



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

**PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL
DAÑO EN CABLES DE METALES DÚCTILES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JOSÉ MIGUEL ENRIQUE CAMUS ROJAS

PROFESOR GUÍA:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VIVIANA ISABEL MERUANE NARANJO
RICARDO HERRERA MARDONES

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DEL TRABAJO DE TÍTULO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA
POR: **JOSÉ MIGUEL ENRIQUE CAMUS ROJAS**
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL DAÑO EN CABLES DE METALES DÚCTILES

En el presente trabajo se estudia la evolución del daño plástico dúctil en la respuesta estática de cables metálicos. Esta evolución se determina, mediante la utilización de modelos numéricos y datos experimentales de ensayos de capacidad de alambres de acero y aluminio que forman los cables en estudio. Dos tipos de modelos numéricos son considerados: (i) simulaciones 3D en base a elementos finitos que permite obtener la evolución de daño de un alambre en función de la deformación plástica utilizando el modelo de degradación no lineal de Gurson-Tvergaard-Needleman y (ii) modelo mecánico en base a una viga Bernoulli no lineal que permite determinar la respuesta de cables inicialmente intactos y pre-dañados (presencia de alambres superficiales fracturados). Los análisis numéricos consideran cables de construcción 1×7 con diámetros que varían entre $9.5 [mm]$ y $14.3 [mm]$ con distribución de alambres superficiales fracturados asimétricamente. Los resultados del estudio indican que la disminución de la capacidad de un cable de desarrollar daño plástico dúctil depende fuertemente del número y distribución de alambres fracturados en superficie, análisis que permitiría establecer criterios de reemplazo de cables pre-dañados. Resultados preliminares de este estudio señalan que, para los cables estudiados, el número de alambres superficiales fracturados permitidos son dos.

Tabla de Contenido

1	Introducción: cables dúctiles inicialmente dañados	1
2	Antecedentes: sobre el daño dúctil y sus modelos	3
2.1	Cable	3
2.1.1	Estructura de un cable	3
2.1.2	Generalización de la estructura de un cable	4
2.1.3	Daño en un cable	5
2.2	Ensayo de tracción	6
2.2.1	Ley esfuerzo-deformación ingenieril	6
2.2.2	Dimensión de la probeta	7
2.2.3	Reducción de área	8
2.2.4	Razón de radios en la estricción	9
2.2.5	Esfuerzo y deformación último de fractura	9
2.2.6	Endurecimiento	9
2.2.7	Ensayo dúctil	9
2.3	Ley esfuerzo-deformación real	11
2.3.1	Modelo de Hockett-Sherby	13
2.3.2	Corrección de Bridgman	14
2.4	Daño dúctil	15
2.4.1	Evolución del daño dúctil	16
2.4.2	Medición del daño	17
2.4.2.1	Módulo de elasticidad	17
2.4.2.2	Módulo secante	19
2.5	Modelo de daño de Gurson–Tvergaard-Needleman	20
2.5.1	Ley real sin daño	21
2.5.2	Criterio de fluencia de Von Mises[32]	21
2.5.3	Criterio de fluencia del MDGTN [34][24][40]	22
2.5.4	Parámetros del MDGTN	23
2.5.4.1	Parámetros constitutivos	23
2.5.4.2	Parámetros del material	23
2.5.5	Daño en el MDGTN [40]	24
2.6	Modelo de daño continuo de Bonora[37]	25
2.7	Modelo de daño dúctil de Lemaitre [18]	26
2.8	Daño dúctil en cables	27
2.8.1	Daño de Miner[6]	28

2.8.2	Daño de Ye Duyi[26]	28
3	Datos experimentales: ensayos de tracción	31
3.1	Cables	31
3.2	Ensayo de tracción de los alambres	31
3.2.1	Probetas	31
3.2.2	Ley de ingeniería experimental	33
3.2.3	Propiedades mecánicas	34
4	Procedimiento numérico: estimación de la evolución del daño dúctil	35
4.1	Modelo de elementos finitos	36
4.1.1	Propiedades de los materiales	36
4.1.2	Geometría	36
4.1.3	Condiciones de borde	37
4.1.4	Mallado	38
4.1.5	Configuraciones de análisis	38
4.2	Ley real del MHS	39
4.2.1	Ley real sin daño	40
4.3	Modelo de daño del MDGTN	41
4.3.1	Ajuste de los parámetros constitutivos	42
4.3.2	Ajuste de los parámetros del material	42
4.4	Ley de daño ingenieril de los alambres	42
4.4.1	Ajuste a él MDB	43
4.5	Ley ingenieril de los cables	44
4.6	Ley de daño ingenieril de los cables	44
5	Resultados: leyes de daño dúctil en cables dañados	45
5.1	Modelo del MHS	45
5.1.1	Parámetros del MHS	45
5.1.2	Ley real del MHS	45
5.1.3	Ley ingenieril MEF	46
5.1.4	Ley real sin daño	47
5.2	Modelo de daño del MDGTN	48
5.2.1	Ajuste de los parámetros constitutivos	48
5.2.2	Ajuste de los parámetros del material	51
5.3	Ley de daño ingenieril de los alambres	53
5.3.1	Ajuste de los parámetros constitutivos	53
5.3.2	Ajuste de los parámetros del material	55
5.3.3	Ajuste a el MDB	57
5.3.4	Ley de daño ingenieril	57
5.4	Ley ingenieril de los cables	58
5.5	Ley de daño ingenieril de los cables	59
5.6	Ley de daño ingenieril extrapolada	63
5.6.1	Ley de ingeniería extrapolada de los alambres	63
5.6.2	Ley de daño ingenieril extrapolada	64
5.7	Ley ingenieril de los cables extrapolada	65

5.8	Ley de daño ingenieril de los cables extrapolada	66
6	Discusiones: modelos elastoplasticos, de daño y la evolución del daño en cables de metales dúctiles	71
6.1	Modelo del MHS	71
6.1.1	Parámetros del MHS	71
6.1.2	Ley real del MHS	71
6.1.3	Ley ingenieril del MHS	75
6.2	Modelo de daño del MDGTN	76
6.3	Ley de daño ingenieril de los alambres	77
6.3.1	Ley de daño MDB	81
6.4	Ley ingenieril de los cables	82
6.5	Ley de daño ingenieril de los cables	83
6.6	Ley de daño ingenieril del MDEL	86
6.7	Ley ingenieril de los cables con el MDEL	87
6.8	Ley de daño ingenieril de los cables con el MDEL	89
7	Conclusiones: de los resultados obtenidos del procedimiento numérico	93
7.1	Trabajo futuro	95
	Bibliografía	96
	Anexo A Datos experimentales	99
A.1	Ley esfuerzo-deformación ingenieril	99
A.2	Propiedades mecánicas	100
A.2.1	Reducción de área	101
A.3	Alambres ensayados	101
	Anexo B Configuración MEF	104
B.1	Análisis de sensibilidad de la geometría	104
B.1.1	Análisis de sensibilidad a A	104
B.1.2	Análisis de sensibilidad a G	105
B.2	Análisis de sensibilidad del mallado	106
	Anexo C Ajuste ley real	109
C.1	Primera iteración	109
C.2	Segunda iteración	111
C.3	Tercera iteración	113
C.4	Cuarta iteración	115
	Anexo D Códigos ANSYS	117
D.1	Eliminación de elementos	117
	Anexo E Análisis de sensibilidad del MDGTN	119
E.1	Análisis de sensibilidad del modelo del MDGTN	119
E.1.1	Parámetros constitutivos	119
E.1.2	Parámetros del material	120

E.1.3	Tamaño de los elementos	121
Anexo F Ajuste MDB		123
F.1	Ajuste de α	123
F.1.1	Parámetros constitutivos	123
F.1.2	Parámetros del material	125
F.2	Ajuste de la ley de daño ingenieril	127
F.2.1	Parámetros constitutivos	127
F.2.2	Parámetros del material	129
Anexo G Evolución del daño en cables		131
G.1	Cable de aluminio de 14.3 [mm]	131
G.2	Cable de aluminio de 10.1 [mm]	134
G.3	Cable de acero de 12.7 [mm]	137
G.4	Cable de acero de 9.5 [mm]	140
Anexo H Evolución del daño en cables con el MDEL		144
H.1	Cable de aluminio de 14.3 [mm]	144
H.2	Cable de aluminio de 10.1 [mm]	147
H.3	Cable de acero de 12.7 [mm]	150
H.4	Cable de acero de 9.5 [mm]	153

Capítulo 1

Introducción: cables dúctiles inicialmente dañados

Un cable es un elemento mecánico de tracción, el cual está construido por alambres, torones y núcleos. Los alambres pueden ser fabricados a partir de fibras naturales o artificiales, polímeros o metales. Un cable está conformado por uno o más torones, los cuales son enrollados en torno al núcleo del cable. Un torón es un conjunto de alambres, los cuales están enrollados entorno a su núcleo. Tanto el núcleo de los torones como el del cable puede estar conformado por fibras naturales o artificiales o, uno o más alambres.

Los cables, al ser elementos mecánicos de tracción suelen ser utilizados como elemento de izaje en grúas, elementos de tensión en estructuras o elementos mecánicos. Durante su operación son sometidos a condiciones de servicio e interacciones con el medio, lo cual resulta en abrasión o corrosión, producto de estas interacciones es que en la capa externa de los cables se suele cortar uno o más alambres. La operación de cables que posean alambres cortados en su capa externa se encuentra regulada en las normas "ISO 4309:2017" y "OSHA 1926.1413", las cuales determina el número de alambres superficiales cortados en un paso para un cable, tal que este pueda seguir en operación.

Cuando un cable posee uno o más alambres cortados en su capa exterior, de forma asimétrica, la distribución de deformaciones resultante es heterogénea, la cual se traduce en una distribución heterogénea del daño. El daño se caracteriza como el crecimiento, nucleación y coalescencia de microporosidades del material, lo cual se expresa en la degradación de las propiedades mecánicas del material. Se buscará determinar la evolución del daño de una serie de cables, para determinar el efecto de la asimetría en la evolución del daño en estos.

La determinación de la evolución del daño en los cables permitirá determinar el efecto en la evolución del daño de los alambres cortados superficialmente, con la cual se podrán establecer criterios de remplazo, en función del número de alambres cortados asimétricamente y, en trabajos futuros, de la distribución de los alambres cortados. Entre los trabajos realizados en esta temática se tienen los realizados por; Kweon et al. (2020)[1], donde se establece un procedimiento para determinar la ley real de aceros, Van Do (2016)[2], Archut et al. (2018)[3], Yang y Veljkovic (2019) [4] y Yang et al. (2020) [5], donde se incorpora una ley de daño dúctil a metales dúctiles, Wahid et al. (2019)[6], donde se determina la evolución del daño de cables de acero mediante el método de la energía y Beltrán et al.

(2018)[7], donde se determina la respuesta estática de los cables con alambres cortados inicialmente.

A la fecha no existen trabajos realizados que busquen determinar la evolución del daño en cables de metales dúctiles con procedimientos numéricos utilizando ensayos experimentales de los alambres como base. El presente trabajo busca entregar una solución a dicha temática, para esto se utilizarán los trabajos relacionados para construir un procedimiento nuevo.

