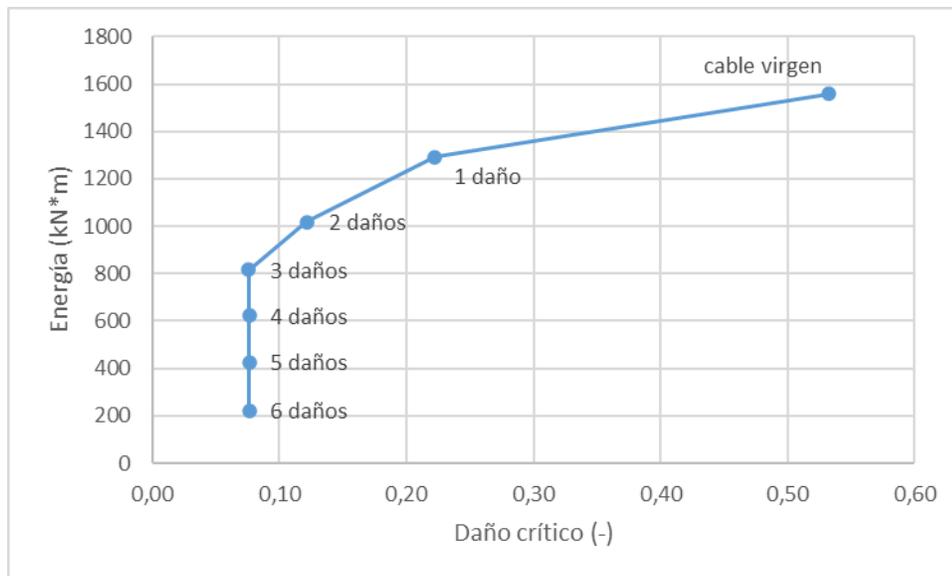


Figura 62: Energía para llegar a daños críticos de cable de acero

De la figura 62 se desprende que a pesar de que las configuraciones que tienen desde seis hasta tres hebras rotas tienen un daño crítico similar, sí se diferencian bastante en cuanto a la energía necesaria para llevarlos hasta ese daño.

Además, utilizando la ecuación 3 junto a los datos de la figura 61, se obtiene un gráfico de daño por energía en función de la cantidad de hebras cortadas, como se muestra a continuación.

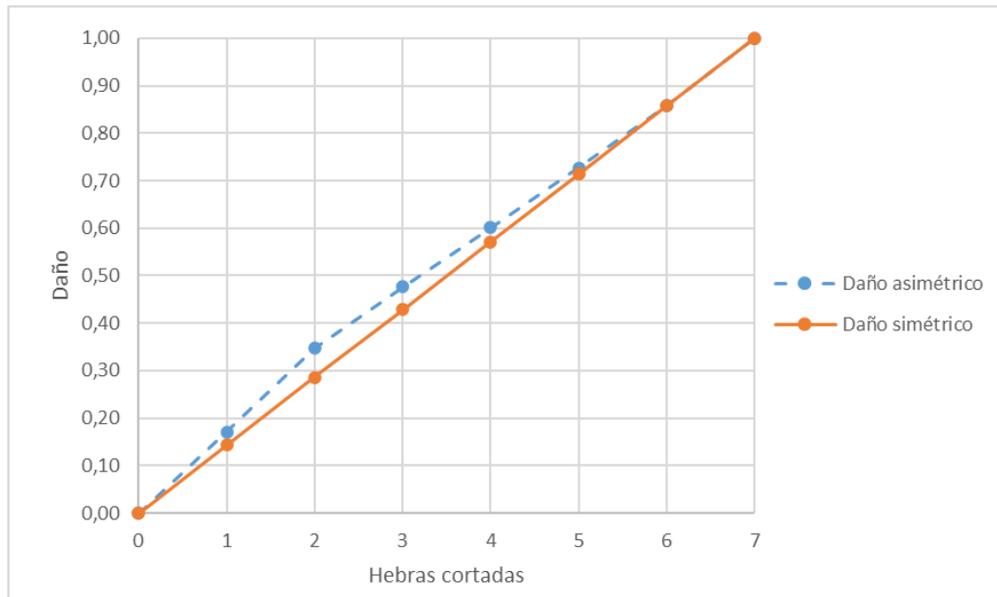


Figura 63: Comparación de daños por energía para acero galvanizado

Ahora el gráfico de la figura 63 se compara con el de la figura 60 que tiene el daño total incluido. Esta comparación se presenta a continuación.

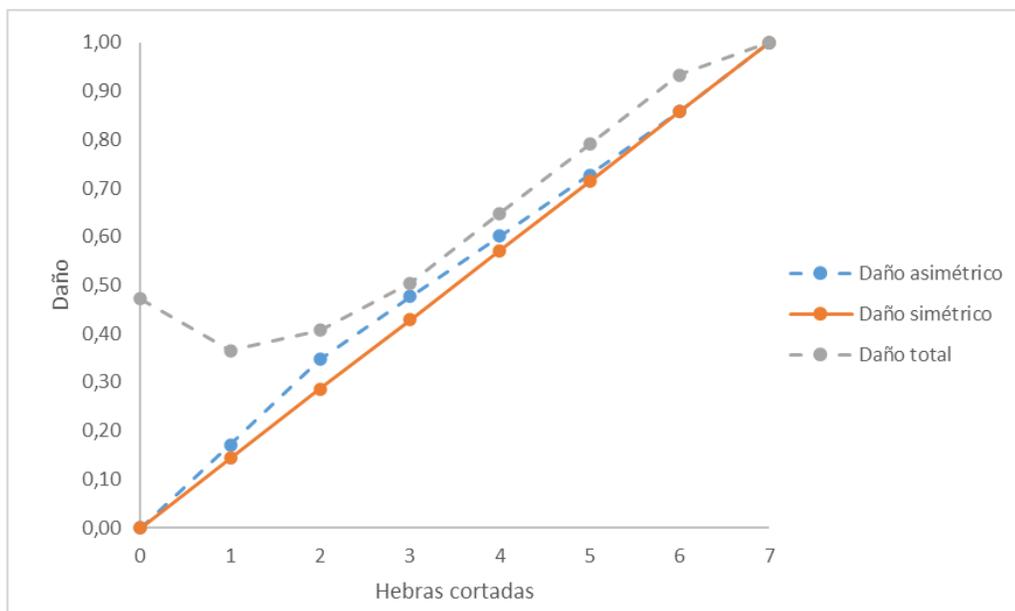


Figura 64: Comparación de daño total acumulado con daño por energía para acero galvanizado

Se aprecia a simple vista que el daño asimétrico por energía va entre las curvas naranja y gris, es decir entre el daño inicial y el máximo acumulable.

5.2 Aluminio

Los primeros resultados a comparar son los de las deformaciones máximas, las cuales definen en qué momento el cable falla perdiendo su configuración. Estos datos son obtenidos a partir de las figuras 49, 54 y sus similares en el anexo 2, usando como deformación máxima la que implica que el cable más dañado llegue al daño crítico.

Los resultados se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 9: Deformación máxima para cada configuración del cable del aluminio

Daños	Deformación Máxima
0	0,103
1	0,095
2	0,093
3	0,092
4	0,094
5	0,098
6	0,103

Y son graficados en la siguiente figura:

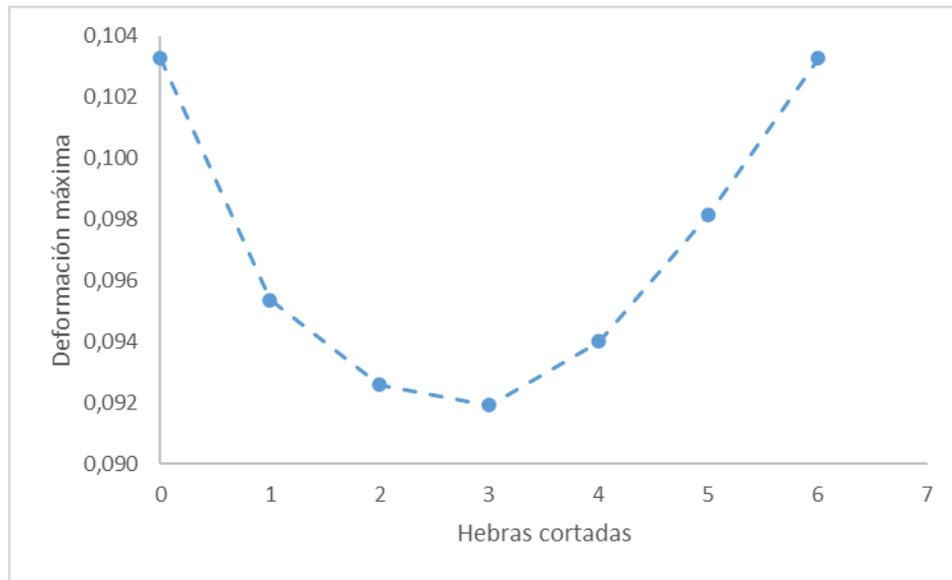


Figura 65: Deformación máxima para cada configuración del cable del aluminio

Se destaca de la figura 65 el hecho de que las deformaciones máximas en los casos tanto del cable virgen como la del que solo le queda el núcleo son máximas globales. Además, se aprecia rápidamente que el caso más perjudicado es el que tiene tres hebras cortadas al comienzo, ya que tolera una deformación menor a cualquier otro caso.

Con los datos de daños de cables se grafica el máximo daño que acumula cada configuración de cable de la misma manera que se hizo con la deformación, pero basado en las figuras 52, 57 y sus similares en el anexo 2. Se muestra a continuación los datos

de la máxima acumulación de daño total y de la máxima acumulación de daño adicional al daño inicial.

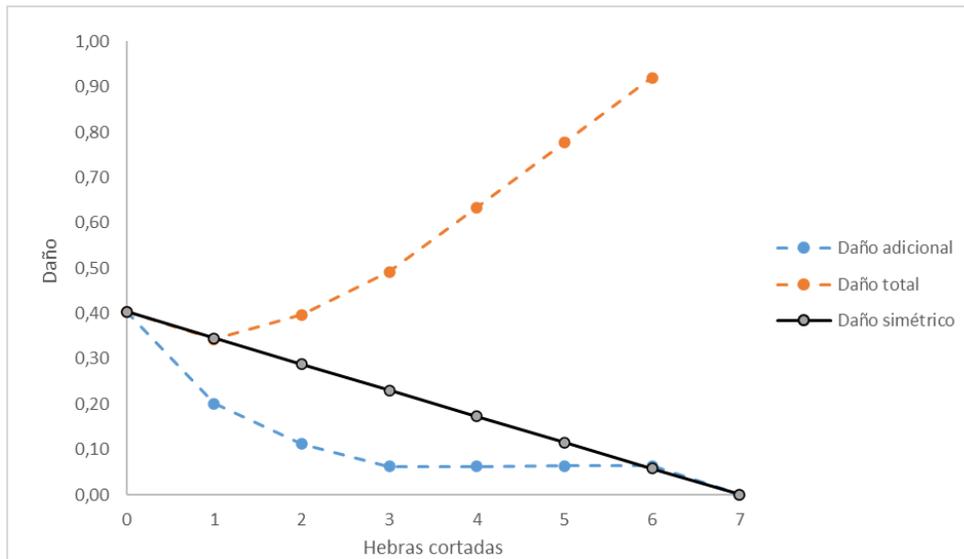


Figura 66: Daño máximo para cada configuración del cable del acero galvanizado

En la figura 66 se aprecia gráficamente la acumulación de daño total y adicional comparándose con el daño crítico del material y con un daño adicional proporcional al área perdida, para de esa manera ver cómo afecta la geometría de las hebras intactas del cable en su comportamiento.

Se aprecia al igual que en el caso del acero, que llegando a tres hebras cortadas la curva azul se aplana ya que es casi solo el núcleo el que está acumulando daño, por lo que el daño adicional necesario para hacer fallar el cable es el mismo.

Se grafica además la energía máxima que acumula cada configuración de cables para compararlo con una configuración donde el área reducida sea simétrica, es decir, donde exista siempre una proporción directa entre el área y la energía.

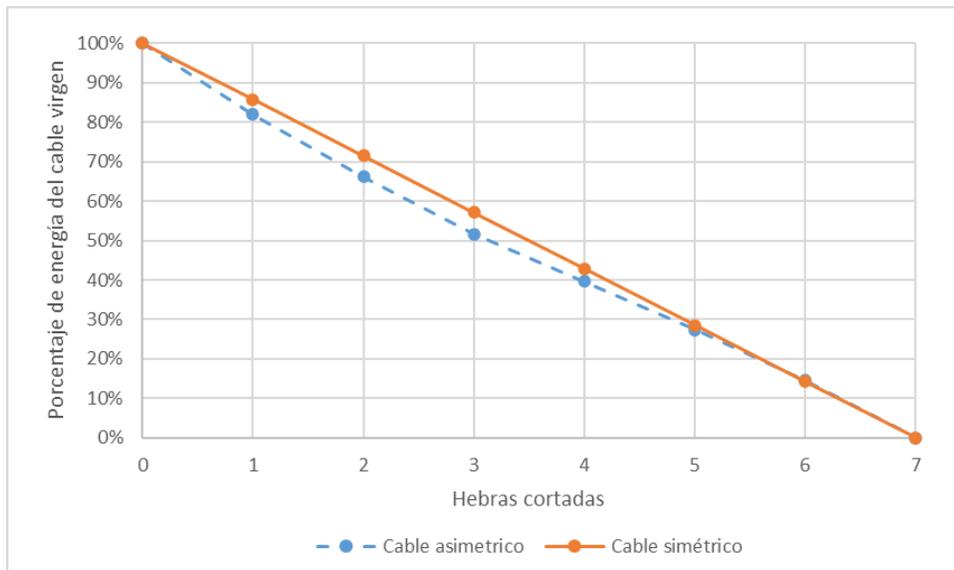


Figura 67: Máxima energía por cada configuración del cable del acero galvanizado

En la figura 67 se logra apreciar que la energía máxima acumulada por un cable con pérdida de área de forma asimétrica es menor que la de un cable con un área simétrica. Por lo tanto, queda aún graficar la energía necesaria para llevar a un cable a su daño crítico. Dicho gráfico se presenta en la figura a continuación considerando un cable de 0,2 metros.

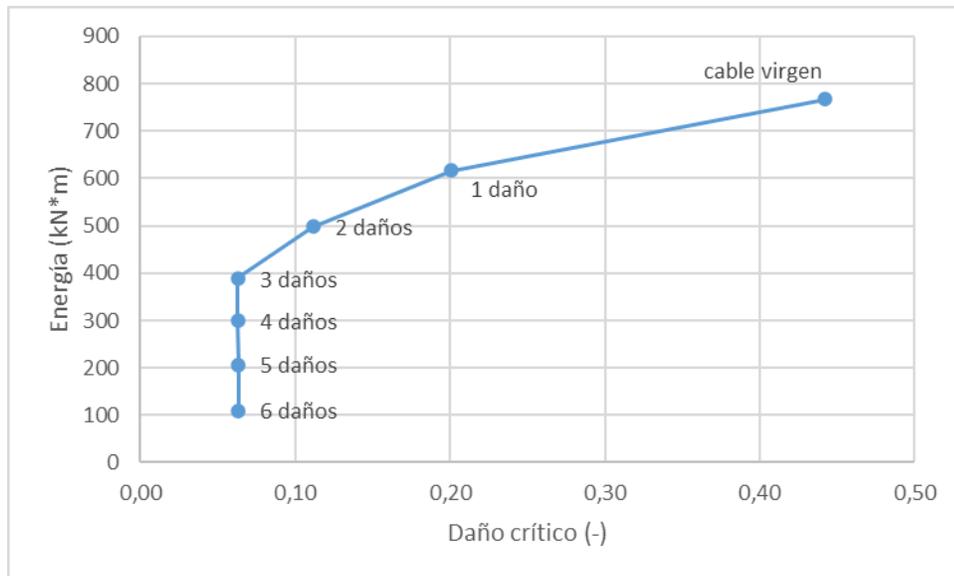


Figura 68: Energía para llegar a daños críticos de cable de aluminio

De forma muy parecida a lo que ocurre con el acero, con el aluminio también se necesita mayores energías para hacer llegar cables con más hebras vivas hasta su daño crítico, aun cuando esos daños sean muy similares. Con menos de tres daños ya empiezan a crecer los daños críticos y también las energías necesarias, aunque en menor medida.

Tal como con el acero galvanizado, para este caso se usa la ecuación 3 junto a los datos de la figura 67 para obtener un gráfico de daño por energía en función de la cantidad de hebras cortadas, como se muestra a continuación.

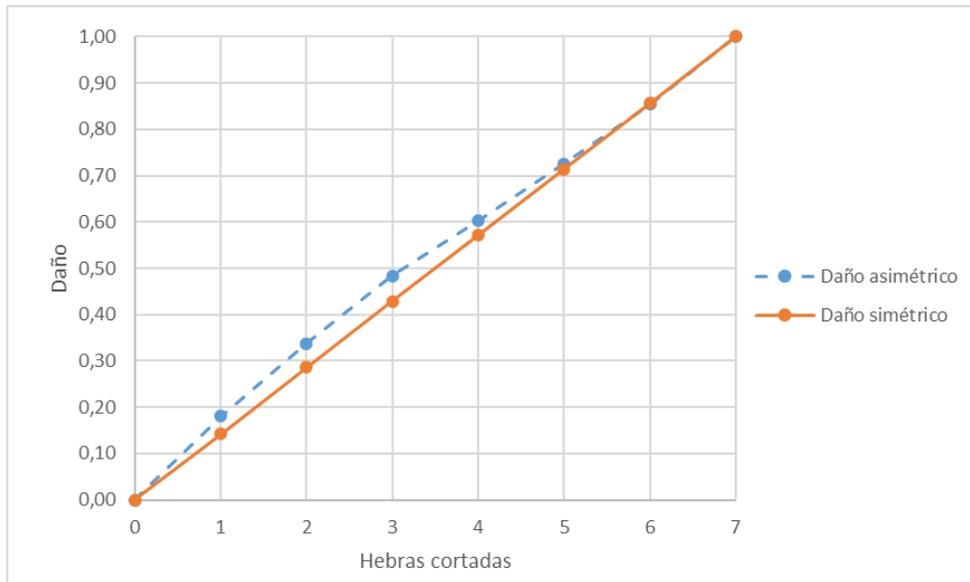


Figura 69: Comparación de daños por energía para aluminio

También el gráfico de la figura 69 se compara con el de la figura 66 que tiene el daño total incluido. Esta comparación se presenta a continuación.

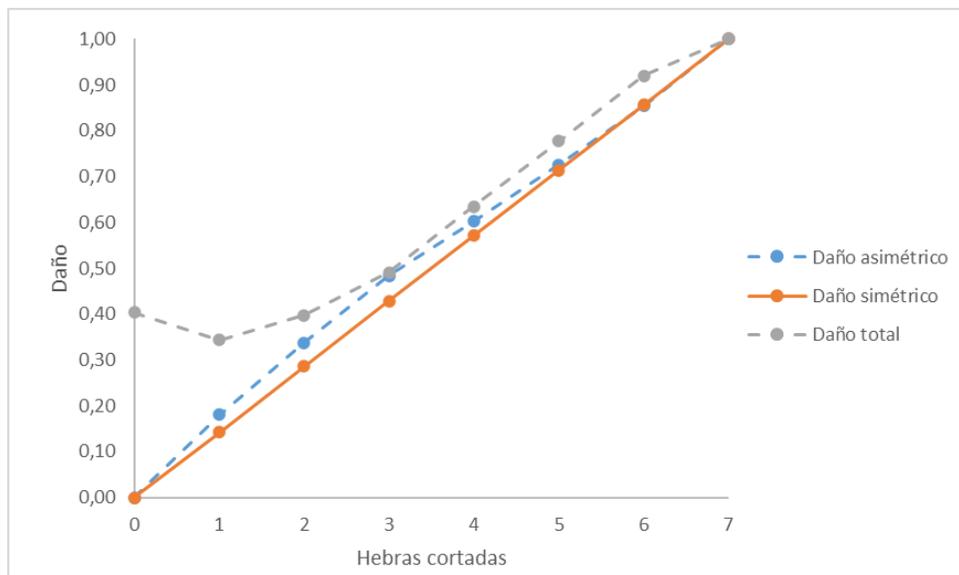


Figura 70: Comparación de daño total acumulado con daño por energía para aluminio

Al igual que para el acero galvanizado, a simple vista el daño asimétrico por energía va entre las curvas naranja y gris, es decir entre el daño inicial y el máximo acumulable.

5.3 Comparación de materiales

Finalmente, se procede a comparar los resultados de ambos materiales para concluir a partir de sus diferencias y similitudes.

Los primeros gráficos a comparar son los de deformación máxima ubicados en las figuras 59 y 65. La figura a continuación muestra dicha comparación.

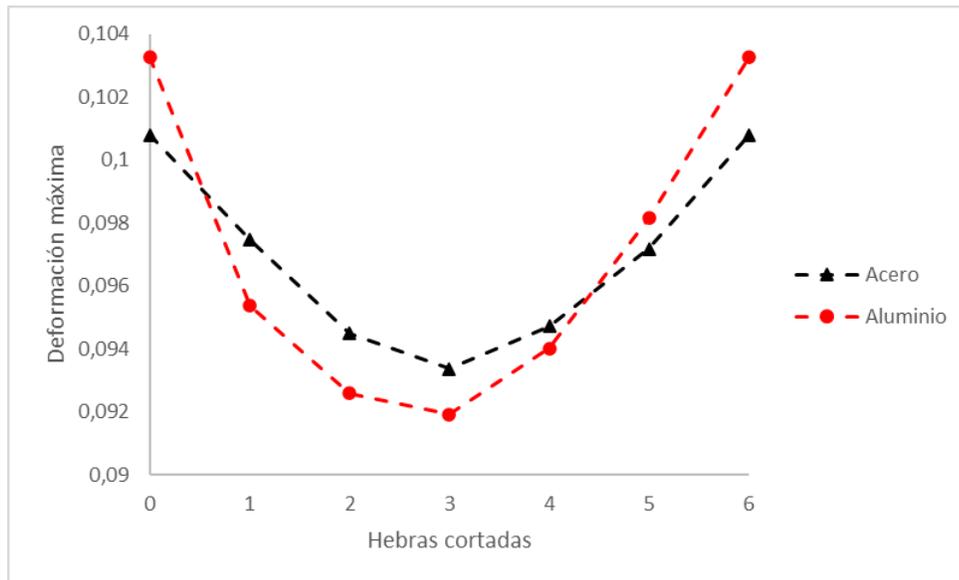


Figura 71: Comparación de deformaciones máximas para ambos metales

Observando el gráfico se puede notar que, primero, ambos materiales tienen como máximos de deformación tanto el cable virgen como la configuración que tiene seis hebras cortadas, es decir la que solo tiene el núcleo intacto, mientras que en ambos casos el mínimo se encuentra al tener tres hebras cortadas. Lo segundo que se puede apreciar, es que claramente el cable de aluminio tiene un rango mayor de deformaciones que el de acero galvanizado, marcando así las mayores y menores deformaciones máximas.

Continuando con las comparaciones, se muestra ahora un gráfico que muestra los daños en ambos materiales en la figura siguiente.

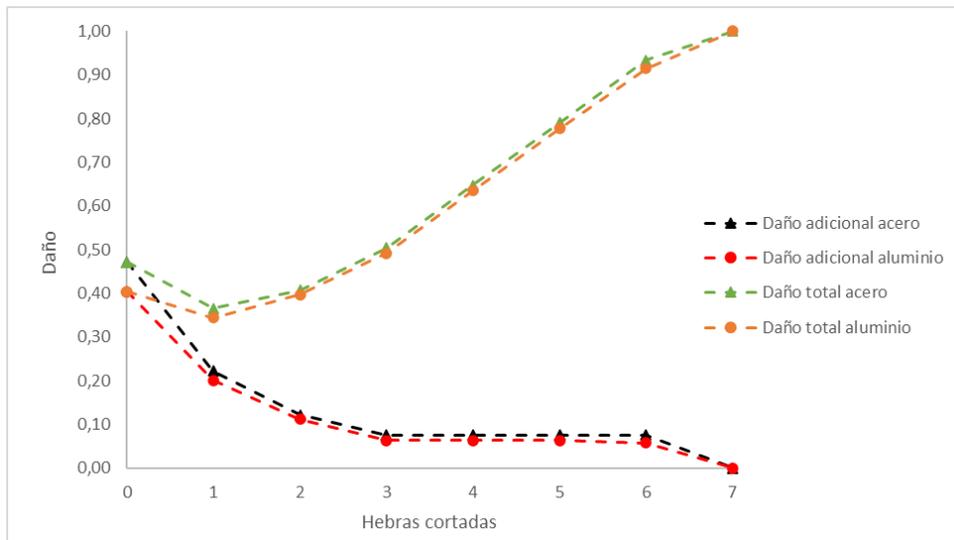


Figura 72: Comparación de daños máximos para ambos metales

De esta figura se puede destacar que claramente el acero galvanizado tiene una mayor capacidad de daño inicial dado que su daño crítico es mayor, mas no se ven mayores diferencias entre materiales pasando la configuración de una hebra cortada.

El último gráfico de este documento es el que comprara los porcentajes de energía que acumulan los cables de ambos metales bajo las diferentes configuraciones. Este gráfico final se muestra en la figura a continuación

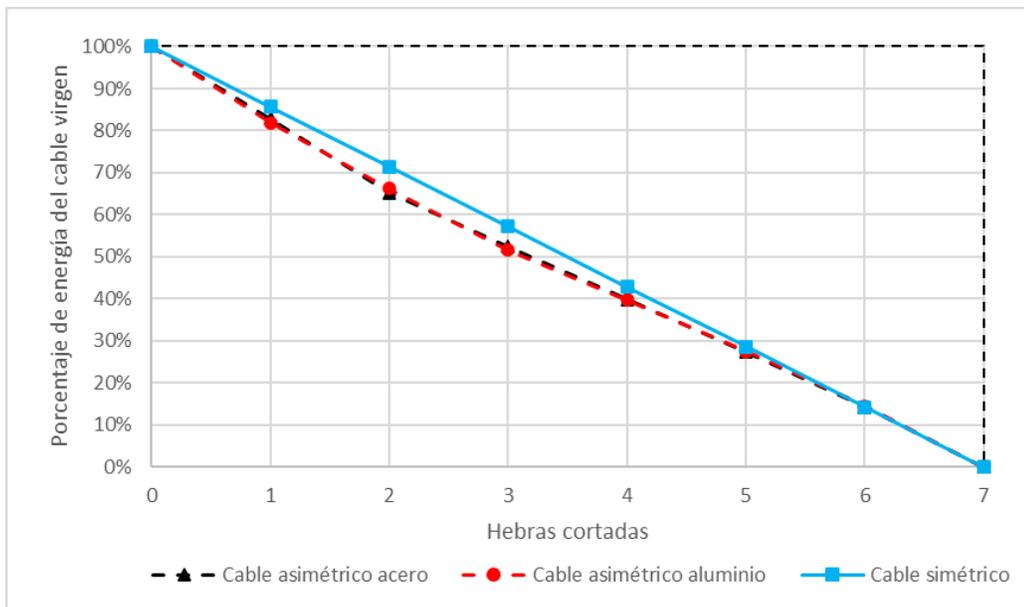


Figura 73: Comparación de energías máximas acumuladas para ambos metales

Se observa en la figura 73 que ambos metales poseen una menor acumulación de energía para configuraciones asimétricas de cables, llegando a ser proporcional al área solo en los casos del cable virgen y cuando solo queda el núcleo. Demás está decir que para siete hebras fracturadas no acumula daño porque no quedan hebras vivas.