El objetivo general es determinar cómo evoluciona el daño en cables de metales dúctiles, y, para alcanzar este objetivo se deben completar los siguientes objetivos específicos:

- Obtener la ley de esfuerzo-deformación real para cada alambre.
- Determinar la ley de esfuerzo-deformación real sin daño de los alambres.
- Acoplar un modelo de daño continuo no lineal a la ley real sin daño de los alambres.
- Determinar la ley de daño para cada uno de los alambres del modelo de daño continuo no lineal.
- Determinar la ley ingenieril de los cables, y la ley de deformaciones ingenieriles de los alambres en función de la deformación ingenieril del cable.
- Determinar la ley de daño de cada uno de los alambres, y la de los cables.
- Determinar la evolución del daño en función del número de alambres cortados.
- Establecer un criterio de remplazo de los cables.

Capítulo 2

Antecedentes: sobre el daño dúctil y sus modelos

2.1. Cable

El cable es un elemento mecánico de tracción, el cual es utilizado tanto como un elemento mecánico estático o dinámico, como ejemplo en; puentes suspendidos, vientos, sistemas de anclaje o ascensores, líneas de transmisión y grúas respectivamente. Debido a las condiciones de operación a las cuales los cables son sometidos, se pueden cortar uno o más alambres producto de la corrosión, abrasión, fatiga, entre otros.

2.1.1. Estructura de un cable

Existe una amplia variedad de cables, pero todos poseen una estructura común, la cual se muestra en la Figura 2.1. La unidad fundamental de un cable es el alambre, seguida por el núcleo y el torón. Un torón está compuesto por un número definido de alambres, los cuales son enrollados en torno a sí mismos. Un cable está compuesto por uno o más torones, los cuales son enrollados en torno al núcleo del cable. El núcleo puede estar conformado por alambres o alguna fibra natural o sintética, dependiendo de las propiedades esperadas del cable[8].

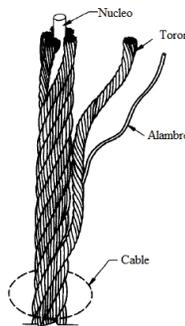


Figura 2.1: Esquema de un cable[9].

Los cables se pueden categorizar por; número de torones y su respectivo número de alambres, geometría de los torones y materiales que lo componen.

De acuerdo con el número de torones que posee un cable y al número de alambres que conforman cada torón, a cada cable se le puede clasificar con la nomenclatura $N \times M$, donde N es el número de torones y M el número de alambres que conforman un torón.

Dependiendo de los alambres que conforman un torón, y como son dispuestos estos, se puede tener las siguientes categorías: de una capa, con alambres de relleno, Seale, Warrington y mixturas, los cuales se pueden ver en las Figuras 2.2a a la 2.2e respectivamente.

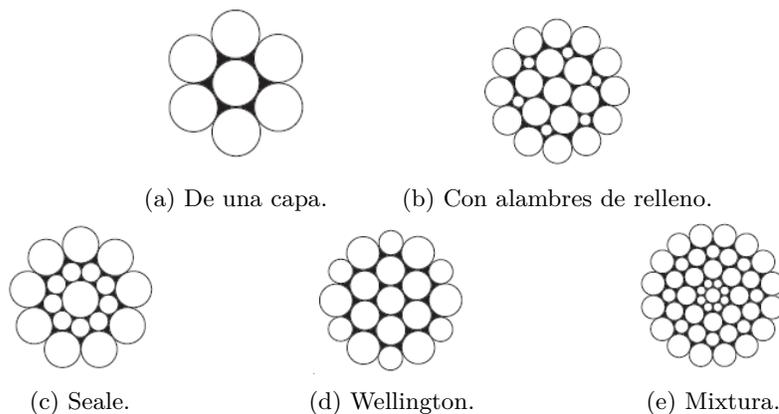


Figura 2.2: Algunos tipos de configuración de los torones, para cables.[10]

2.1.2. Generalización de la estructura de un cable

Todos los elementos que conforman un cable pertenecen a una de las dos categorías que se muestran en la Figura 2.3:

- **Capa:** Corresponde a un conjunto de elementos que son equidistantes a un núcleo, por ejemplo, en el caso del torón expuesto en la Figura 2.2b se pueden observar 3 capas. Las capas pueden estar formados tanto por alambres, como por torones, por ejemplo, en la sección transversal de la Figura 2.3, se observa una capa de torones en torno al núcleo del cable.
- **Nivel:** Corresponde al conjunto de elementos en un cable que están dispuestos de forma helicoidal en torno a un núcleo. El nivel 1 es asignado a la estructura del cable, si existen más estructuras helicoidales contenidas en el cable (ej. Figura 2.3, nivel 2) a estas se les asignara el valor $j + 1$, de manera tal que el helicoide $j + 1$ este esté contenida en el helicoide del nivel j .

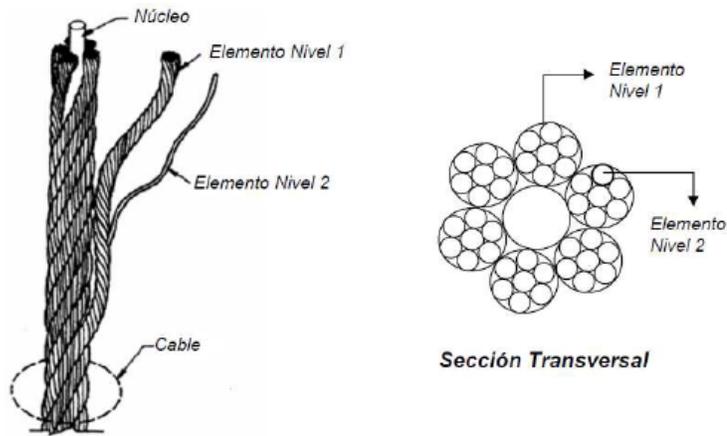


Figura 2.3: Sección transversal cable Figura 2.1[11].

Para modelar el cable de acero se considera las categorías de nivel y capa definidos previamente, por lo cual se debe determinar la hélice para cada nivel. La hélice posee una geometría cilíndrica, por lo cual parametrizada en dicho sistema de coordenadas, el cual se define a partir de las coordenadas radial, ρ , angular, θ , y axial, z .

$$r(t) = (\rho(t), \theta(t), z(t)) \quad (2.1)$$

Dado que no existe variación de radio en las hélices de un cable y la distancia de paso p corresponde a la distancia $\Delta r(t)$ que existe entre dos puntos de una hélice cuando está a avanzado una distancia $\Delta\theta = 2\pi$. Luego $\rho(t) = R$, $\theta(t) = \frac{t}{R}$ y $z(t) = \frac{p}{2\pi R}t$, con lo cual la parametrización de la hélice para el nivel i del cable queda descrita en la Ecuación 2.2.

$$r_i(t) = \left(R, \frac{t}{R}, \frac{p}{2\pi R}t \right) \quad (2.2)$$

2.1.3. Daño en un cable

Los cables suelen estar sometidos a cargas dinámicas o estáticas, por lo cual el daño se acumula en estos de forma progresiva. A lo anterior se le debe sumar que están expuestos a condiciones ambientales y operacionales que pueden concluir en la corrosión o abrasión de los alambres superficiales de estos. Dado lo anterior, es común que se corten uno o más alambres superficiales de un cable.

De acuerdo con norma "OSHA 1926.1413"[12]¹ los cables deben ser inspeccionados por personal competente al menos una vez al mes, en las cuales debe verificar el estado del cable, en particular si hay alambres cortados. Si hay más de dos alambres cortados en una capa del cable, o más de uno en los extremos del cable se deben reemplazar. También si el cable posee una reducción de área mayor al 5% con respecto al diámetro nominal.[12].

De acuerdo a la norma "ISO 4309:2010"[10]¹ los cables se deben reemplazar si el cable posee una reducción de área mayor al 7.5% con respecto al diámetro nominal, 2 alambres cortados en un largo de 6 veces el diámetro nominal, o 4 en un largo de 30 veces el diámetro nominal del cable. Lo anterior para un cable de solo un torón, con un núcleo de acero y un torzal ordinario[10].

2.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es una prueba destructiva que permite determinar múltiples propiedades mecánicas de un material. Este consiste en someter una muestra del material, probeta, a una fuerza de tracción creciente, tal que la probeta se deforme longitudinalmente a una tasa constante. El ensayo termina cuando la probeta se fractura. Este ensayo, busca determinar las propiedades del material en condiciones estáticas, por lo cual, para reducir los efectos dinámicos la tasa de deformación longitudinal debe ser pequeña, tal que se asegure un régimen de deformación cuasi estático[13].

Los ensayos de tracción de materiales metálicos se deben realizar siguiendo la norma "ASTM E 8M"[14], la que establece cuales deben ser los parámetros dentro de los que se debe realizar el ensayo de tracción. Los parámetros principales son: las dimensiones de las probetas, la tasa de deformación, la determinación de la elongación a la fractura y la reducción de área entre otros. Del ensayo se obtiene, además de la probeta ensayada, las mediciones del desplazamiento longitudinal y la carga aplicada, las cuales permiten determinar la ley esfuerzo-deformación de ingeniería del material.

2.2.1. Ley esfuerzo-deformación ingenieril

Del ensayo de tracción se obtiene la ley carga versus desplazamiento, la cual se muestra en la Figura 2.4, donde F es la carga aplicada y d es el desplazamiento del extensómetro de la zona **G**.

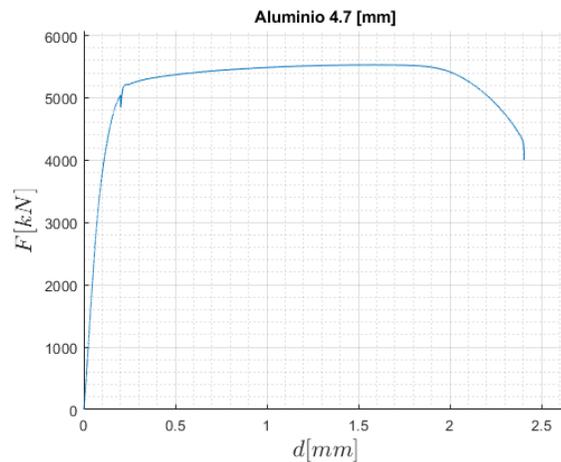


Figura 2.4: Ley fuerza desplazamiento para una probeta de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.

De la ley carga versus desplazamiento, se puede determinar la ley esfuerzo-deformación ingenieril de la probeta, la cual permite determinar las propiedades mecánicas del material ensayado. Para obtener la ley de ingeniería se debe utilizar las Ecuaciones 2.3 y 2.4, obteniéndose la ley mostrada en la Figura 2.5.

¹ Considerando: cables metálicos, sometidos a cargas estáticas y con una configuración de 1×7 de una capa.

El esfuerzo de ingeniería σ^{ing} se determina a partir de la Ecuación 2.3, donde F es la carga longitudinal aplicada y A es el área transversal inicial de la probeta.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

La deformación de ingeniería ϵ^{ing} se determina a partir de la Ecuación 2.4, donde L es el largo instantáneo de \mathbf{G} y L_i es el largo inicial de \mathbf{G} .

$$\epsilon^{ing} = \frac{L - L_i}{L_i} = \frac{d}{L_i} \quad (2.4)$$

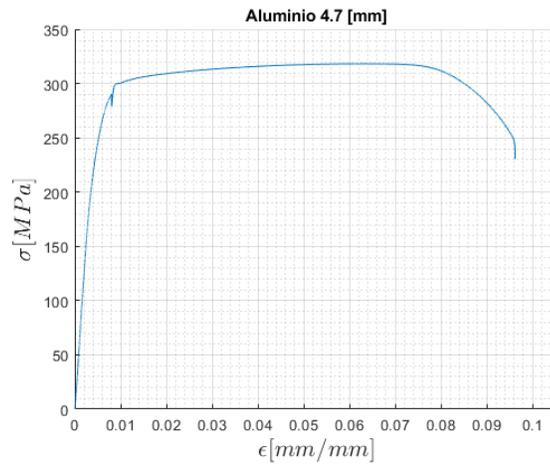


Figura 2.5: Ley de esfuerzo-deformación ingenieril de una probeta de aluminio con 4.7 [mm] de diámetro.