6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

A modo de conclusiones, se puede destacar primeramente que el mejor método de aplicación para hallar el daño de un elemento sometido a tracción teniendo datos conocidos de tensión-deformación, es el método expuesto en el libro “Engineering damage mechanics” por Lemaitre & Desmorat, dado que es un método desacoplado de medir el daño, es decir, que no necesita ir modificando la curva de capacidad del material para ir encontrando el daño. Además de esto, hay más de un documento que valida dicho método.

Respecto del método propuesto en el punto 3.2 de este documento, se concluye que es un método que depende de la curvatura con la que decaen las propiedades del material, en otras palabras, de la derivada de la tensión en función de la deformación. Esto podría verse en principio como una ventaja, ya que si un elemento cambia de velocidad de decaimiento repentinamente, esto se verá reflejado en un aumento de velocidad de acumulación de daño, a diferencia del método de Lemaitre & Desmorat que es siempre una recta. El problema es que este método es incierto ya que estima mal el daño crítico y, partiendo por eso, se hacen desconfiables los resultados que entrega entre medio, debido a que si no se tiene una curva de comparación no se sabría cuando se aleja de los resultados reales.

En cuanto a los resultados en las hebras de los cables se ha podido representar lo esperado, ya que existe un gradiente de distribución de daño para una sección de cable asimétrica. Se ha podido apreciar numéricamente que las hebras que más se deforman son las más cercanas al sector de las hebras rotas. Esto, a su vez, hace que hayan hebras que llegan al daño crítico antes que otras y por lo tanto se fracturan haciendo que el cable cambie de configuración en lugar de partirse completo.

Lo mencionado en el párrafo anterior se puede contrastar con un cable virgen, donde la sección transversal sufre una deformación casi idéntica en el eje longitudinal para todas las hebras incluyendo el núcleo si es sometido a una carga de tracción. La comparación da a entender de inmediato que un cable con un área repartida equitativamente en toda su sección transversal resiste más que un cable con un área transversal asimétrica.

Se destaca además que, tal como sería esperable, el aluminio al tener mayor capacidad de deformación tiene un rango mayor de deformaciones máximas que el acero galvanizado. Además el aluminio se daña más lentamente porque tiene un decaimiento de sus propiedades más lento.

Es importante mencionar además, que se ha cumplido el objetivo de realizar una ley de acumulación de daño a partir del daño presente en cada hebra de un cable relacionando el daño con su deformación, y la deformación de cada hebra con la asimetría existente en la configuración del cable.

A partir de lo expuesto en este estudio se puede concluir que el daño máximo que puede acumular adicional al inicial cada cable de cada material, es a su vez máximo cuando se encuentra sin hebras fracturadas, debido a que en ese caso todas las hebras acumulan daño y aproximadamente todas llegan al daño crítico. Por el contrario, cuando los cables empiezan a tener hebras dañadas decae esa capacidad de acumulación de daño

adicional hasta llegar a tres hebras cortadas, donde prácticamente solo el núcleo acumula daño y la curva se aplana presentando un agotamiento de la capacidad de daño del cable, llegando así hasta la configuración de seis hebras cortadas.

Es preciso mencionar también, que mientras más hebras cortadas tiene el cable metálico, más control sobre la capacidad de acumulación de daño tiene la geometría del cable, y menos tiene el material del que está hecho.

Se destaca que el daño medido a través de la energía que acumula un cable con hebras fracturadas de forma asimétrica está entre el daño que ocurre por hebras fracturadas de forma simétrica y el daño máximo acumulable, por lo que se puede concluir que ese sería el daño inicial de un cable con configuración asimétrica. Es decir, para un cable asimétrico el daño existiría entre las curvas celeste y gris de las figuras mencionadas.

Los estudios realizados en este trabajo son aplicables para comprender la mecánica de la falla y fractura de cables metálicos así como para entender y pronosticar la forma de falla de estos cables para diferentes configuraciones. Por ejemplo es esperable que un cable virgen sometido a una deformación axial llegue a fracturarse completo al llegar a su límite de deformación máxima, pero para un cable con una hebra cortada inicial se esperaría que al llegar a su límite de deformación se le fracturen solo las dos hebras adyacentes a la faltante, quedando así con una configuración de tres hebras cortadas. Así se puede extender el análisis a las demás configuraciones.

A modo de recomendación para futuras investigaciones se podría extender este análisis a cables a diferentes cantidades de hebras totales para de esa manera extender la validez del estudio generalizando las conclusiones que se han obtenido de este estudio. Así también se podrían realizar ensayos cíclicos para comparar con los resultados de este documento. También en futuros trabajos se podría estimar la evolución de daño en forma numérica en base a modelo de daño acoplado y elementos finitos 3D.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sancho, A., Cox, M., Cartwright, T., Aldrich-Smith, G., Hooper, P., Davies, C., & Dear, J. (2016). Experimental techniques for ductile damage characterisation. Catania, Italy.
- [2] Allahverdizadeh, N., Manes, A., & Giglio, M. (2012). Identification of damage parameters for Ti-6Al-4V titanium alloy using continuum damage mechanics.
- [3] Bonora, N., Ruggiero, A., Gentile, D., & De Meo, S. (2010). Practical applicability and limitations of the elastic modulus degradation technique for damage measurements in ductile metals. Cassino, Italy.
- [4] Bravo, T. Numerical simulation of the static response of damaged cables: Cable beam element formulation (Spanish). MSc thesis, 2018, University of Chile, Chile.
- [5] Wahid, A., Mouhib, N., Kartouni, A., Chakir, H., & ELghorba, M. (2019). Energy method for experimental life prediction of central core. Casablanca, Morocco.
- [6] Núñez, F. (2018). Influencia de la distribución del daño en curvas de capacidad de cables: análisis experimental. Universidad de Chile, Chile.
- [7] De Vico, E. (2013). Efectos de la distribución asimétrica de daño en la sección transversal de un cable: modelación numérica. Universidad de Chile, Chile.
- [8] Silva, I. (2017). Análisis de cables superficialmente dañados en forma asimétrica con geometría multicapa: modelos numéricos en elementos finitos. Universidad de Chile, Chile.
- [9] Mamiya, T., Kakisawa, H., Liu, W., Zhu, S., & Kagawa, Y. (2002). Tensile damage evolution and notch sensitivity of Al₂O₃ fiber-ZrO₂ matrix minicomposite-reinforced Al₂O₃ matrix composites. Tokio.
- [10] Jenkins, M. (s.f.). Damage evolution and damage tolerance in ceramic matrix composites: empirical measurements and analytical/numerical modeling. Washington.
- [11] Anduquia, J., Narváez, C., & Rodríguez, R. (2018). Computational and numerical analysis of ductile damage evolution under a load-unload tensile test in dual-phase steel.
- [12] Bonora, N. (1997). On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model.
- [13] Luccioni, B. (2003). Mecánica del daño continuo. Barcelona, España.
- [14] Bonora, N. (1997). A nonlinear CDM model for ductile failure. Cassino, Italia.
- [15] Lemaitre, J., & Desmorat, R. (s.f.). Engineering damage mechanics. Cachan, Francia.
- [16] Celentano, D., & Chaboche, J.-L. (2007). Experimental and numerical characterization of damage evolution in steels.
- [17] Reddy, S. (2008). Damage characterization of four wrought aluminum alloys. Tennessee.
- [18] Foster, G.P. "Advantages of fiber rope over wire rope". Journal of Industrial Textile, 2002; pp: 67-75.
- [19] McKenna, H.A., Hearle, J.S.W., O'Hear, N. "The Handbook of fibre rope technology". Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd.; 2004, Chapter 9, "Inspection and Retirement", 2004.
- [20] Chaplin, C.R. "The fatigue and degradation mechanisms of hoisting ropes". In: Hoist and Haul Conference, Perth, Australia; 2005.