2.2.2. Dimensión de la probeta

La geometría de la probeta es establecida de acuerdo a la norma "ASTM E 8M"[14], donde, en el caso de una probeta con sección circular, la geometría es la mostrada en la Figura 2.6. Esta asegura que los esfuerzos y deformaciones estarán concentrado en la longitud calibrada, \mathbf{G} , pudiendo así, capturar la formación de la estricción y posterior fractura en el centro de la zona mencionada.

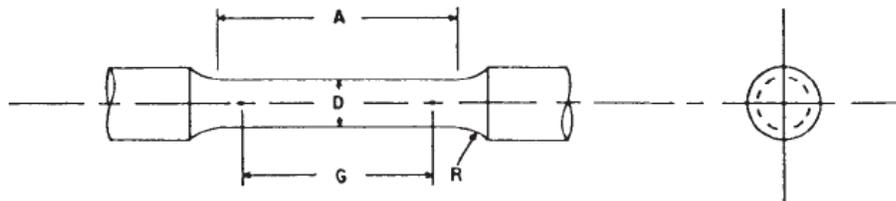


Figura 2.6: Probeta de sección circular estándar.[15]

Los parámetros asociados a la Figura 2.6 son:

- **A:** Longitud de la zona reducida.

- **D**: Diámetro.
- **G**: Longitud calibrada.
- **R**: Radio del empalme.

De acuerdo a la norma "ASTM E 8M"[14], las dimensiones de la probeta cilíndrica estándar con $\mathbf{D} = 12.5$ [mm] son las mostradas en la Tabla 2.1. Las dimensiones pueden ser escaladas isométricamente, para adaptarse a los requerimientos o dimensiones del material a ensayar.

Tabla 2.1: Dimensiones probeta estandarizada para un ensayo de tracción.

	[mm]
A	60
D	12.5 ± 0.25
G	50 ± 0.1
R	10

De ser necesario instalar un extensómetro, los valores de **A** y **G** pueden ser mayores a los establecidos, de acuerdo a la probeta estándar (Tabla 2.1), con la condición de que $\mathbf{G} \geq 5\mathbf{D}$ [14]. Adicionalmente, para asegurar que la fractura de la probeta ocurra en la zona media de **G**, se puede reducir gradualmente **D**, desde los extremos de **A** hasta el centro de lo probeta, y, dicha variación debe ser menor al 1% del **D**[14].

2.2.3. Reducción de área

La reducción de área, Z , permite caracterizar la variación del diámetro en la estricción de la probeta. El valor de Z se puede determinar a partir de la Ecuación 2.5, donde d_e es el diámetro en la estricción.

$$Z = \frac{\mathbf{D}^2 - d_e^2}{\mathbf{D}^2} \quad (2.5)$$

El valor de reducción de área puede ser medida continuamente durante el ensayo de tracción, de forma que se puede construir una función $Z(\epsilon^{ing})$, pero, en el caso particular de no tener estas medidas, se puede determinar la reducción de área a la fractura Z_f , para lo cual se debe medir el diámetro en la zona de fractura de la probeta ensayada, d_f . Para medir d_f se deben unir los dos extremos de la probeta ensayada, presionando ambos extremos de la probeta de forma que queden unidas las superficies de la fractura, de acuerdo a la norma "ASTM E 8M"[14], se puede cargar longitudinalmente la probeta fracturada para asegurar un mejor ajuste de las superficies.

Debido a la anisotropía, puede suceder que el área transversal de la zona fracturada no posea geometría circular, si no, elíptica, por lo cual, la norma "ASTM E 8M"[14] propone el uso de la Ecuación 2.6 para determinar el área de estricción A_f :

$$A_e = \pi \frac{d_f^{max} d_f^{min}}{4} \quad (2.6)$$

donde, d_f^{max} es el diámetro máximo y d_f^{min} es el diámetro mínimo de la sección elíptica.

2.2.4. Razón de radios en la estricción

La razón de radios en la estricción permite caracterizar la geometría en la estricción, con lo cual se puede determinar el estado interno de esfuerzos en la estricción. En la Figura 2.7, se muestra la sección transversal de la estricción de una probeta, el radio de curvatura en la estricción a y el radio de contorno de la estricción R . La razón de radios r_r se determina como se muestra en la Ecuación 2.7.

$$r_r = \frac{a}{R} \quad (2.7)$$

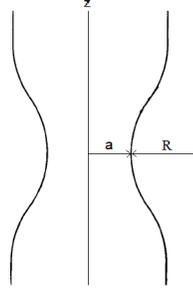


Figura 2.7: Vista de la sección transversal de la estricción en una probeta[16].

2.2.5. Esfuerzo y deformación último de fractura

El esfuerzo último, σ_u^{ing} , corresponde al máximo medido durante el ensayo de tracción, y el esfuerzo último, ϵ_u^{ing} al estado de deformación medido al momento de alcanzare el esfuerzo último. La deformación a la fractura, ϵ_f^{ing} , corresponde a la máxima deformación alcanzada por la probeta previo a la fractura de esta, es por lo anterior que esta debe ser medida durante la realización del ensayo, ya que esta considera la deformación plástica y elástica del material. Esta debe ser medida utilizando un extensómetro en **G**. El esfuerzo a la fractura, σ_f^{ing} , corresponde entonces, al esfuerzo aplicado cuando se alcanza la deformación de fractura.

2.2.6. Endurecimiento

El endurecimiento, N , se puede determinar a partir de un modelo de potencia, como el de Hollomon, que se muestra en la Ecuación 2.8. Para determinar el valor de N , es necesario realizar un sistema de ecuaciones, a partir de dos condiciones de borde; en el punto de fluencia, donde $\sigma(\epsilon_y^{ing}) = \sigma_y^{ing}$ y en el esfuerzo último, donde $\sigma(\epsilon_u^{ing}) = \sigma_u^{ing}$.

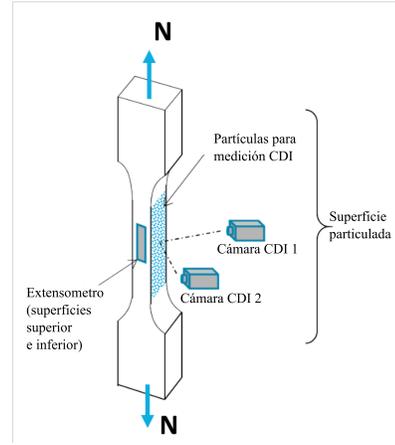
$$\sigma = H\epsilon^N \quad (2.8)$$

2.2.7. Ensayo dúctil

El ensayo de tracción realizado de acuerdo a lo establecido por la norma "ASTM E 8M"[14] es óptimo a la hora de obtener las propiedades mecánicas de los metales en la zona elástica y plástica previo a la formación de la estricción, pero, para capturar el reblandecimiento de forma completa es necesario realizar ensayos con equipos de mayor precisión, como es la correlación digital de imágenes (**CDI**) en conjunto con extensómetros localizados[17], los cuales se muestran en la Figura 2.8.



(a) Configuración de las cámaras de **CDI**.



(b) Medición de la deformación con dos extensómetros y **CDI**.

Figura 2.8: Configuración de un ensayo de tracción de alta precisión típico.[17]

La utilización de una configuración de alta precisión permite la obtención de una región de reblandecimiento más prolongada, por ende, permite capturar una mayor ductilidad que un ensayo de tracción tradicional, como se muestra en las leyes ingenieriles obtenidas de Yang et al. (2020)[5] en la Figura 2.9.

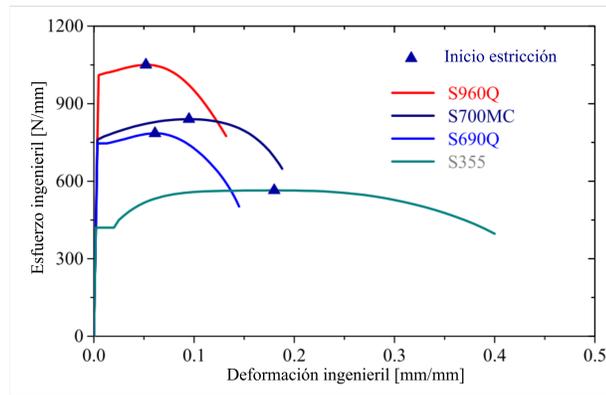


Figura 2.9: Ensayo de tracción de alta precisión de aceros de alta resistencia.[5]

Dado que el ensayo de tracción tradicional no permite capturar completamente la ductilidad, Lemaitre y Desmorat (2005)[18] propone un modelo de extrapolación del reblandecimiento de la ley de ingeniería (**MDEL**), de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.10, donde la deformación real de fractura, ϵ_{pR}^* , y el esfuerzo de fractura, σ_R , se determinan a partir de las Ecuaciones 2.9 y 2.10 respectivamente.

$$\epsilon_{pR}^* = 2(1 - \sqrt{1 - Z}) \quad (2.9)$$

$$\sigma_R = \sigma_u(1 - Z) \quad (2.10)$$

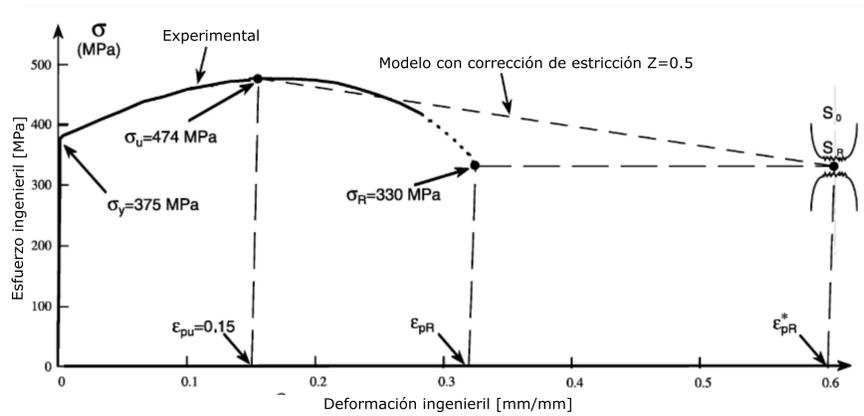


Figura 2.10: Extrapolación de la deformación de ingeniería obtenida de un ensayo de tracción realizado con la norma "ASTM E 8M"[14].[18]

Considerando que la ley ingenieril posterior al ϵ_u^{ing} se encuentra truncada, el **MDEL** propone una estimación del del daño crítico de fractura, D_C , que se estima como se muestra en la Ecuación 2.11.

$$D_C = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u^{ing}} \quad (2.11)$$

2.3. Ley esfuerzo-deformación real

La ley de ingeniera obtenida del ensayo de un metal dúctil se puede dividir en dos secciones, previo y posterior a la formación de la estricción, tal como se muestra en la Figura 2.11. El inicio de la estricción está determinado por el momento que la capacidad de carga de la probeta empieza a disminuir, lo cual queda representado en la ley ingenieril como el punto donde se alcanza el máximo de esfuerzo. La segunda sección de la ley de ingeniería se le conoce como reblandecimiento y se caracteriza por una disminución de la capacidad de carga, que finaliza con la fractura de la probeta. La ley de esfuerzo-deformación real permite determinar el estado de los esfuerzos internos de los materiales, además puede ser utilizado para caracterizar la ley de endurecimiento del material en un modelo de elementos finitos.