ANEXO 1

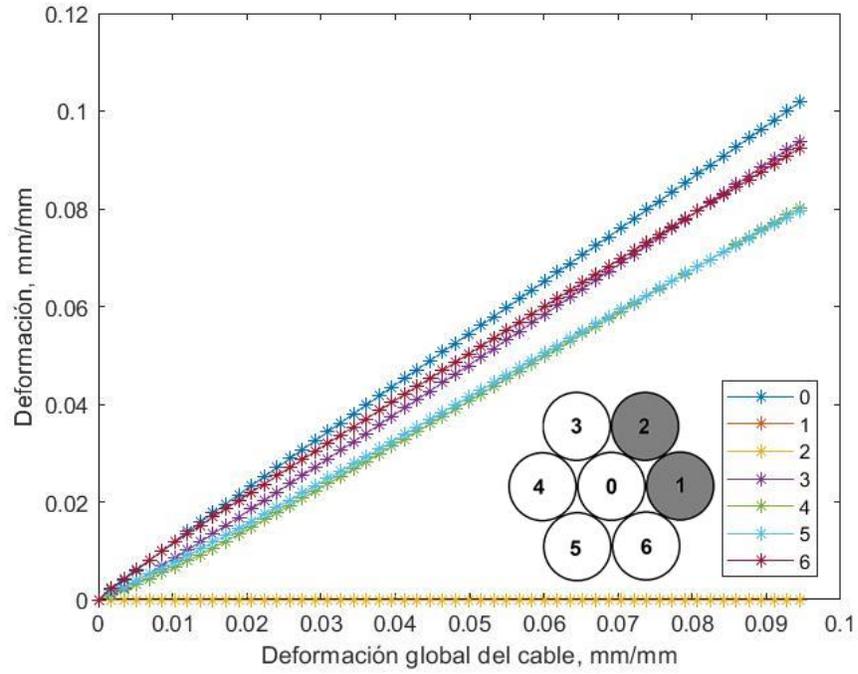


Figura 74: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 2 hebras rotas

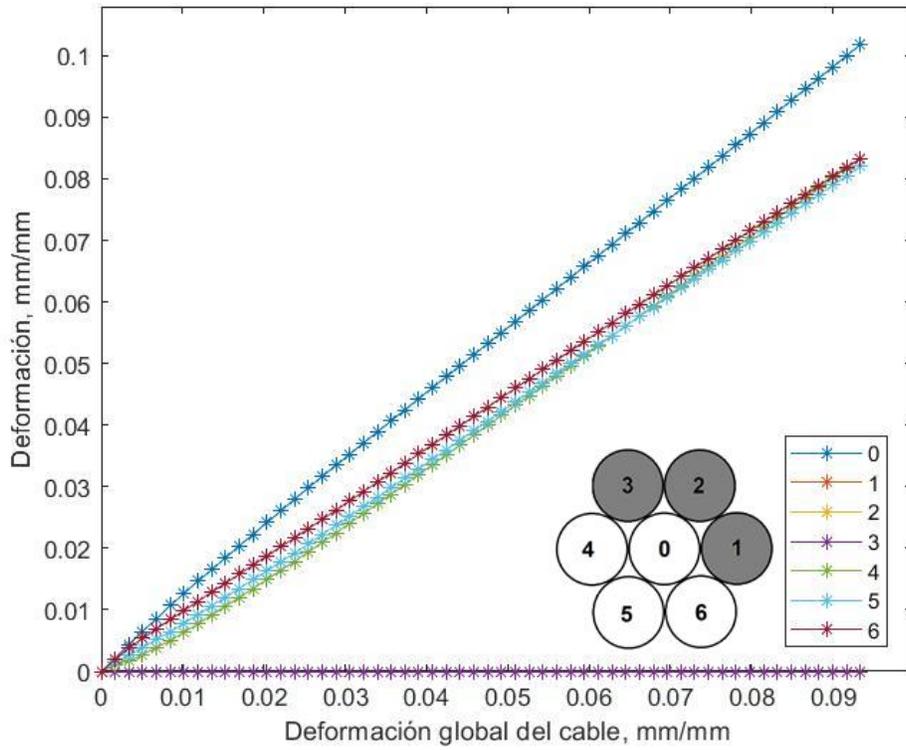


Figura 75: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 3 hebras rotas

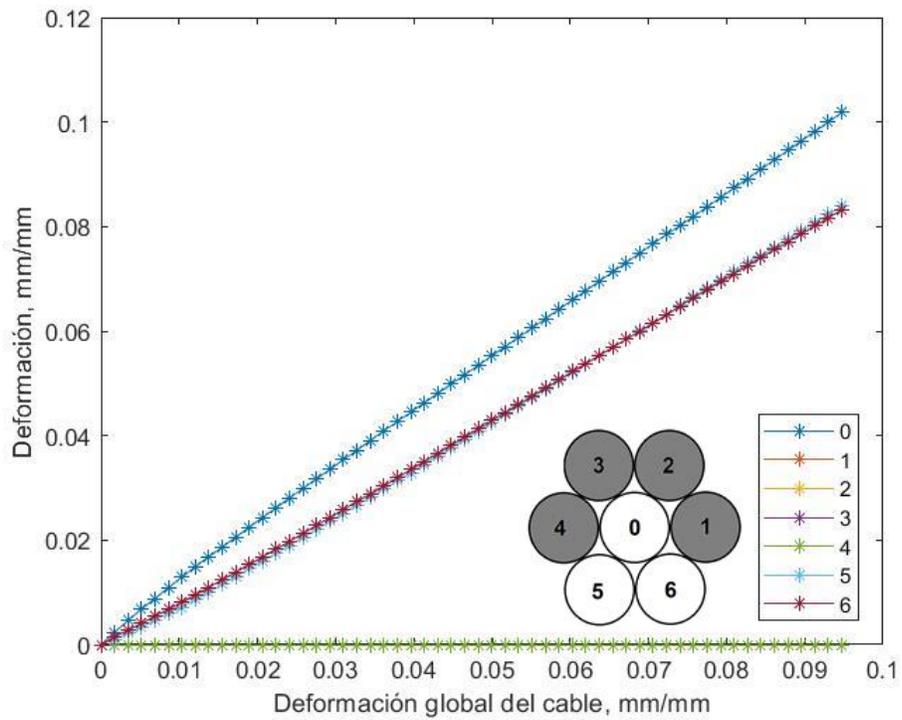


Figura 76: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 4 hebras rotas

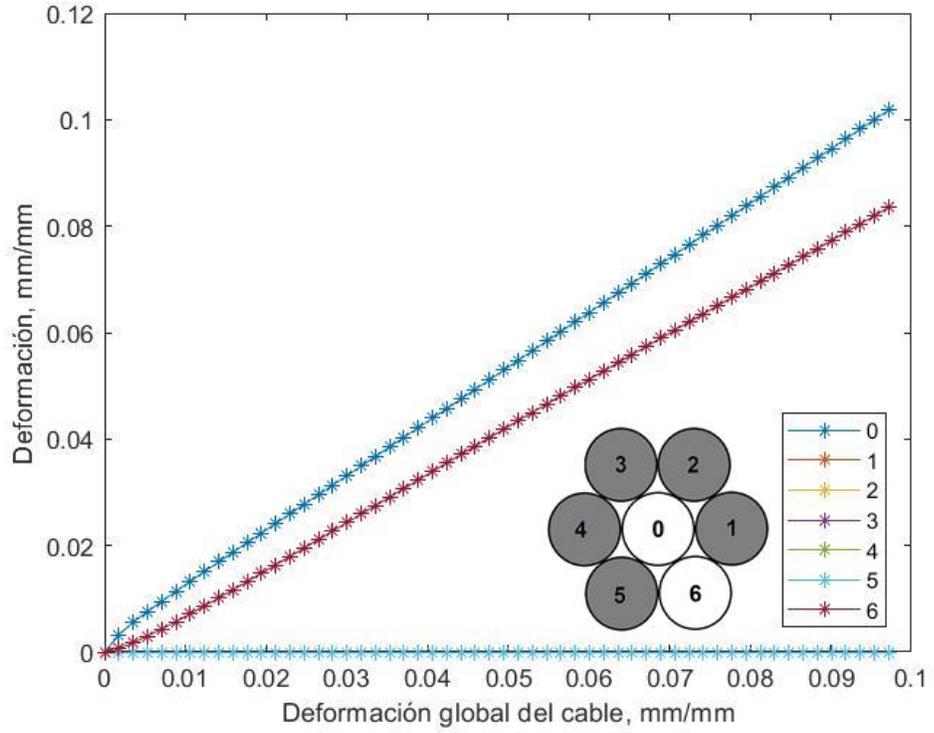


Figura 77: Deformación de hebras en función de deformación del cable para acero con 5 hebras rotas

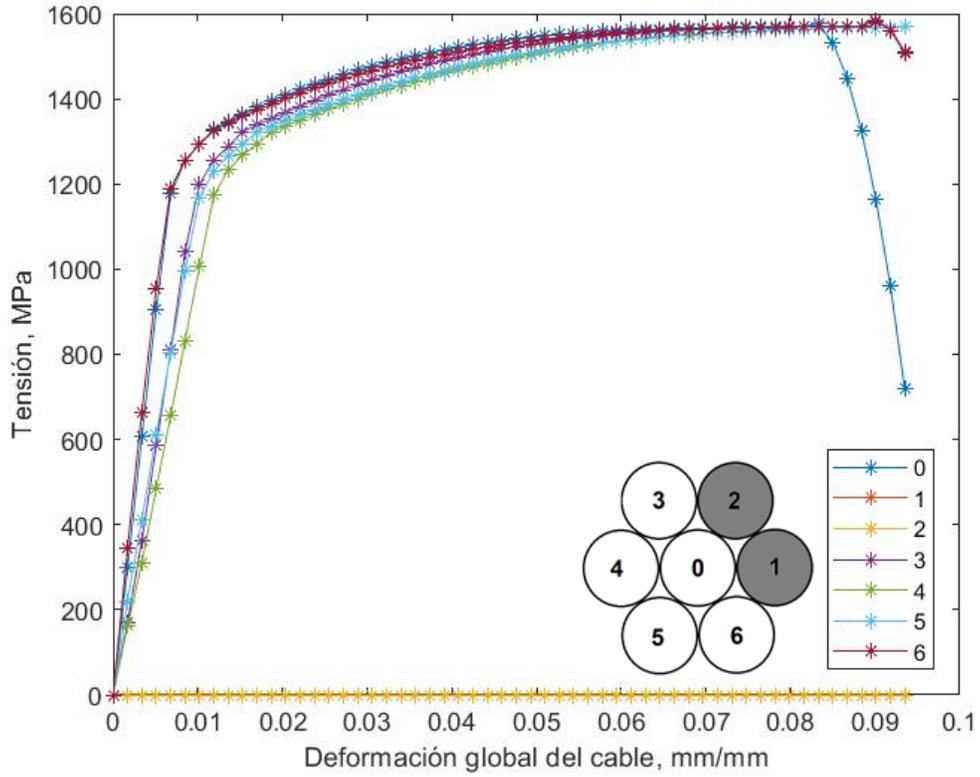


Figura 78: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 2 hebras rotas

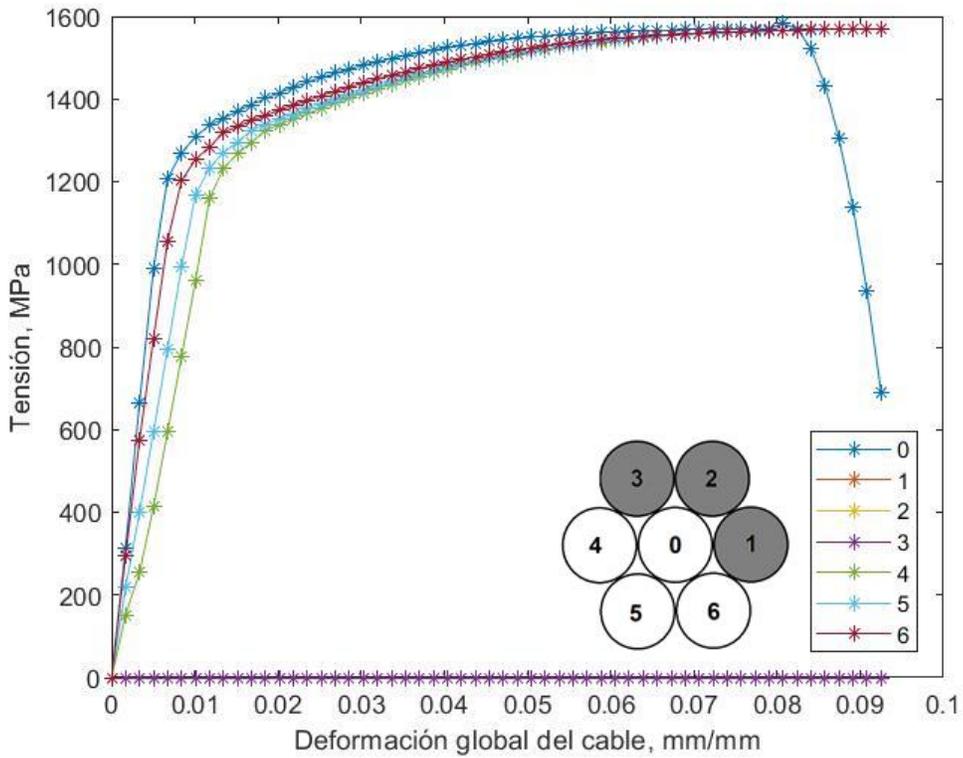


Figura 79: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 3 hebras rotas

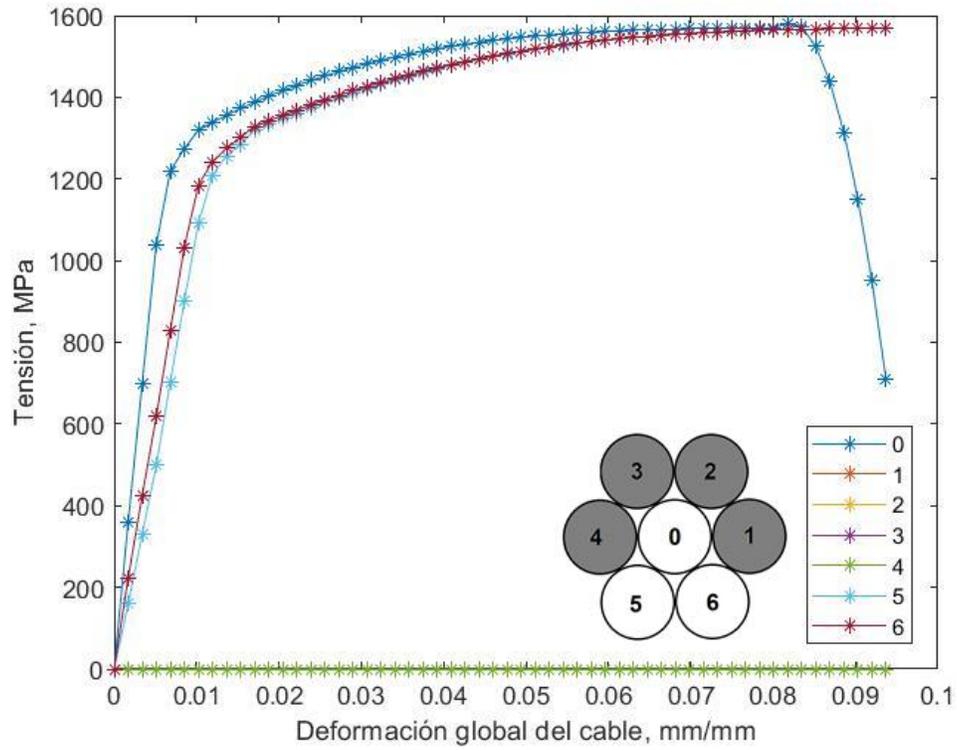


Figura 80: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 4 hebras rotas

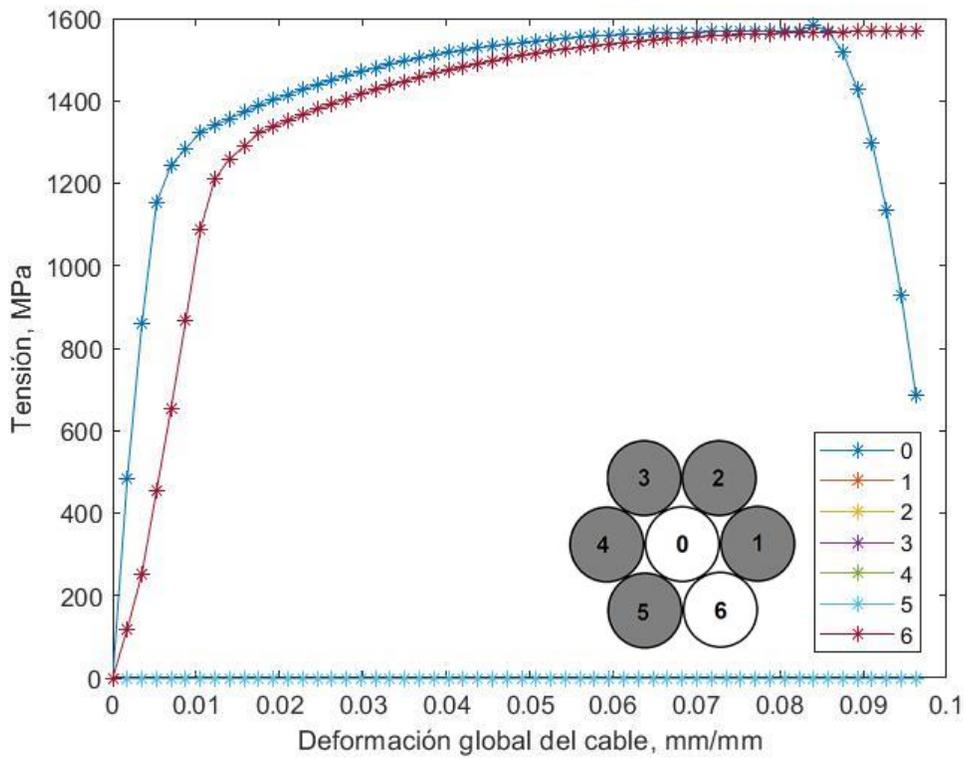


Figura 81: Tensión de hebras en función de deformación del cable para acero con 5 hebras rotas

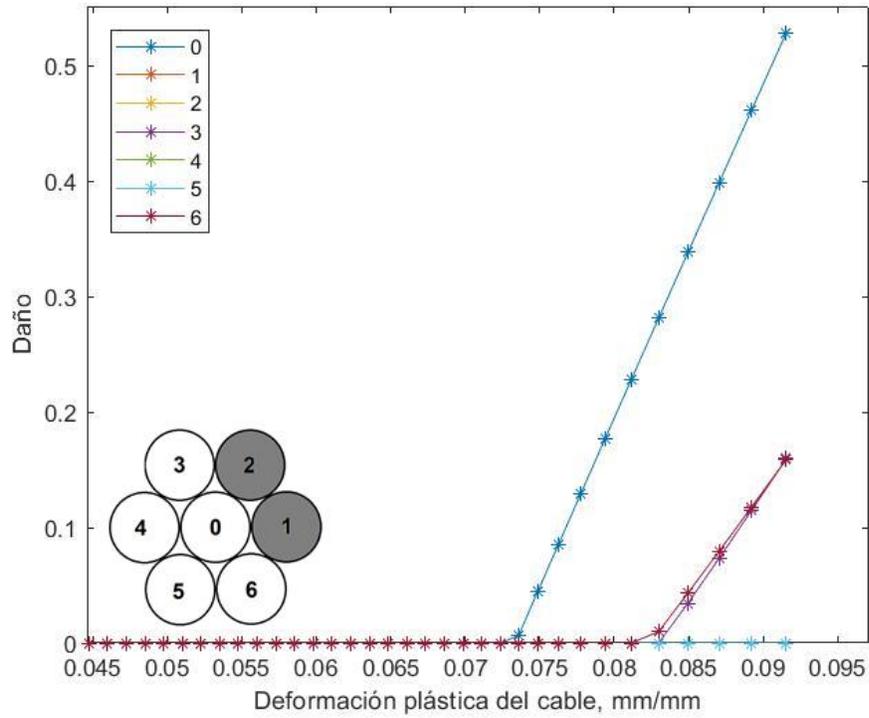


Figura 82: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 2 hebras rotas

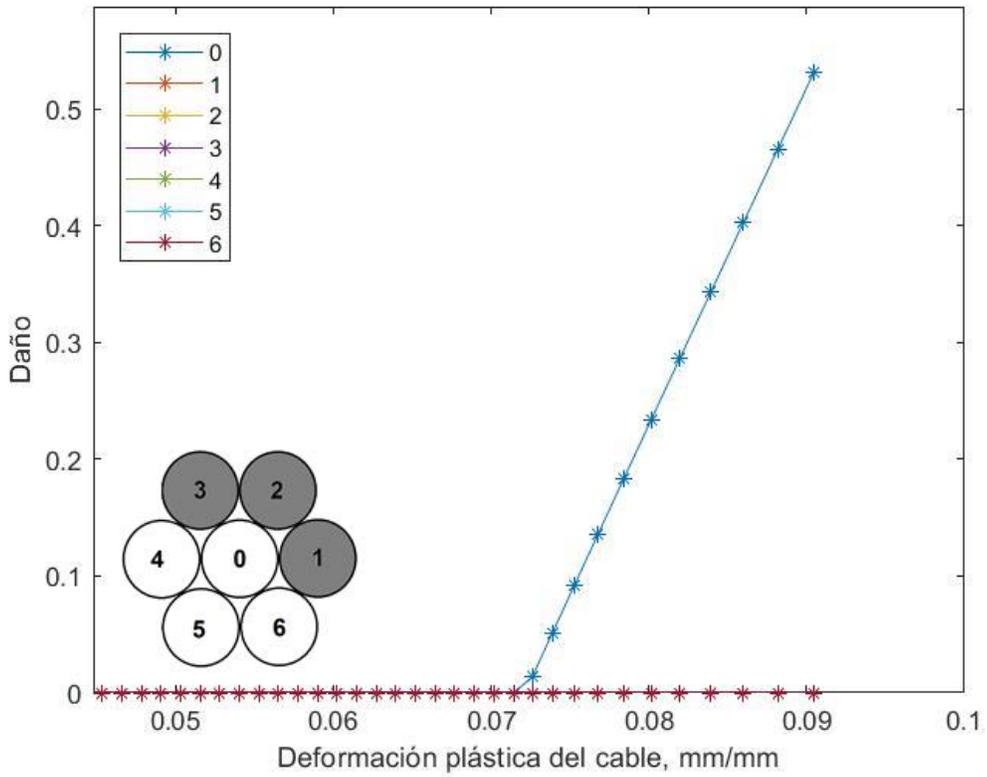


Figura 83: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 3 hebras rotas

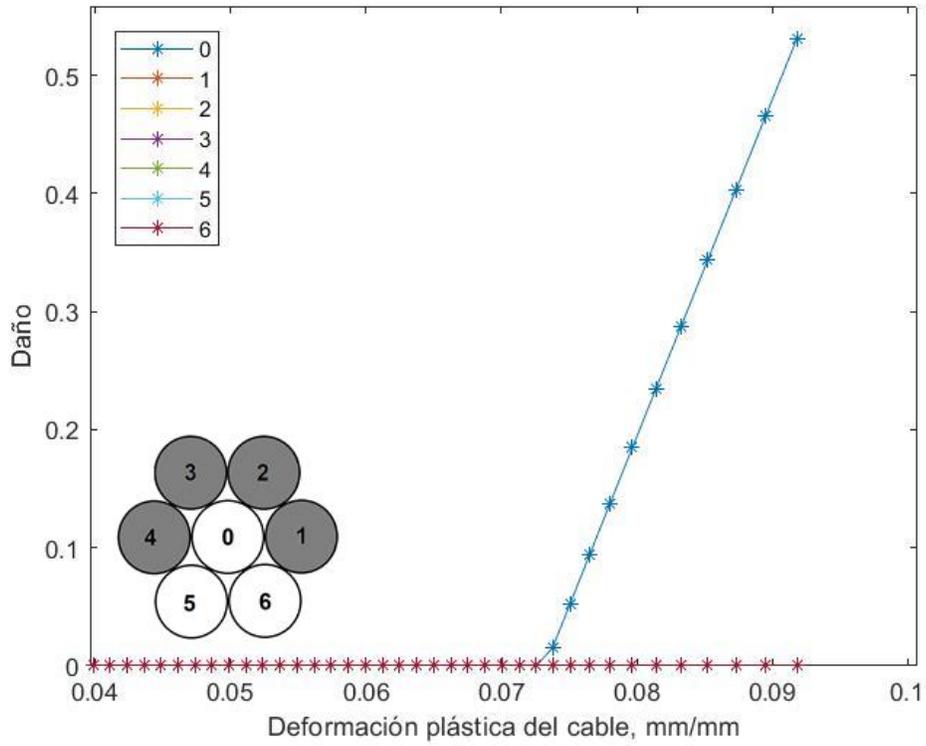


Figura 84: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 4 hebras rotas

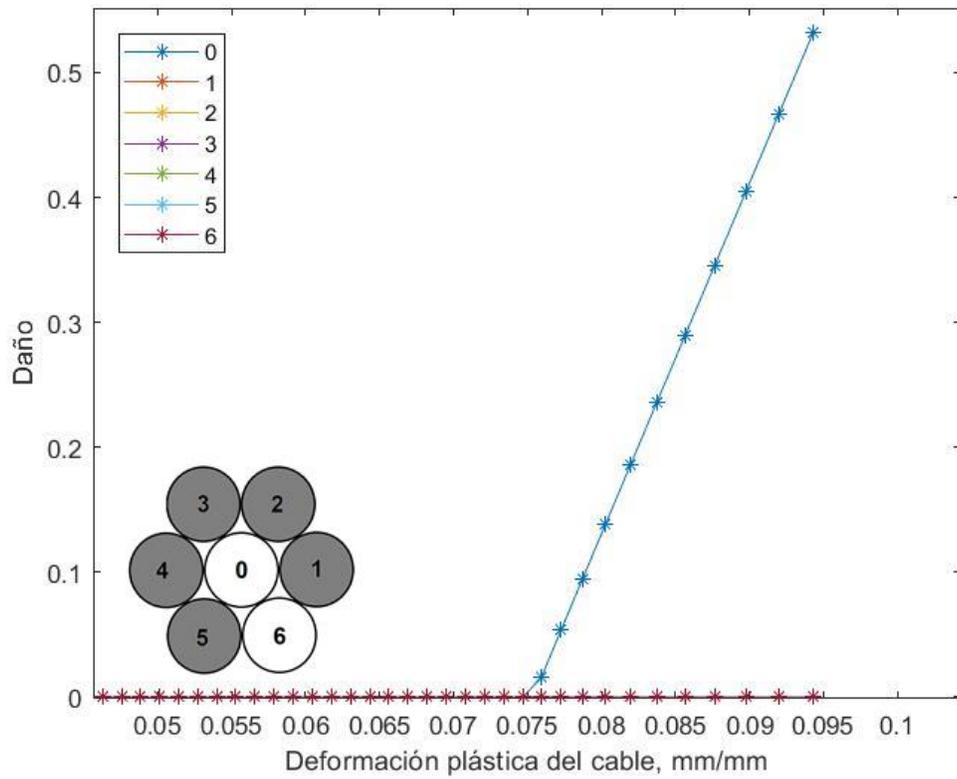


Figura 85: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para acero con 5 hebras rotas

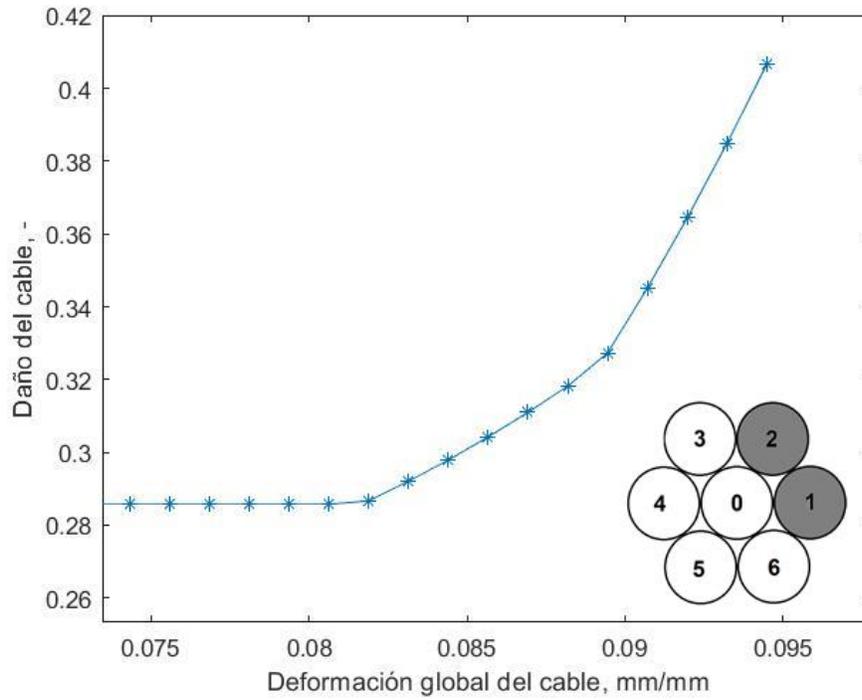


Figura 86: Daño total en función de deformación del cable para acero con 2 hebras rotas

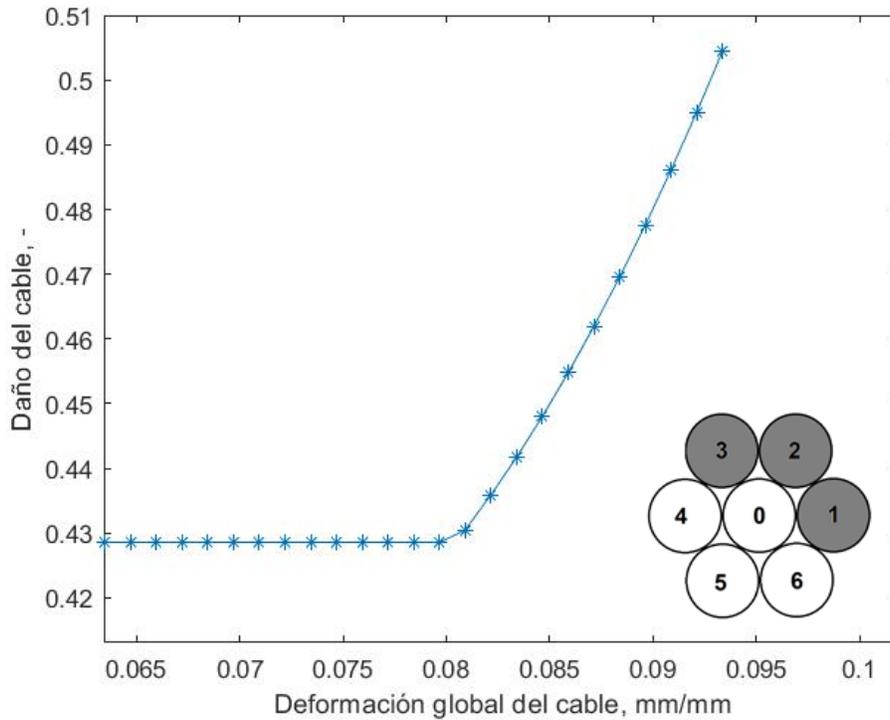


Figura 87: Daño total en función de deformación del cable para acero con 3 hebras rotas