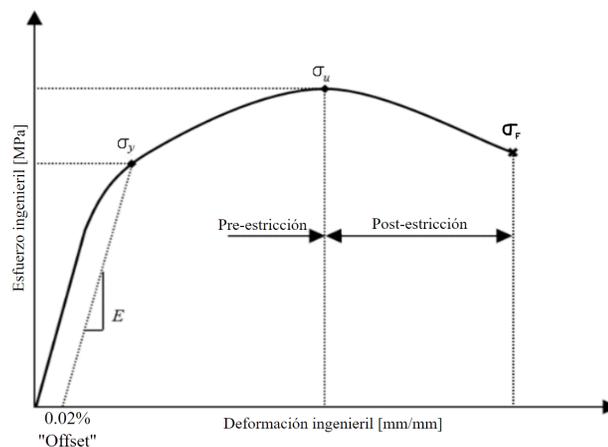


Figura 2.11: Inicio de la estricción en la ley esfuerzo-deformación ingenieril.[19]

En la primera sección de un ensayo de tracción, previo al inicio de la estricción, los esfuerzos en la probeta son uniaxiales, y se encuentran uniformemente distribuidos, por lo que los desplazamientos y fuerzas medidos en el ensayo de tracción permiten determinar los esfuerzos y deformaciones reales. Por lo cual, para determinar el estado de esfuerzo - deformación se utilizan las Ecuaciones 2.12 y 2.13.[1]

La deformación real ϵ se define como:

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon^{ing}) \quad (2.12)$$

donde, ϵ^{ing} es la deformación ingenieril.

El esfuerzo real σ se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \sigma^{ing}(1 + \epsilon) \quad (2.13)$$

donde, σ^{ing} es el esfuerzo ingenieril.

Una vez iniciada la formación de la estricción en la probeta, el estado de esfuerzos en esta deja de ser uniaxial, y pasa a ser triaxial, debido a que la sección transversal de la zona de ensayo de la probeta deja de ser uniforme. Debido a lo anterior, las Ecuaciones 2.12 y 2.13 ya no permitirían determinar el estado esfuerzo-deformación real en la probeta. Es por lo anterior es que se debe utilizar un modelo de esfuerzo - deformación que sea capaz de modelar el endurecimiento y la deformación plástica del material. Algunos de los modelos de esfuerzo-deformación que cumplen con lo requerido son:

- Modelo de Hollomon

$$\sigma = H\epsilon^n \quad (2.14)$$

- Modelo de Ludwik

$$\sigma = H(\epsilon + \epsilon_0)^n \quad (2.15)$$

- Modelo de Swift

$$\sigma = \sigma_0 + H\epsilon^n \quad (2.16)$$

Los cuales, se caracterizan por ser no convergentes y de potencia. En cambio, los siguientes modelos son convergentes, lo cual permite determinar un esfuerzo constante para grandes deformaciones.

- Voce

$$\sigma = \sigma_s - \sigma_r(e^{-m\epsilon}) \quad (2.17)$$

- Hockett-Sherby

$$\sigma = \sigma_s - \sigma_r(e^{-(m\epsilon)^n}) \quad (2.18)$$

Los parámetros de los modelos mostrados se determinan a partir de resultados experimentales o procedimientos de ajuste iterativos. Las leyes reales obtenidas de los modelos mostrados pueden ser utilizadas para caracterizar la ley de endurecimiento de los materiales en un modelo de elementos finitos, adicionalmente, estas leyes incorporan la evolución del daño de forma implícita.

2.3.1. Modelo de Hockett-Sherby

El modelo de Hockett-Sherby (**MHS**) permite determinar la ley esfuerzo-deformación real para metales dúctiles, ya que captura el endurecimiento del material debido a la deformación, y en el estado estacionario el endurecimiento no incrementa a medida que este se continúa deformando[20].

Dado que el **MHS** posee la capacidad de capturar tanto el comportamiento asintótico para grandes deformaciones, así como la no convergencia de los modelos de ley potencia en el caso particular cuando n es pequeño, tal como se muestra en la Figura 2.12, es que se utilizara este modelo para caracterizar la ley esfuerzo-deformación real[1]. La ley del **MHS** se muestra en la Ecuación 2.18.

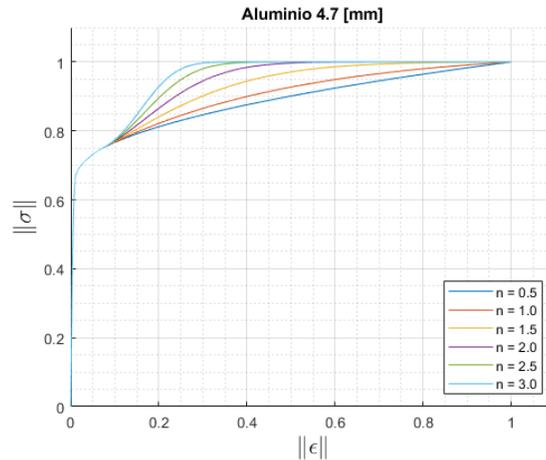


Figura 2.12: Comportamiento asintótico y no convergente del **MHS** en función del valor de n , para la ley real normalizada de un alambre de aluminio de 4.7 mm de diámetro.[1]

donde, σ_s , σ_r , m y n son parámetros dependientes de la naturaleza del material. Para determinar el valor de estas constantes se puede utilizar el procedimiento establecido por Kweon et al. (2020)[1].

Los parámetros σ_s , σ_r , m y n son dependientes del material, por lo que cada uno de estos puede ser asociado a las propiedades mecánicas. El parámetro σ_s se ajusta al valor de esfuerzo de fractura real, σ_r puede tomar valores menores o del mismo orden de magnitud que σ_s . El parámetro n se asocia al endurecimiento tomando valores entre 1.7 y 2.0 para metales dúctiles a temperatura ambiente. Si bien el parámetro m no tiene una asociación directa con alguna propiedad mecánica, esta toma valores entre 1 y 10.[1]

El **MHS** permite determinar la ley esfuerzo-deformación real cuando se tiene un estado triaxial de esfuerzos, por lo que este modelo se utilizará entre ϵ_u a ϵ_f . Previo a ϵ_u , la ley esfuerzo-deformación real se determinará a partir de las Ecuaciones 2.12 y 2.13, dado que el estado de esfuerzos es uniforme y uniaxial.

Para determinar los parámetros del **MHS**, se requiere de 3 condiciones de borde, de manera que se pueda determinar el valor de los parámetros σ_s , σ_r y m , el valor de n se ajusta de forma manual, ya que este parámetro determina el endurecimiento. Se tiene que la ley real debe ser de clase C^1 , en

particular en $\sigma(\epsilon_u)$ donde la ley real se empieza definir a partir del **MHS**. De la condición de C^1 se tienen dos condiciones de borde, 2.19 y 2.20.

$$\sigma |_{\epsilon=\epsilon_u} = \sigma(\epsilon_u) = \sigma_u \quad (2.19)$$

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} |_{\epsilon=\epsilon_u} = \sigma'(\epsilon_u) = \sigma_u \quad (2.20)$$

La tercera condición de borde corresponde σ_f , por lo cual, se debe determinar el esfuerzo real de fractura. Dado que la fractura ocurre en la estricción de la probeta, el esfuerzo real en la fractura σ_f puede ser determinando a partir de la Ecuación 2.21, donde se considera que la sección transversal corresponde al área reducida por Z . Dado que el estado de esfuerzos en la estricción es triaxial, es necesario realizar una corrección a σ_f , para esto se utiliza el factor de corrección de Bridgman, B , el cual puede ser determinado a partir de la Ecuación 2.25. Luego, el esfuerzo real a la fractura corregido, σ_f^B , se puede determinar a partir de la Ecuación 2.22.

$$\sigma_f = \sigma_f^{ing} \frac{1}{1-Z} \quad (2.21)$$

$$\sigma_f^B = B\sigma_f \quad (2.22)$$

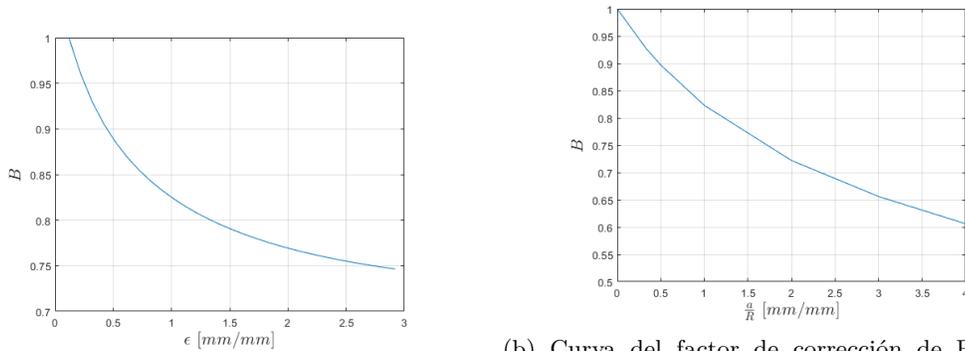
luego, la tercera condición es mostrada en Ecuación 2.23.

$$\sigma |_{\epsilon=\epsilon_f} = \sigma_f^B \quad (2.23)$$

2.3.2. Corrección de Bridgman

Posterior al esfuerzo último, se produce una estricción en la probeta, producto de la cual los esfuerzos internos pasan a ser triaxiales, lo cual dificulta la determinación de los esfuerzos internos. Por lo anterior, en 1944 P. W. Bridgman postulo que, para grandes valores de deformación en la estricción, se utilizara un factor de corrección que permitiese ajustar los valores de esfuerzo internos[21].

El factor de corrección de Bridgman, B , se aplica para deformaciones reales en el intervalo $0.12 < \epsilon < 3$ de acuerdo a la Ecuación 2.24. En el caso de los aceros, el valor de B puede ser determinado a partir del gráfico de la Figura 2.13a, o por la Ecuación 2.25[16].



(a) Curva del factor de corrección para aceros[21]. generalizada[16].

(b) Curva del factor de corrección de Bridgman

Figura 2.13: Corrección de Bridgman.

$$\sigma(\epsilon)_B = B\sigma(\epsilon) \quad (2.24)$$

$$B(\epsilon) = 0.0684(\log_{10}(\epsilon))^3 + 0.0461(\log_{10}(\epsilon))^2 - 0.205 \log_{10}(\epsilon) + 0.825 \quad (0.12 < \epsilon < 3) \quad (2.25)$$

Para determinar el factor de corrección de Bridgman para otros metales, es necesario determinar el radio de curvatura de la estricción a y el radio de curvatura del contorno de la estricción R . Con la relación de radios en la estricción a/R , utilizando el gráfico 2.13b se puede determinar el valor de B .

2.4. Daño dúctil

Desde un punto de vista mecánico, el daño dúctil en los materiales sólidos se caracteriza como el crecimiento, nucleación y coalescencia de microporosidades en el sólido, las cuales inician la formación de la grieta en la mesoescala. Desde el punto de vista físico, el daño siempre está relacionado con las deformaciones irreversibles o plásticas que presente el material, tanto en el nivel de la mesoescala, como en la microescala. Por lo consiguiente, la definición del daño dúctil depende de la escala que se esté observado, en la microescala, este es caracterizado por la nucleación, crecimiento y coalescencia de microporosidades, y, en la mesoescala por el estado de deformación plástica producido por una carga estática[18][22].

Tomando en cuenta la definición de daño dúctil en la mesoescala, se puede definir un elemento de volumen representativo, **RVE**, como el que se muestra en la Figura 2.14, dentro del cual la distribución del daño se puede considerar homogénea e isotrópica. Luego, el daño dúctil se puede estimar como la densidad volumétrica de microporos en un **RVE**, tal como se muestra en la Ecuación 2.26, lo cual también se es conocido como la densidad de microporosidad f .

$$D = \frac{\partial V_{poros}}{\partial V_{RVE}} = f \quad (2.26)$$

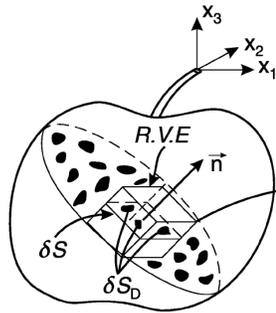


Figura 2.14: Definición del daño a partir de un **RVE**[18].

Si se considera que el daño no es únicamente dúctil, sino que también es producto de la presencia de micro cavidades y microgrietas, como se muestra en la Figura 2.14, para cada dirección \hat{n} en el **RVE** se puede determinar una superficie perpendicular a ∂S y la superficie perpendicular dañada

∂S_D , que es el área ocupada por las microporosidades y microgrietas. Con lo que, el daño se puede representar como un tensor, que representa la fracción de volumen dañada en cada dirección \hat{n} , como se muestra en la Ecuación 2.27.

$$D(\hat{n}) = \frac{\partial S_D}{\partial S} \quad (2.27)$$

Por simplicidad, se puede considerar que el daño es una variable isotrópica y homogénea, por lo cual este puede ser definido como la razón entre la superficie dañada A_D y la superficie total A . De manera que el daño queda expresado de acuerdo con la Ecuación 2.28[18].

$$D = \frac{A_D}{A} \quad (2.28)$$

2.4.1. Evolución del daño dúctil

La evolución del daño en materiales dúctiles ocurre en una serie de pasos, como se muestran en la Figura 2.15. Al inicio el material sin daño posee impurezas e inclusiones en su matriz, las cuales actúan como puntos de nucleación de microporosidades o microgrietas. Adicionalmente se debe considerar que dentro de la matriz del material sin daño puede existir una microporosidad inicial. La nucleación de los poros inicia cuando se alcanza un valor crítico de deformación plástica, lo cual resulta en la pérdida de cohesión de la matriz con las impurezas e inclusiones[22]. Concluida la nucleación de microporos en la matriz, inicia una etapa que se caracteriza por el crecimiento homogéneo de los microporos. En la mayoría de los metales dúctiles, los poros incrementan su radio entre dos a tres veces su diámetro inicial, antes que inicie la coalescencia[23].

La coalescencia de poros consiste en la transición de la deformación homogénea de los microporos, a una deformación plástica localizada en el ligamento que une dos o más microporos. Producto de esta deformación localizada, se produce una descarga de la deformación elástica en las zonas subyacentes[23]. La coalescencia finaliza con la propagación de la grieta, y consiguiente fractura.

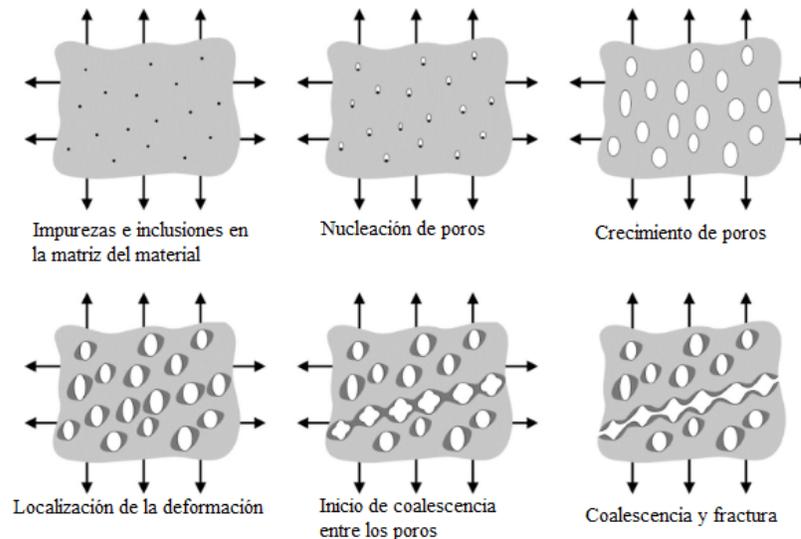
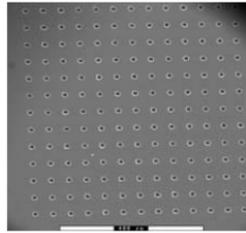


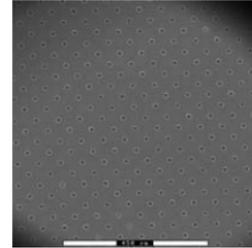
Figura 2.15: Esquemático de la nucleación, crecimiento y coalescencia de poros[24].

Existen dos modos de coalescencia principales, la estricción interna o localización de corte, los

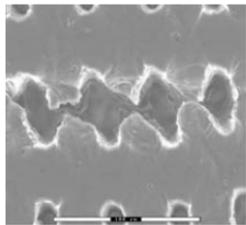
cuales se muestran en la Figura 2.16. En el primero la coalescencia ocurre en un ángulo de 90° con respecto a la dirección de tracción, y, en el ligamento que une los microporos se produce una estricción, como se muestra en la Figura 2.16c, en el modo de localización de corte, la coalescencia ocurre en un ángulo de 45° con respecto a dirección de tracción, como se muestra en la Figura 2.16d. Este último modo de coalescencia está asociado a materiales de alta resistencia a la tracción, con un coeficiente de endurecimiento bajo a medio[23].



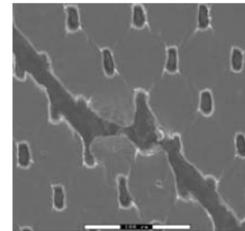
(a) Placa de aluminio con perforaciones alineadas 90° con respecto a la dirección de tracción.



(b) Placa de aluminio con perforaciones alineadas 45° con respecto a la dirección de tracción.



(c) Coalescencia por estricción interna de las perforaciones de la placa mostrada en la Figura 2.16a.



(d) Coalescencia por localización de corte de las perforaciones de la placa mostrada en la Figura 2.16b.

Figura 2.16: Micrografía obtenida utilizando un microscopio electrónico de barrido de una placa de aluminio de $100\mu m$ de grosor, con perforaciones circulares realizadas con láser, sometido a una carga axial in-situ[23][25].

2.4.2. Medición del daño

La medición directa del daño, como la densidad de microporosidades en una superficie es difícil de realizar, ya que requiere de equipos de micrografía que permitan una medición continua de la evolución de la microporosidad en el material[18]. Como alternativa, se puede realizar una medición indirecta de la evolución del daño a partir de la variación de las propiedades elastoplásticas del material.

2.4.2.1. Módulo de elasticidad

La estimación del daño mediante la medición del módulo de Young, se realiza en un ensayo destructivo, donde la probeta es sometida a la carga y descarga aplicada, tal como se muestra en la Figura 2.17. Esta medición se realiza asumiendo que la distribución del daño es homogénea e isotrópica en la sección **G** de la probeta. Este ensayo tiene buenos resultados cuando se ensaya materiales que presentan daño frágil, dúctil, por termo-fluencia y en ciclos bajos de fatiga[22].

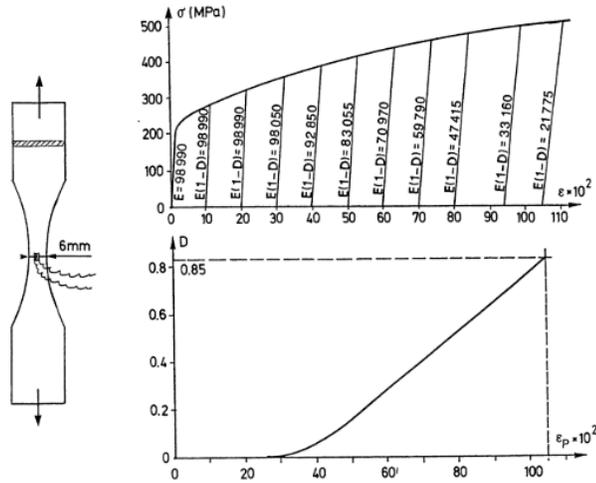


Figura 2.17: Medición del daño dúctil para cobre en un 99% a temperatura ambiente[22].

Lemaitre y Chaboche (1990) propusieron que, "Cualquier comportamiento de deformación, sea uniaxial o multiaxial, de un material dañado puede ser representado por una ley constitutiva del material virgen (sin daño), donde el esfuerzo es remplazado por un esfuerzo efectivo", el cual se conoce como el principio de deformación equivalente. El principio de deformación equivalentes se encuentra representado en la Figura 2.18[11].

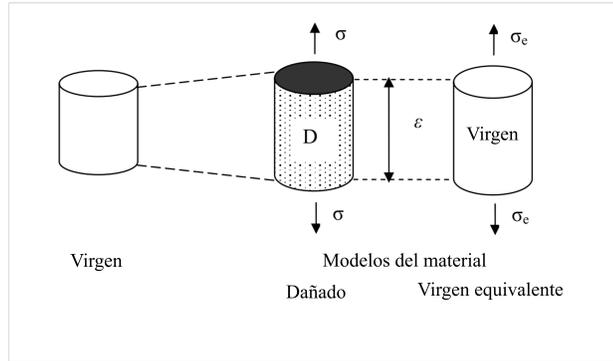


Figura 2.18: Principio de la deformación equivalente [11].

Una de las formas de describir el estado de daño de un material es la propuesta por Lemaitre y Desmorat [18], mostrada en la Ecuación 2.28. De esta definición se puede determinar el estado de esfuerzo efectivo, $\tilde{\sigma}$, como se muestra en la Ecuación 2.29.

$$\tilde{\sigma} = \sigma \frac{A}{A - A_D} \quad (2.29)$$

Para materiales sin daño, es decir, con $D = 0$, la deformación elástica, ϵ^e , del material se puede calcular como se muestra en la Ecuación 2.30. Y, por la expresión del daño de la Ecuación 2.28, $\frac{A}{A - A_D} = \frac{1}{1 - \frac{A_D}{A}} = \frac{1}{1 - D}$, por lo que el esfuerzo efectivo se puede expresar como se muestra en la Ecuación 2.31.

$$\epsilon^e = \frac{\sigma}{E_0} \quad (2.30)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (2.31)$$

Donde, el estado de daño se puede determinar cómo $D = 1 - \frac{\sigma}{\tilde{\sigma}}$. Por el principio de deformación equivalente, para un estado de deformación ϵ , el módulo de elasticidad con daño y sin daño, \tilde{E} y E_0 respectivamente se determinan como, $\tilde{E} = \frac{\sigma}{\epsilon}$ y $E_0 = \frac{\tilde{\sigma}}{\epsilon}$. Luego el daño se determina como se muestra en la Ecuación 2.32.