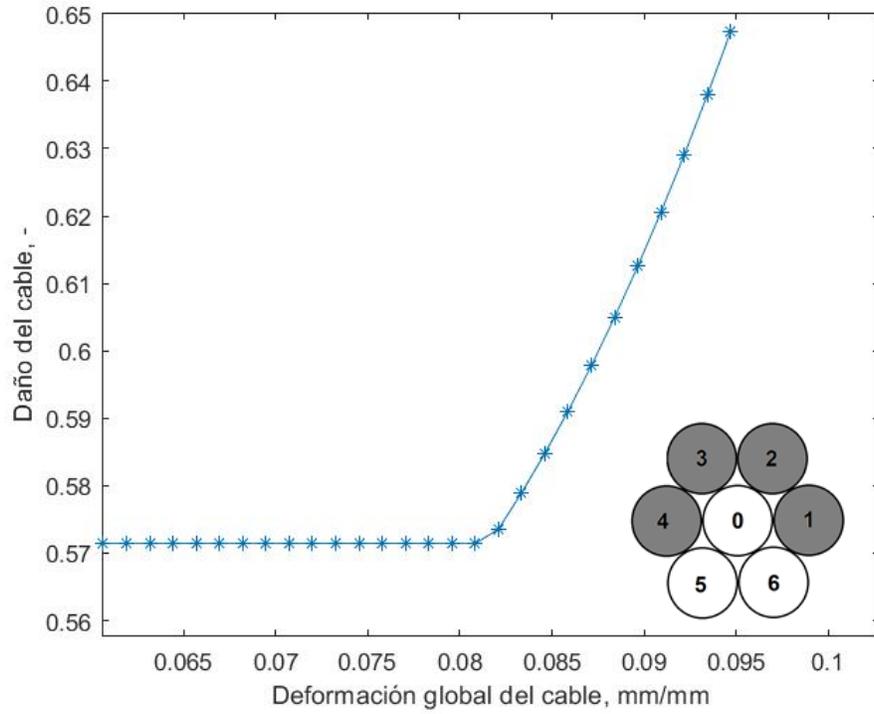


Figura 88: Daño total en función de deformación del cable para acero con 4 hebras rotas

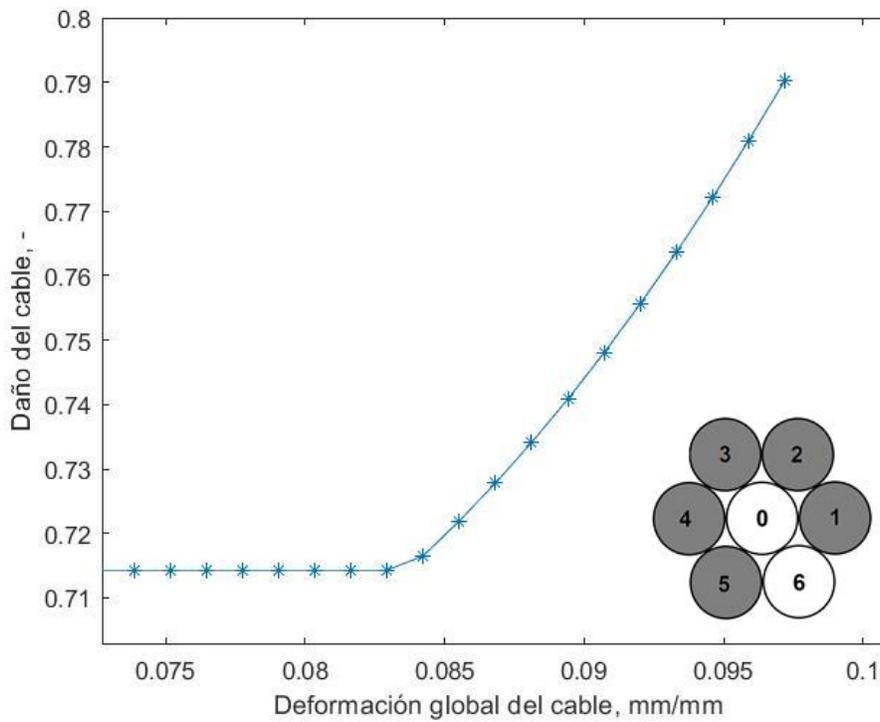


Figura 89: Daño total en función de deformación del cable para acero con 5 hebras rotas

ANEXO 2

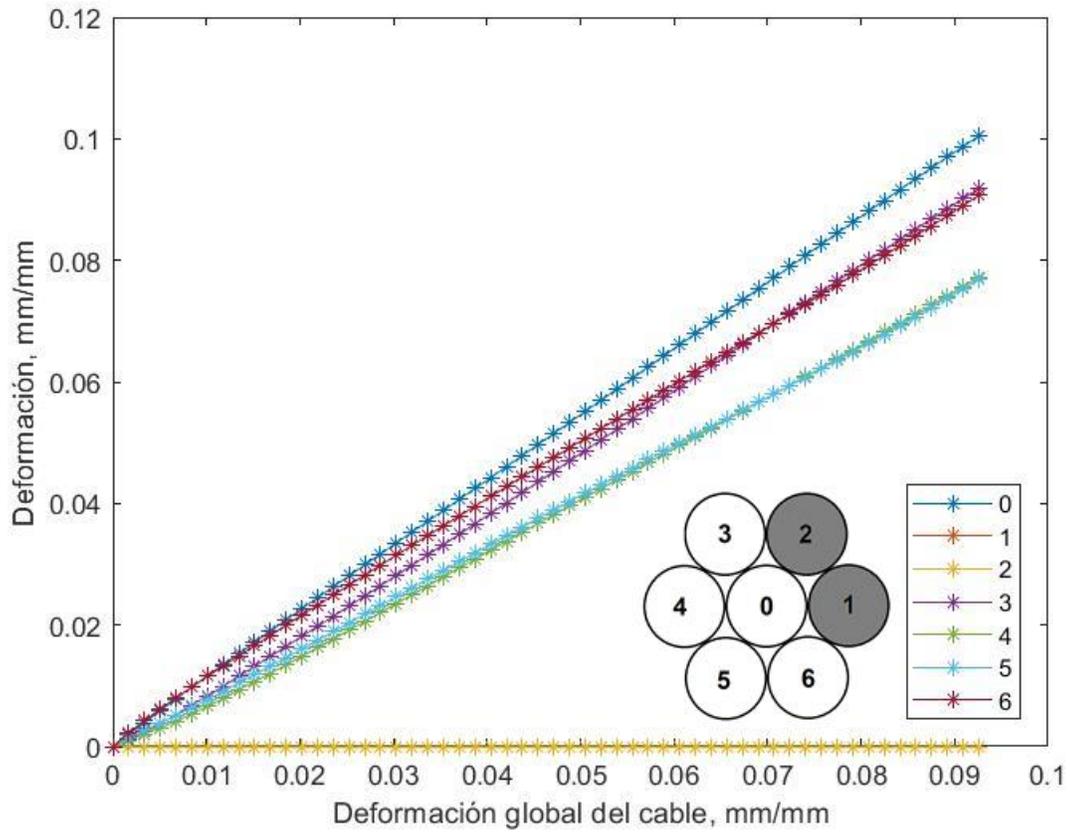


Figura 90: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 2 hebras rotas

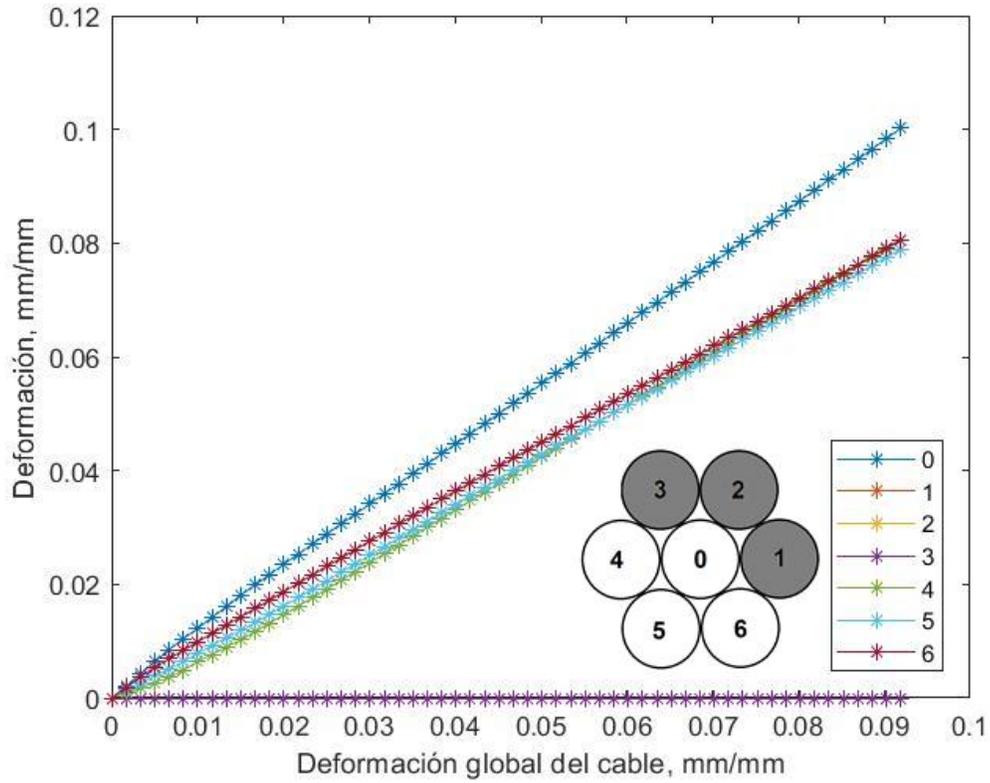


Figura 91: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 3 hebras rotas

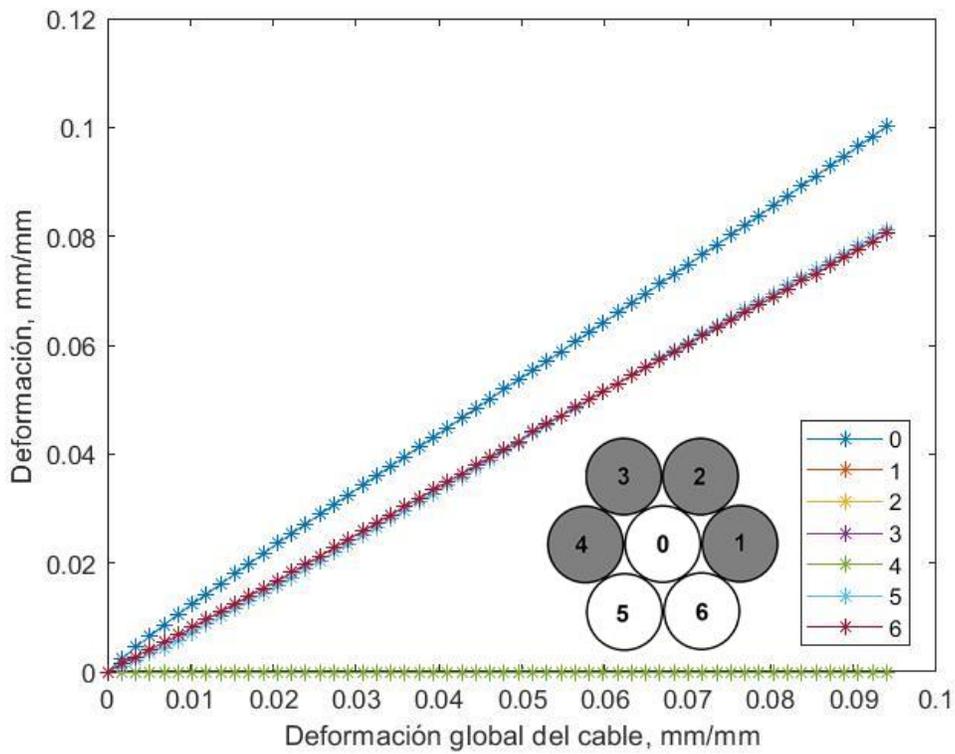


Figura 92: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 4 hebras rotas

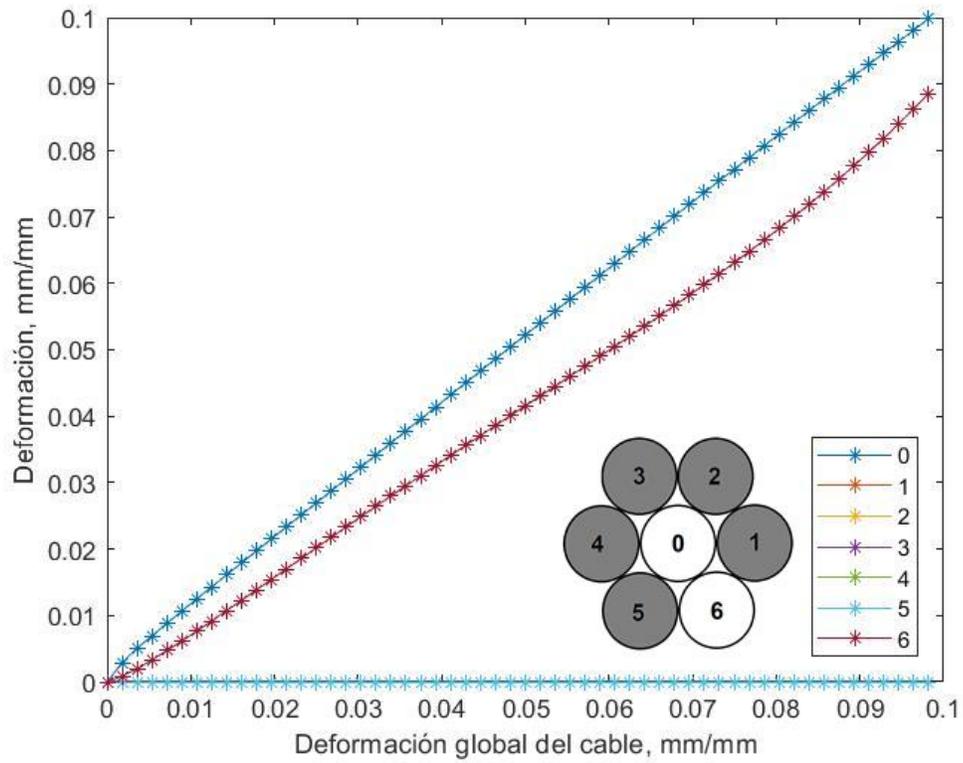


Figura 93: Deformación de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 5 hebras rotas