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E_0} \quad (2.32)$$

2.4.2.2. Módulo secante

El módulo secante es definido como, la pendiente de una recta que une el origen con un punto de la ley esfuerzo-deformación, tal como se muestra en la Figura 2.19, lo cual queda expresado como se muestra en la Ecuación 2.33.

$$E_s = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.33)$$

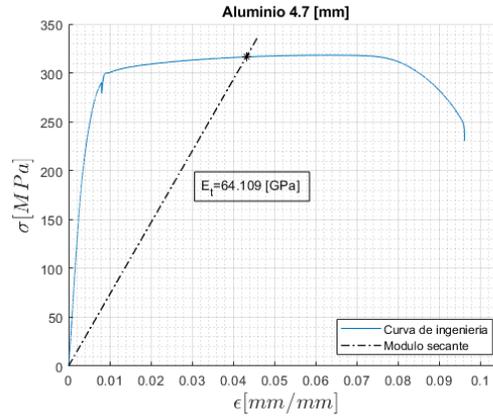


Figura 2.19: Módulo secante de un punto de la ley esfuerzo-deformación para el aluminio con 4.7 [mm] de diámetro.

Para determinar la evolución del daño mediante el módulo secante, es necesario determinar una ley esfuerzo-deformación real sin daño, la cual puede ser determinada a partir de algún modelo elastoplástico de potencia no convergentes, como los son los de Hollomon, Ludwik o Swift, los que se muestran en las Ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 respectivamente.

Con las leyes sin y con daño ya determinadas, como las que se muestran en la Figura 2.20, se puede determinar el módulo secante para cada una de las leyes utilizando la Ecuación 2.33, obteniéndose el módulo secante con daño, E_s^D , y el módulo secante sin daño, E_s^S . Luego, el daño estimado por el módulo secante queda determinado por la Ecuación 2.34.

$$D = 1 - \frac{E_s^D}{E_s^S} \quad (2.34)$$

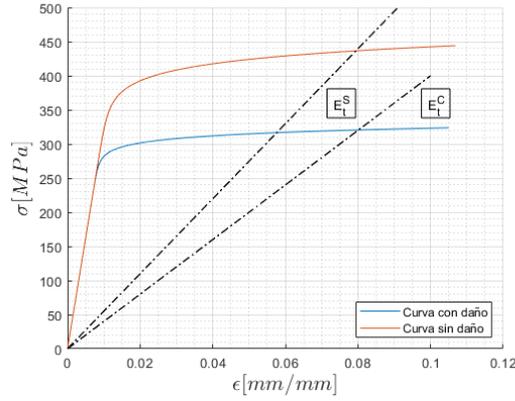


Figura 2.20: Ejemplo ley esfuerzo-deformación con y sin daño, y el módulo secante para cada una de las leyes en la misma deformación.

La demostración de la expresión para el daño por el módulo secante, Ecuación 2.34, se muestra a continuación. El módulo secante sin daño, y con daño, utilizando la expresión 2.33, pueden ser expresados como, $E_s^D = \frac{\sigma_D}{\epsilon}$ y $E_s^S = \frac{\sigma_S}{\epsilon}$, lo cual remplazado en la Ecuación 2.34 es igual a:

$$D = 1 - \frac{\frac{\sigma_D}{\epsilon}}{\frac{\sigma_S}{\epsilon}} = 1 - \frac{\sigma_D}{\sigma_S} \quad (2.35)$$

donde, el esfuerzo sin daño, σ_S , es equivalente al daño efectivo, $\tilde{\sigma}$, y, el esfuerzo con daño σ_D , es equivalente a σ .

Luego, utilizando la expresión 2.29, se tiene que:

$$D = 1 - \frac{\sigma}{\sigma\left(\frac{A}{A-A_D}\right)} = 1 - \frac{A - A_D}{A} = \frac{A_D}{A} \quad (2.36)$$

la cual es la definición del daño, mostrada en la Ecuación 2.28.

2.5. Modelo de daño de Gurson–Tvergaard-Needleman

Los métodos tradicionales usados para el análisis de la fractura mecánica poseen limitaciones a la hora de querer incluir los efectos de grandes fluencias, el efecto del tiempo, los efectos tridimensionales, la acumulación no lineal y la interacción de diferentes tipos de daño, los cuales no pueden ser resumidos en un solo parámetro global. La mecánica del daño continuo permite superar las limitaciones de los métodos de análisis de fractura mecánica tradicionales[27].

Dado que el daño dúctil se debe a la presencia de microporos en el material, los modelos de daño dúctil buscan modelar la evolución de los poros en una matriz dúctil. Estos se pueden categorizar por la forma en que incorporan la evolución del daño, modelos desacoplados y modelos acoplados. Los modelos desacoplados determinan la evolución del daño en función del estado esfuerzo-deformación, el cual asocian al crecimiento de los microporos. Por lo cual, la evolución del daño no afecta la ley constitutiva del material[28]. Algunos de los modelos desacoplados que utilizan este principio son los de McClintock[29], Thomason[30] y Rice y Tracey[31].

Los modelos acoplados de daño incorporan la evolución de la porosidad en la ecuación constitutiva del material, por lo cual el estado de esfuerzo-deformación varía en función del estado de porosidad, es decir, daño dúctil. Debido a lo anterior, los modelos acoplados permiten modelar el comportamiento y falla del material[28]. Entre los modelos de daño acoplados destacan el modelo de Gurson[32] y el de Rousselier[33]. En particular, el modelo de Gurson incorpora la nucleación y crecimiento de los microporos en una matriz dúctil del material, la cual se rige por el criterio de fluencia de Von Mises. Posteriormente, al modelo de Gurson se le incorpora la coalescencia de microporos, el cual conoce como el modelo de Gurson–Tvergaard–Needleman(**MDGTN**)[34].

De esta forma, el **MDGTN** permite modelar la evolución del daño en materiales dúctiles producto del crecimiento, nucleación y coalescencia de microporos en éstos, evolución de daño que es acoplada a las leyes constitutivas del material. La evolución de la microporosidad es caracterizada por un conjunto de parámetros que son intrínsecos y/o ajustables con respecto a las leyes experimentales. Adicionalmente, requiere una ley elastoplástica sin daño, a la cual se le acopla la evolución de las microporosidades, y consecuentemente, el daño.

2.5.1. Ley real sin daño

La ley real obtenida desde un modelo de potencia, como los descritos en la Sección 2.3, poseen la evolución del daño incorporada de forma implícita. Y, los modelos de daño continuo acoplados como el **MDGTN**, requieren de la ley constitutiva del material sin daño, dado que los parámetros internos del modelo incorporan la evolución del daño del material.

Para construir la ley sin daño a partir de la ley real (la cual incorpora una ley de daño de forma implícita), es necesario tener en cuenta la Ecuación 2.31, con la cual se determina el esfuerzo efectivo para un determinado estado de daño D . Se considera que, en el espacio de la ley real, el esfuerzo efectivo es equivalente al esfuerzo sin daño, y, como el daño debe cumplir $0 < D < 1$ entonces el esfuerzo sin daño, σ_{sd} , debe ser tal que $\sigma_{sd}(\epsilon) \geq \sigma(\epsilon)$, $\forall \epsilon_f \geq \epsilon \geq 0$. Es oportuno recordar que las leyes reales deben ser estrictamente crecientes.

Dado que se debe cumplir que $\sigma_{sd} \geq \sigma$, se dice que el daño se empieza a acumular en el momento en que $\sigma_{sd}(\epsilon) \geq \sigma(\epsilon)$ [35]. Adicionalmente, se sabe que el daño dúctil empieza a acumularse de forma no incipiente cuando se alcanza σ_u [22], por lo que, las leyes con y sin daño deben ser iguales para esfuerzos menores a σ_u , y, $\sigma_{sd}(\epsilon) \geq \sigma(\epsilon)$ para esfuerzos mayores a σ_u .

2.5.2. Criterio de fluencia de Von Mises[32]

El criterio de fluencia de Von Mises establece que la fluencia del material es alcanzada cuando el esfuerzo de Von Mises, σ_{vm} , es igual al esfuerzo de fluencia, σ_y , del material, como se muestra en la Ecuación 2.37. El esfuerzo de Von Mises se determina a partir de la ecuación de Von Mises de esfuerzos principales, mostrada en la Ecuación 2.38:

$$\Phi(\sigma_y, \sigma_{vm}) = \left(\frac{\sigma_{vm}}{\sigma_y}\right)^2 - 1 = 0 \quad (2.37)$$

donde, σ_{vm} es el esfuerzo de Von Mises de los esfuerzos principales, que se muestra en la Ecuación 2.37:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2}} \quad (2.38)$$

donde, σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} son los esfuerzos principales.

2.5.3. Criterio de fluencia del MDGTN[34][24][40]

El modelo de daño continuo de Gurson modificado por Tvergaard y Needleman (1984)[34], utiliza el criterio de fluencia de Von Mises, de la Ecuación 2.37, al cual le incorpora una serie de parámetros que permiten determinar la evolución de las microporosidades. Este modelo utiliza el parámetro de fracción de porosidad volumétrica f , el cual es un valor escalar que toma valores entre 1 y 0. La función de la fluencia del **MDGTN** se muestra en la Ecuación 2.39:

$$\Phi(\sigma_y, \sigma_{vm}, f) = \left(\frac{\sigma_{vm}}{\sigma_y}\right)^2 + 2f^* q_1 \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_{kk}}{\sigma_y}\right) - [1 + q_3 f^{*2}] = 0 \quad (2.39)$$

donde:

- $\sigma_{kk} :=$ El esfuerzo hidrostático, que se muestra en la Ecuación 2.40.
- q_1 y $q_2 :=$ Parámetros constitutivos del material.
- $f^* :=$ Porosidad modificada.

$$\sigma_{kk} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad (2.40)$$

La porosidad modificada, que fue incorporada al modelo de Gurson por Tvergaard y Needleman[34], permite caracterizar la aceleración del incremento de la porosidad cuando inicia la coalescencia de los micro huecos del material, lo cual es expresado con el inicio de la estricción. Este término esta caracterizado en la Ecuación 2.41:

$$f^* = \begin{cases} f & \text{si } f \leq f_C \\ f_C + \delta(f - f_C) & \text{si } f > f_C \end{cases} \quad (2.41)$$

donde:

- $f =$ Fracción volumétrica de microporos.
- $f_C =$ Fracción volumétrica de microporos critica.
- $\delta =$ Velocidad de coalescencia de microporos critica.

La velocidad de coalescencia de microporos es determinada por la Ecuación 2.42:

$$\delta = \frac{f_u^* - f_C}{f_F - f_C} \quad (2.42)$$

donde:

- $f_F =$ Fracción volumétrica de microporos a la falla.

- f_u^* = Fracción volumétrica de microporos última corregida.

La fracción volumétrica de microporos última corregida, f_u^* , se determina a partir de la Ecuación 2.43, que está en función de los parámetros constitutivos del material,

$$f_u^* = (q_1 + \sqrt{(q_1)^2 - q_3})/q_3 \quad (2.43)$$

donde, q_3 se puede determinar a partir de la siguiente expresión: $q_3 = (q_1)^2$, de manera que la f_u^* se puede determinar únicamente en función de q_1 , como se muestra en la Ecuación 2.44

$$f_u^* = 1/q_1 \quad (2.44)$$

2.5.4. Parámetros del MDGTN

2.5.4.1. Parámetros constitutivos

Los parámetros constitutivos del material q_1 y q_2 tienen una directa relación con la resistencia a la fractura del material, tal como se muestra en la Ecuación 2.44. Del trabajo de Tvergaard y Needleman (1984)[34], el valor de estos parámetros es $q_1 = 1.5$ y $q_2 = 1$, pero, de acuerdo con Faleskog et al. (1998)[36], existe una relación directa entre los valores de los parámetros con el factor de endurecimiento, N (Ecuación 2.8), tal como se muestra en la Tabla 2.2, los cuales permiten capturar de forma más precisa la tasa de crecimiento de la porosidad.

Tabla 2.2: Valores calibrados de q_1 y q_2 para metales dúctiles[36].

N	$\sigma_y/E = 0.001$		$\sigma_y/E = 0.002$		$\sigma_y/E = 0.003$	
	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2
0.025	1.88	0.956	1.84	0.977	1.74	1.013
0.050	1.63	0.950	1.57	0.974	1.48	1.013
0.075	1.52	0.937	1.45	0.960	1.33	1.004
0.100	1.58	0.902	1.46	0.931	1.29	0.982
0.150	1.78	0.833	1.68	0.856	1.49	0.901
0.200	1.96	0.781	1.87	0.800	1.71	0.836

2.5.4.2. Parámetros del material

Los parámetros del material se pueden dividir en dos subgrupos, aquellos que inciden en el inicio de la nucleación, y aquellos que determinan la falla del material.

Los parámetros del inicio de la nucleación son: la fracción volumétrica inicial de microporos, f_0 , la fracción volumétrica núcleos, f_N , la deformación de inicio de la nucleación, e_N , y la desviación estándar del inicio de la nucleación, S_N . Los valores de f_N y f_0 se pueden determinar a partir de un análisis microscópico del material sin daño, donde f_N puede ser establecido como la densidad volumétrica de inclusiones u otros puntos de nucleación. Los parámetros e_N y S_N son determinados mediante ajuste, y usualmente se les asigna un valor de 0.3 y 0.1 respectivamente[28].

Los parámetros de falla son: la fracción volumétrica de microporos crítica, f_C y la fracción volumétrica de microporos de falla, f_F . Estos parámetros se obtienen mediante ajuste, aunque, de acuerdo

con Tvergaard y Needleman[34], si el parámetro f_0 es pequeño se puede considerar que $f_C = 0.15$, para metales dúctiles.

2.5.5. Daño en el MDGTN[40]

Al igual que el daño dúctil, en el **MDGTN** el daño se registra como la variación de la porosidad producto del crecimiento y nucleación de microporos, con la excepción de que la coalescencia, la cual no es registrada de forma directa, sino que es incorporada como una aceleración del crecimiento y nucleación de microporos. En la Ecuación 2.45 se muestra la expresión que permite determinar la variación de la porosidad según el modelo del **MDGTN**.

$$df = df_{nucleación} + df_{crecimiento} \quad (2.45)$$

Para determinar la evolución de la porosidad debido a la nucleación de microporos, se utiliza la expresión fenomenológica de la Ecuación 2.46, en la cual A y B son funciones de la deformación y esfuerzos triaxiales respectivamente. Dependiendo de cómo se controle la nucleación, por deformación o esfuerzo, la función B tomara valor cero o distinto a cero respectivamente[18],

$$df_{nucleación} = A d\epsilon_{vm}^p + B(d\epsilon_{vm} + cd\sigma_{kk}) \quad (2.46)$$

donde:

- ϵ_{vm}^p = La deformación plástica de Von Mises, que se muestra en la Ecuación 2.47.
- ϵ_{vm} = La deformación de Von Mises, que se muestra en la Ecuación 2.48.
- c = Una constante del material, entre 0.3 y 0.4[28].

$$\epsilon_{vm}^p = \sqrt{\frac{(\epsilon_{xx}^p - \epsilon_{yy}^p)^2 + (\epsilon_{yy}^p - \epsilon_{zz}^p)^2 + (\epsilon_{zz}^p - \epsilon_{xx}^p)^2}{2}} \quad (2.47)$$

$$\epsilon_{vm} = \sqrt{\frac{(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2}{2}} \quad (2.48)$$

Luego, las funciones A y B, en las Ecuaciones 2.49 y 2.50 respectivamente, son expresados como una distribución normal en función de los parámetros ϵ_N y S_N , , que representa la distribución de la nucleación de microporos, en función de la deformación o esfuerzo, según esta sea controlada[28].

$$A = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_{vm}^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad (2.49)$$

$$B = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{vm} + c\sigma_{kk} - \sigma_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad (2.50)$$

El crecimiento de los microporos se determina a partir de la deformación plástica hidrostática, como se muestra en la Ecuación 2.51 y está en función de la fracción de porosidad:

$$df_{crecimiento} = (1 - f)d\epsilon_{kk}^p \quad (2.51)$$

donde, ϵ_{kk}^p es la deformación plástica hidrostática, que se muestra en la Ecuación 2.52.

$$\epsilon_{kk}^p = \epsilon_{xx}^p + \epsilon_{yy}^p + \epsilon_{zz}^p \quad (2.52)$$

Luego, el daño se determina a partir de la fracción volumétrica de porosidad corregida, la cual incorpora el efecto de la coalescencia de microporos, como se muestra en la Ecuación 2.53[18]:

$$D = 1 - \sqrt{1 + q_3 f^{*2} - 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2}q_2 T_x\right)} \quad (2.53)$$

donde, T_x es el esfuerzo triaxial, que se muestra en la Ecuación 2.54. Este parámetro permite caracterizar si el estado interno de esfuerzos en el material es hidrostático o uniaxial.

$$T_x = \frac{\sigma_{kk}}{\sigma_{vm}} \quad (2.54)$$

2.6. Modelo de daño continuo de Bonora[37]

Al igual que en modelo de daño de Gurson, el modelo de daño propuesto por Bonora (1997)[37] (MDB) presenta un modelo, que, con un conjunto de parámetros, permite caracterizar la evolución de las microporosidades. Pero, a diferencia de otros modelos, este es construido a partir de la formulación de la disipación de potencia, y, presenta la ventaja que puede ser utilizado en el postproceso para poder determinar el inicio de la falla crítica del material, del cual se conoce su estado de deformación plástica.

Por simplicidad, este modelo es construido considerando el supuesto que el daño es isotrópico, por lo cual, el daño se define de acuerdo a la expresión 2.26, a partir de un **RVE** como el que se muestra en la Figura 2.14. La disipación de potencia por daño queda expresada como se muestra en la Ecuación 2.55, donde D_C es el daño crítico, S_0 es una constante del material, α es el exponente característico de daño e Y es la variable asociada al daño, la cual es definida como se muestra en la expresión 2.56,

$$F_D = \left[\frac{1}{2} \left(-\frac{Y}{S_0} \right)^2 \frac{S_0}{1-D} \right] \frac{(D_C - D)^{(\alpha-1)/\alpha}}{p^{(2+n)/n}} \quad (2.55)$$

$$Y = -\frac{\sigma_{vm}}{2E(1-D)^2} F \left(\frac{\sigma_{kk}}{\sigma_{vm}} \right) \quad (2.56)$$

donde $F \left(\frac{\sigma_{kk}}{\sigma_{vm}} \right)$ se puede determinar a partir de la Ecuación 2.57.

$$F \left(\frac{\sigma_{kk}}{\sigma_{vm}} \right) = \frac{2}{3}(1-\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_{kk}}{\sigma_{vm}} \right)^2 \quad (2.57)$$

Para determinar la ley de daño se debe determinar la expresión $\frac{\partial F_D}{\partial Y}$, con lo cual se obtiene la expresión para al daño producido por una carga uniaxial[37] que se muestra en la Ecuación 2.58, donde D_0 es el daño inicial, ϵ_{cr} es la deformación crítica y ϵ_i es la deformación al inicio del daño.

$$D = D_0 + (D_C - D_0) \left[1 - \left(1 - \frac{\ln(\epsilon/\epsilon_i)}{\ln(\epsilon_{cr}/\epsilon_i)} \right)^\alpha \right] \quad (2.58)$$

Hay que notar que el exponente característico de daño α permite determinar la relación entre la deformación y la evolución del daño, tal como se muestra en la Figura 2.21, donde se muestran tres tipos de leyes de daño para distintos valores de α .

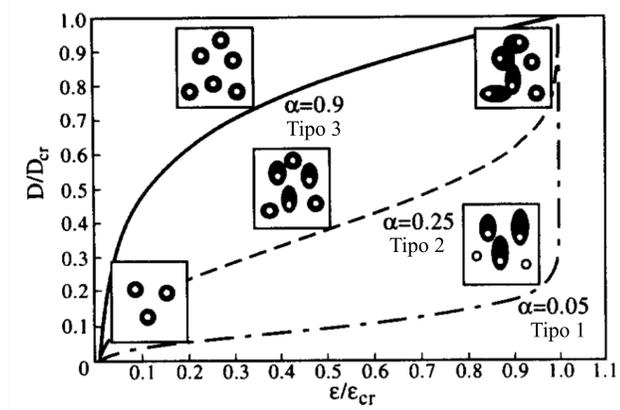


Figura 2.21: Tres leyes de evolución del daño, para distintos valores de α . Para cada ley se muestra cada una de las etapas de la evolución de las microporosidades[37].

La evolución del daño de cada uno de los tipos mostrados se determinó de forma experimental y se caracterizan por:

- Tipo 1: Al inicio del daño se genera la nucleación de una fracción de los microporos los cuales crecen a medida que incrementa la deformación plástica, alcanzada ϵ_{cr} inicia la coalescencia de los microporos, que ocurre de forma instantánea.
- Tipo 2: Al inicio del daño los microporos empiezan a nuclear, lo cual continuara de forma progresiva al mismo tiempo que estos crecen. Esto continua hasta que se alcanza ϵ_{cr} donde la coalescencia ocurre de forma rápida.
- Tipo 3: La mayor parte de los microporos nuclean al inicio de la deformación, los cuales crecen en forma constante hasta llegar a ϵ_{cr} , donde los microporos se encuentran tan próximos unos a otros (debido a la estricción interna) que la coalescencia ocurre de forma insipiente.

2.7. Modelo de daño dúctil de Lemaitre [18]

El modelo de daño dúctil de Lemaitre considera que el daño se empieza a acumular, en el caso de un ensayo de tracción monótono, posterior a que el material alcanza σ_u^{ing} . Bajo el supuesto de que el efecto de la triaxialidad es incipiente y que la tasa de liberación de densidad de energía, Y , es constante $Y \approx \frac{\sigma_u^{ing2}}{2E} = constante$, la ley de daño se puede determinar cómo:

$$\dot{D} = \left(\frac{Y}{S}\right)^s \dot{p} \approx \left(\frac{\sigma_u^{ing2}}{2ES}\right)^s |\dot{\epsilon}^{ing}| \quad (2.59)$$

para valores de $\epsilon^{ing} > \epsilon_u^{ing}$, donde S y s son constantes del material y \dot{p} es la deformación plástica triaxial.

Integrando la ley de daño dúctil de Lemaitre, Ecuación 2.59, se determina el daño crítico D_c como se muestra en la Ecuación 2.60.

$$D_c = \left(\frac{\sigma_u^{ing2}}{2ES} \right)^s (\epsilon_f^{ing} - \epsilon_u^{ing}) \quad (2.60)$$

Remplazando lo obtenido en la Ecuación 2.60 en 2.59, se obtiene la ley de daño lineal mostrada en la siguiente ecuación:

$$D(\epsilon^{ing}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \epsilon^{ing} \leq \epsilon_u^{ing} \\ D_C \frac{\epsilon^{ing} - \epsilon_u^{ing}}{\epsilon_{ingf} - \epsilon_u^{ing}} & \text{si } \epsilon_{ingf} > \epsilon^{ing} > \epsilon_u^{ing} \end{cases} \quad (2.61)$$

donde, si $D = D_C$ se inicia a la propagación de la grieta en la mesoescala. Si bien, de acuerdo a Lemaitre y Desmorat (2005) la evolución del daño suele ser una función no lineal, puede ser aproximada por una expresión lineal.