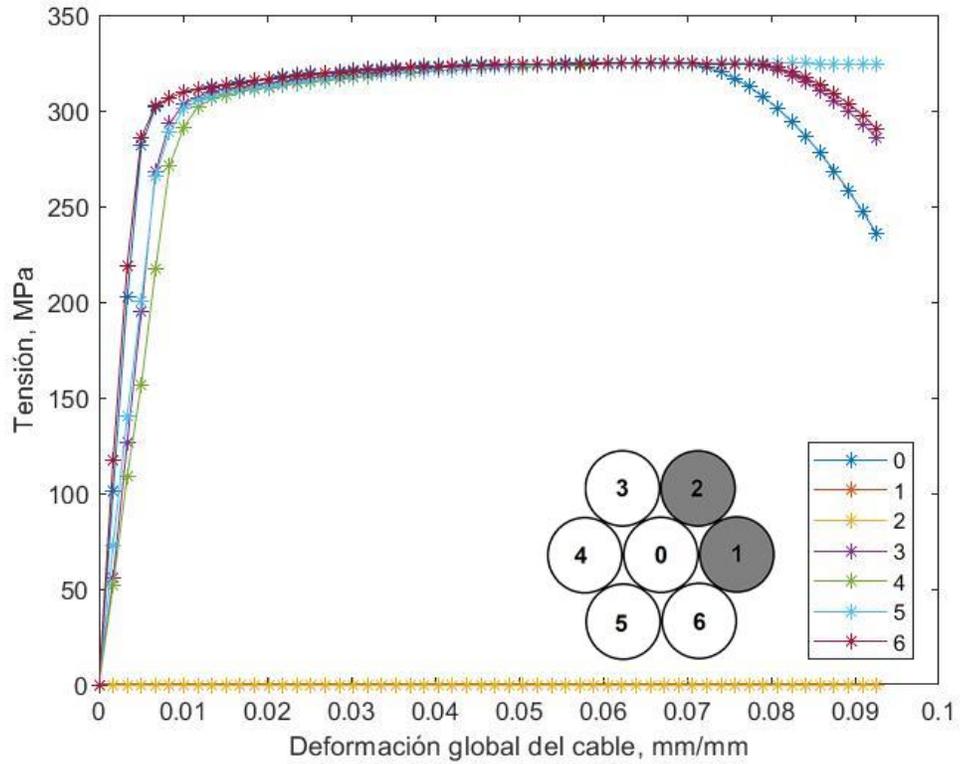


Figura 94: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 2 hebras rotas

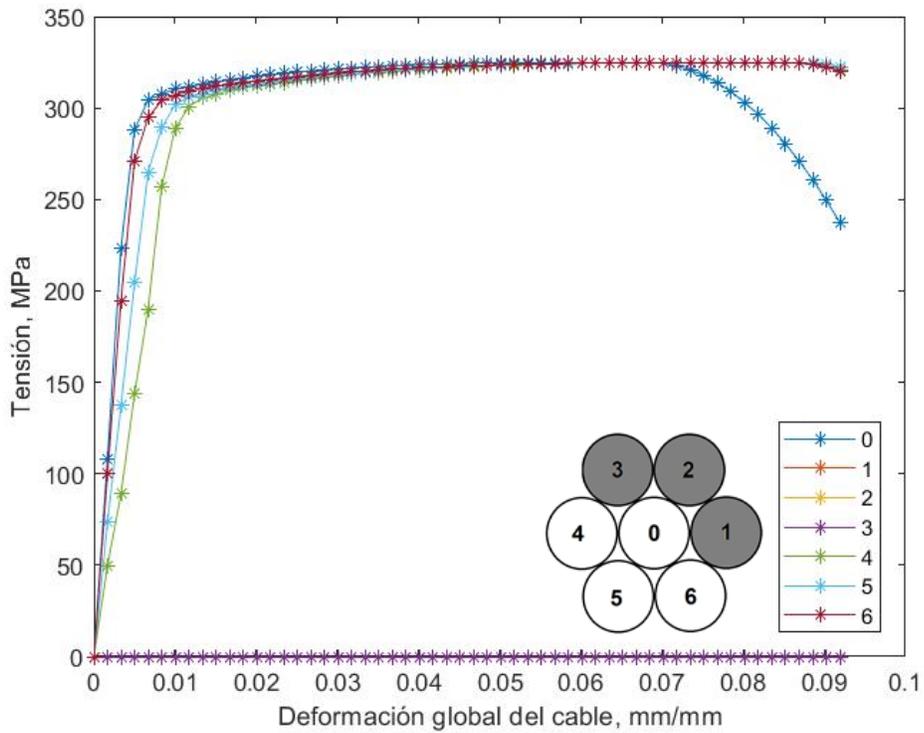


Figura 95: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 3 hebras rotas

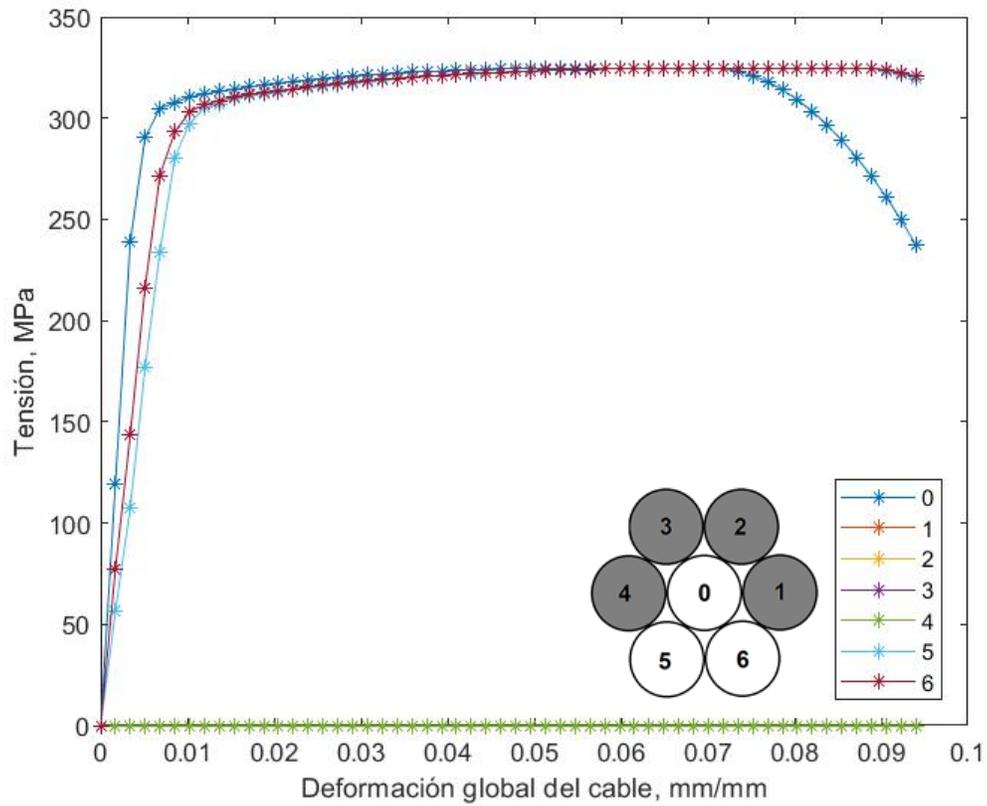


Figura 96: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 4 hebras rotas

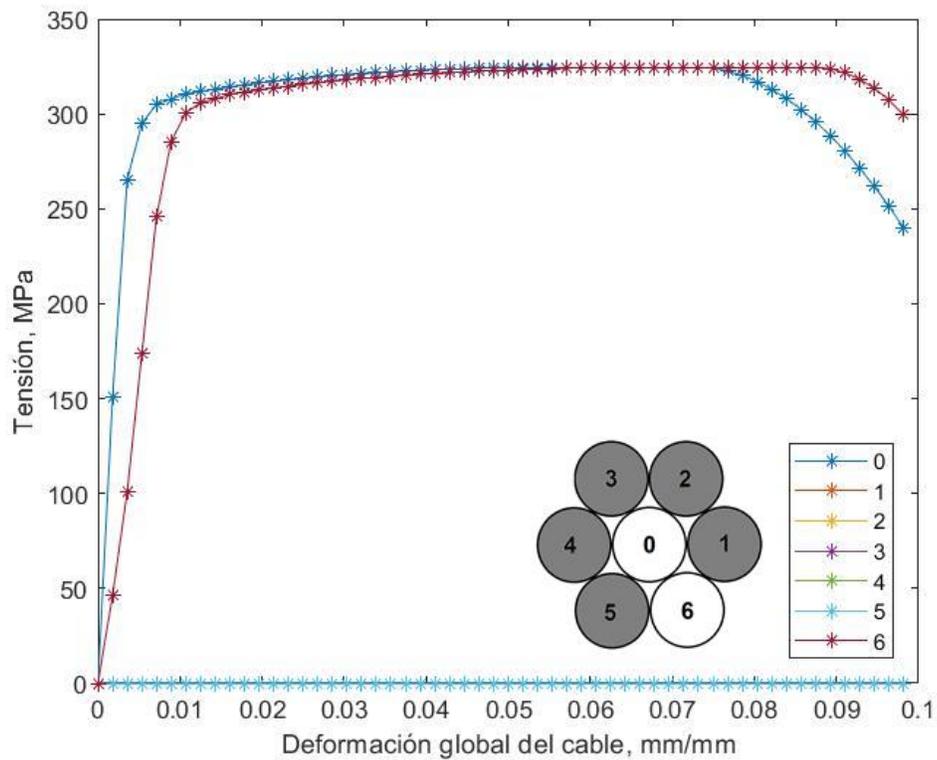


Figura 97: Tensión de hebras en función de deformación del cable para aluminio con 5 hebras rotas

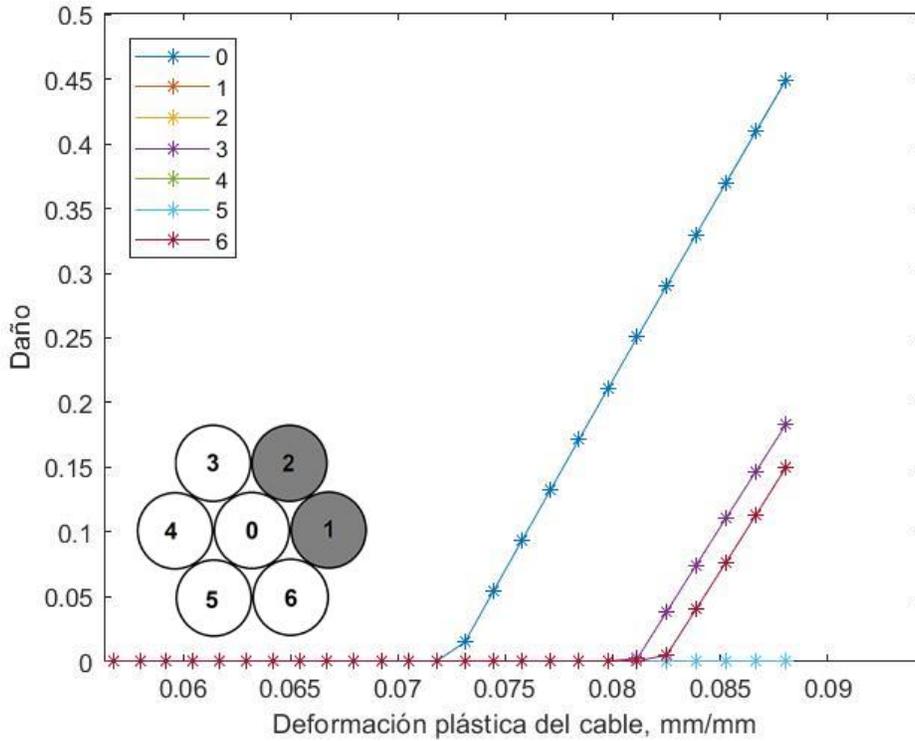


Figura 98: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 2 hebras rotas

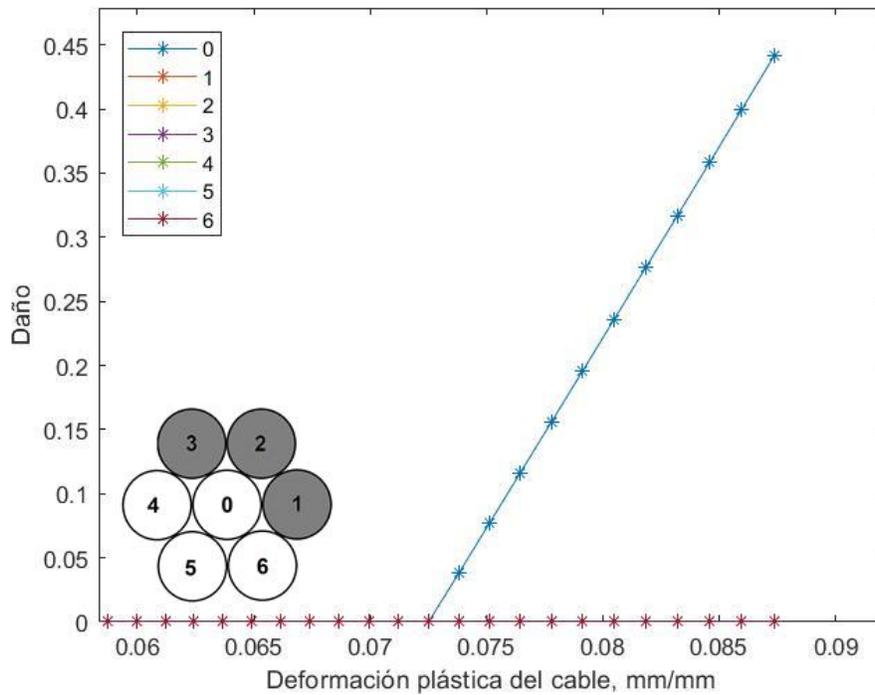


Figura 99: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 3 hebras rotas

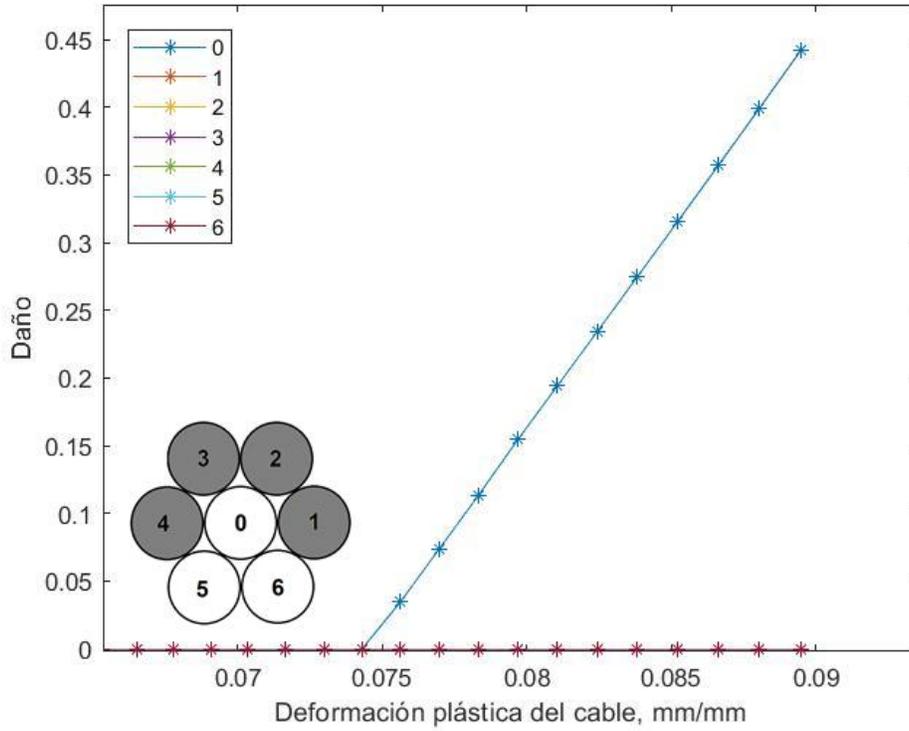


Figura 100: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 4 hebras rotas

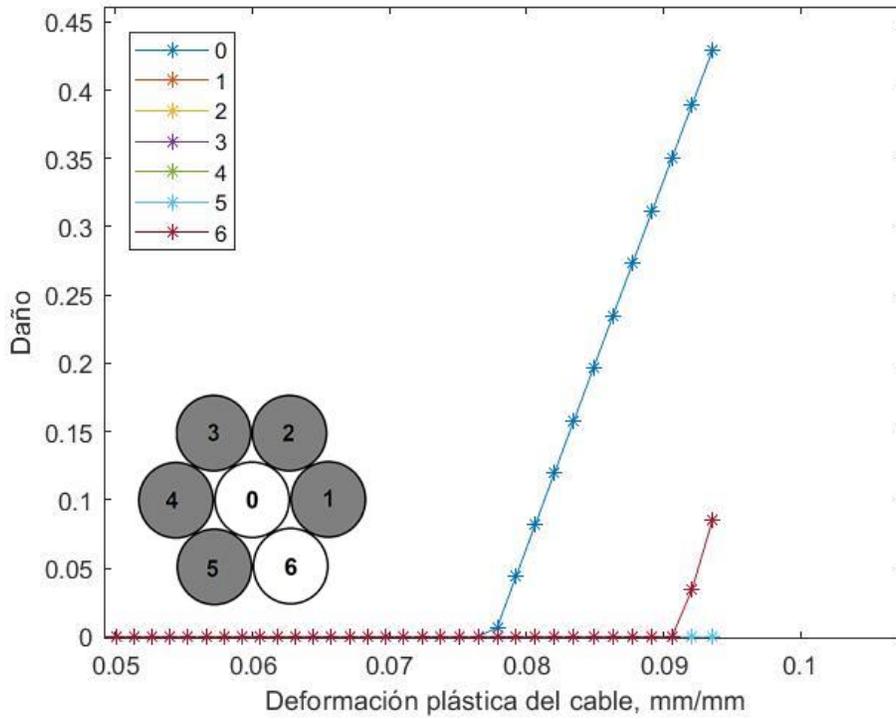


Figura 101: Daño de hebras en función de deformación plástica del cable para aluminio con 5 hebras rotas

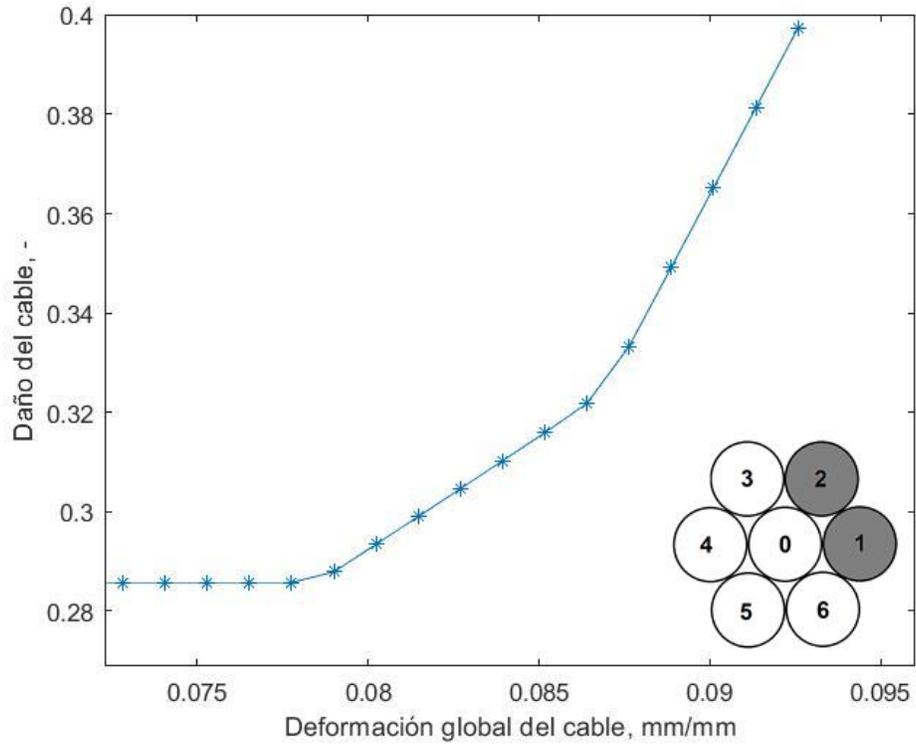


Figura 102: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 2 hebras rotas

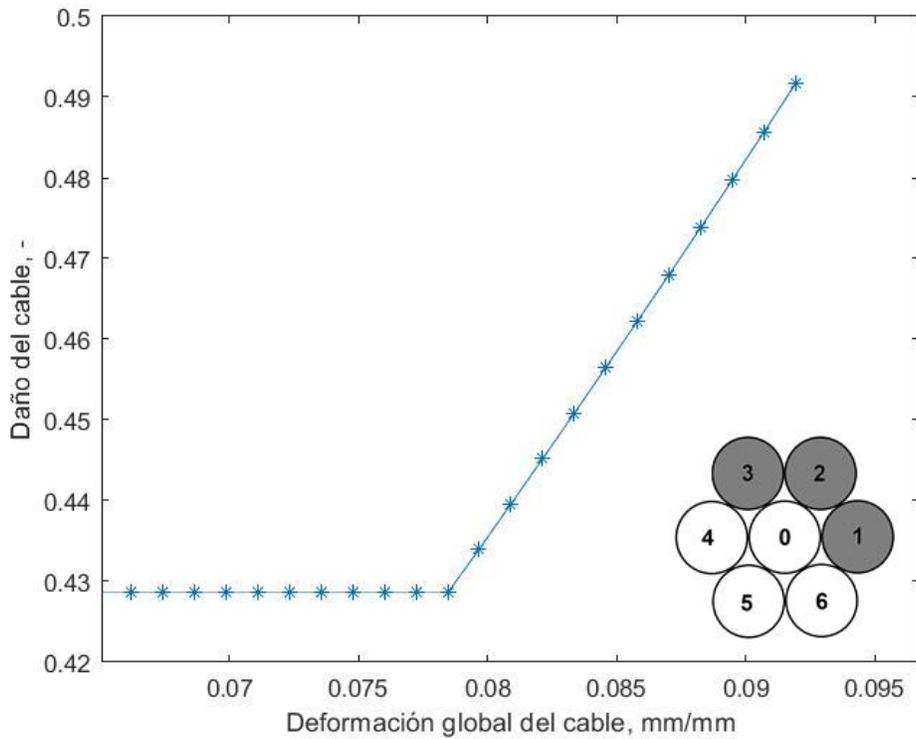


Figura 103: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 3 hebras rotas

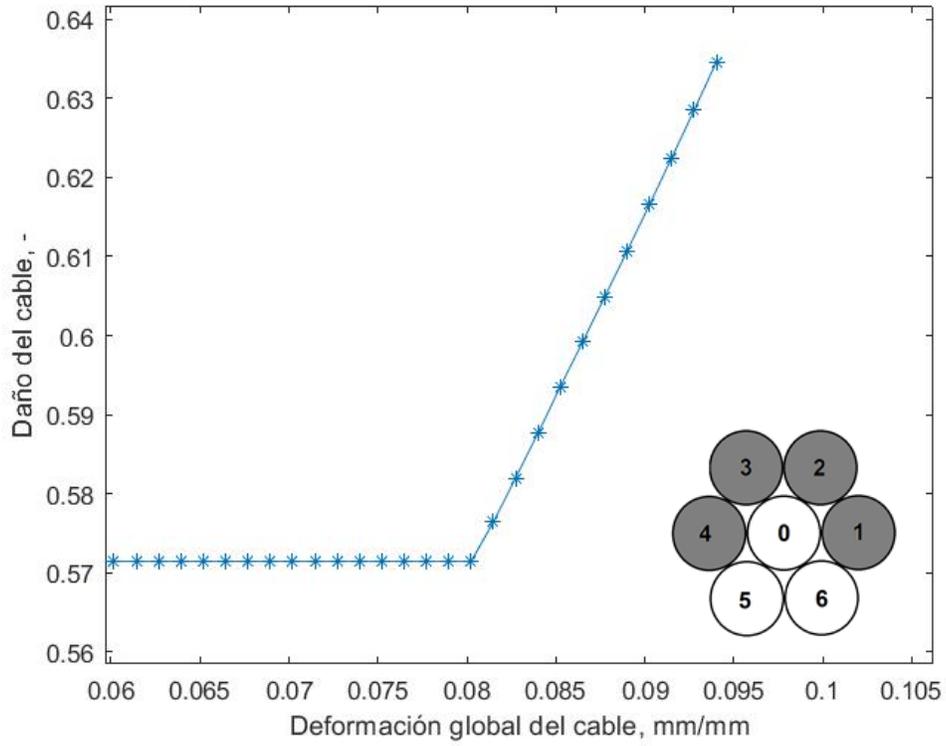


Figura 104: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 4 hebras rotas

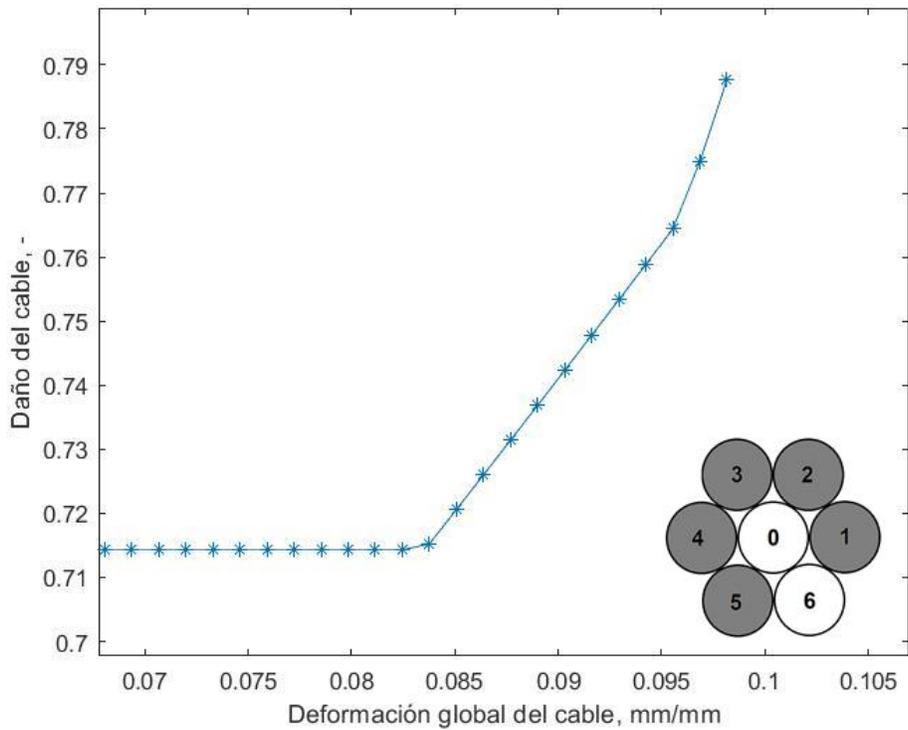


Figura 105: Daño total en función de deformación del cable para aluminio con 5 hebras rotas