2.8. Daño dúctil en cables

De lo establecido en la Sección 2.1, los cables están compuestos, por un conjunto de alambres los cuales actúan acoplados por una condición de compatibilidad de deformación, lo cual determina las propiedades mecánicas del cable. De la misma forma, la evolución del daño de los alambres determina el estado de daño del cable, donde la ley de daño de los alambres se puede determinar como una función de la ley de deformaciones del alambre.

Para determinar las leyes de esfuerzo-deformación ingenieril de los cables se utilizará el modelo propuesto en Beltrán et al. (2018)[7], donde el cable es tratado como una viga $1D$ no-lineal bajo, con una hipótesis de Bernoulli. Para el caso más general de daño asimétrico, el cable está sometido a una flexión biaxial desacoplada y carga axial. Los alambres se tratan como elementos tipo fibra, que solo desarrollan tensión axial. Este modelo entrega las leyes ingenieriles del cable, así como la de cada uno de los alambres que lo componen. De este modelo se obtienen las leyes de los alambres, $\sigma_k^{ing}(\epsilon_k^{ing})$ y la ley de deformación de los alambres en función de la deformación del cable $\epsilon_k^{ing}(\epsilon_{cable}^{ing})$, donde k es el k -ésimo alambre del cable.

Conociendo la ley de daño de los alambres, $D_k(\epsilon_k^{ing})$, la cual se puede determinar a partir de la deformación del cable, $D_k(\epsilon_k^{ing}(\epsilon_{cable}^{ing})) = D_k(\epsilon_{cable}^{ing})$, con lo cual se puede determinar la ley de daño del cable a partir de la Ecuación 2.62, donde D_k es daño del alambre k -ésimo y M es el número de alambres en el cable.

$$D(\epsilon^{ing}) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{nocortados} D_k(\epsilon_{cable}^{ing}) \quad (2.62)$$

La ley de daño del cable determinada por la Ecuación 2.62, la cual permite determinar la ley de daño asimétrico, homogenizando la distribución del daño de los alambres.

2.8.1. Daño de Miner[6]

Dado que el estudio de la evolución del daño de los cables propuesto en este trabajo abarca cables vírgenes o con uno o más alambres cortados, es necesario definir el estado de daño inicial que presentan los cables, para esto se utilizara la variación de la ley de Miner propuesta en Wahid et al. (2019)[6], la cual se muestra en la Ecuación 2.63, donde M_c es el número de alambres cortados. La ley de Miner determina el estado de daño inicial de los cables, bajo el supuesto que el daño se distribuye de forma homogénea.

$$D_0 = \frac{M_c}{M} \quad (2.63)$$

2.8.2. Daño de Ye Duyi[26]

La energía de deformación del cable propuesta por Duyi y Zhenlin (2001)[26], la cual se muestra en la Ecuación 2.64, determina el daño mediante la energía de deformación, donde U_d es la energía de deformación del cable con uno o más alambres inicialmente cortados y U_0 la energía de deformación del cable inicialmente virgen, es decir sin alambres cortados.

$$D_E = 1 - \frac{U_d}{U_0} \quad (2.64)$$

La energía de deformación se determina como se muestra en la Ecuación 2.65, donde se determina la energía de deformación entre 0 y ϵ_f^{ing} , A el área del alambre, $\sigma(\epsilon^{ing})$ el estado de esfuerzo y $\cos(\theta(\epsilon^{ing}))$ la componente axial de la hélice de los alambres.

$$U = \int_0^{\epsilon_f^{ing}} A \sigma^{ing}(\epsilon^{ing}) \cos(\theta(\epsilon^{ing})) d\epsilon^{ing} \quad (2.65)$$

Utilizando esta definición de daño se determina el daño para los cables, sumando la U de cada uno de los alambres de los cables, como se muestra en la Ecuación 2.66, donde se realiza la suma de las energías de los k alambres, considerando el caso con alambre cortados inicialmente d y sin daño inicial 0.

$$D_E = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_f^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{nocortados} A_k \sigma_{dk}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{dk}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}}{\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{total} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}} \quad (2.66)$$

La sumatoria de U para los cables se puede subdividir entre alambres cortados y no cortados,

como se muestra en la Figura 2.67.

$$\begin{aligned}
D_E = & \frac{\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{nocortados} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}}{\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{total} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}} - \\
& \frac{\int_0^{\epsilon_{fd}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{nocortados} A_k \sigma_{dk}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{dk}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}}{\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{total} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}} + \\
& \frac{\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{cortados} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}}{\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} \left(\sum_{k=1}^{total} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \right) d\epsilon^{ing}} \quad (2.67)
\end{aligned}$$

Considerando que la integral y la sumatoria son conmutativas y distributivas, la Ecuación 2.67 se puede escribir como 2.68.

$$\begin{aligned}
D_E = & \frac{\sum_{k=1}^{nocortados} \left(\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) d\epsilon^{ing} \right)}{\sum_{k=1}^{total} \left(\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) d\epsilon^{ing} \right)} - \\
& \frac{\sum_{k=1}^{nocortados} \left(\int_0^{\epsilon_{fd}^{ing}} A_k \sigma_{dk}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{dk}(\epsilon_k^{ing}) d\epsilon^{ing} \right)}{\sum_{k=1}^{total} \left(\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) d\epsilon^{ing} \right)} + \\
& \frac{\sum_{k=1}^{cortados} \left(\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) d\epsilon^{ing} \right)}{\sum_{k=1}^{total} \left(\int_0^{\epsilon_{f0}^{ing}} A_k \sigma_{0k}(\epsilon_k^{ing}) \cos \theta_{0k}(\epsilon_k^{ing}) d\epsilon^{ing} \right)} \quad (2.68)
\end{aligned}$$

De la definición de daño de la Ecuación 2.64, la Ecuación 2.68 se puede escribir como 2.69, donde $(\Delta D_{wh})_k$ se determina como se muestra en la Ecuación 2.70 y $(\Delta D_{w0h})_k$ según la Ecuación 2.71. La Ecuación 2.69 determina el daño inicial efectivo.

$$D_E = \frac{(\Delta D_{wh})_k}{(\Delta D_{w0})_k} + \frac{(\Delta D_{w0h})_k}{(\Delta D_{w0})_k} \quad (2.69)$$

$$(\Delta D_{wh})_k = \left(\frac{1}{total} \sum_{j=1}^{nocortados} (D_{w0})_j - \frac{1}{total} \sum_{j=1}^{nocortados} (D_w)_j \right)_k = ((D_{w0})_h - (D_w)_h)_k \quad (2.70)$$

$$(\Delta D_{w0h})_k = \left(\frac{1}{total} \sum_{j=1}^{cortados} (D_{w0})_j \right)_k \quad (2.71)$$

La expresión de daño de Ye Duyi, como se muestra en la Ecuación 2.69 se muestra explícitamente en la Figura 2.22, donde **I.** corresponde a la Ecuación 2.70 la cual permite capturar el efecto de la asimetría en el daño inicial efectivo. El esquema **II.** de la Figura 2.22 corresponde a la Ecuación 2.71 la cual captura el daño inicial de Miner.

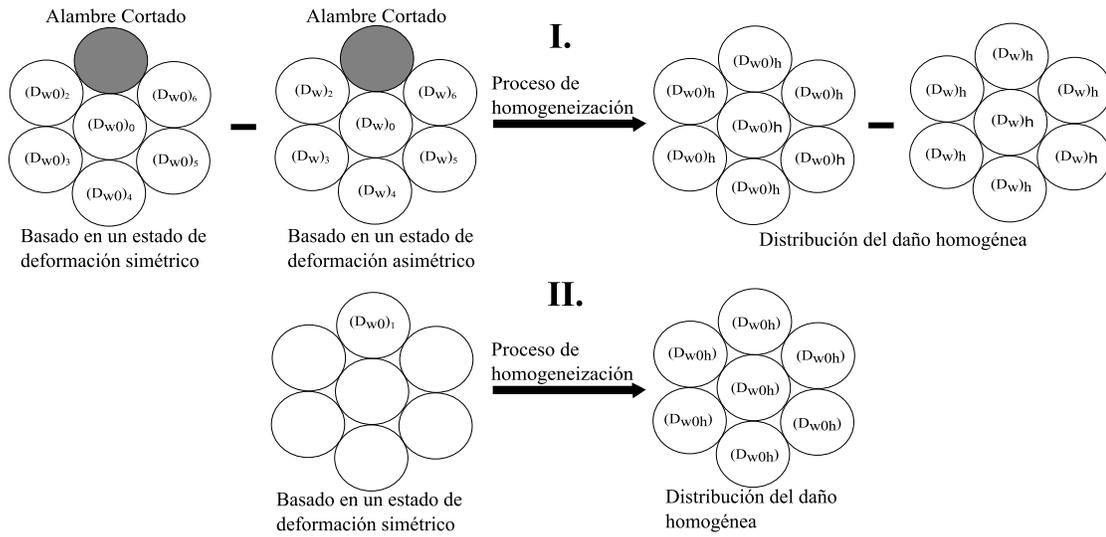


Figura 2.22: Diagrama del procedimiento de estimación del daño por energía de deformación Ye Duyi.

Capítulo 3

Datos experimentales: ensayos de tracción

3.1. Cables

Se considerarán cables de un solo torón y de una capa, cuyas características se ven resumidas en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Propiedades geométricas de los cables a analizar[7].

Cable	Diámetro del cable [mm]	Material del alambre	Diámetro del alambre [mm]	Capa	Angulo torzal [°]	Dirección torzal	Fuerza última mínima [kN]
1x7	14.3	Aluminio	4.7	2	7	D	37.8
1x7	10.1	Aluminio	3.5	2	8	I	19.7
1x7	12.7	Acero	4.2	2	8	I	119.7
1x7	9.5	Acero	2.95	2	7.5	D	68.5

3.2. Ensayo de tracción de los alambres

Se realizaron en tres ensayos de tracción para cada uno de los alambres que conforman los 4 cables, mostrados en la Tabla 3.1. El procedimiento experimental seguido para los ensayos se realizó de acuerdo a la norma *ASTM A370-03a*[15] y la norma "ASTM E 8M"[14]. Los ensayos se realizaron en la máquina de ensayos "ZwickRoell Z100" de 10 [Ton], utilizando un extensómetro de 25[mm].

3.2.1. Probetas

Las probetas utilizadas para la realización de los ensayos de tracción fueron fabricadas de acuerdo a lo establecido por la norma "ASTM E 8M"[14], donde las dimensiones son las mostradas en la Tabla 3.2. Dado que el extensómetro que se tenía disponible para la realización de los ensayos era de 25[mm] de largo, las dimensiones utilizadas en **A** y **G** son mayores que las entregadas por lo probeta estandarizada (Tabla 2.1).

Tabla 3.2: Dimensiones de las probetas de acuerdo con la norma "ASTM E 8M"[14].

	D [mm]	A [mm]		G [mm]		R [mm]
		Norma ¹	Utilizado ¹	Norma ¹	Utilizado ¹	
Aluminio 4.7 [mm]	4.70	27.93	77	22.56	25	4
Aluminio 3.5 [mm]	3.50	20.81	77	16.80	25	3
Acero 4.2 [mm]	4.20	25.27	77	20.16	25	4
Acero 2.95 [mm]	2.95	17.89	77	14.16	25	3

Las dimensiones de las probetas utilizadas se muestran en las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

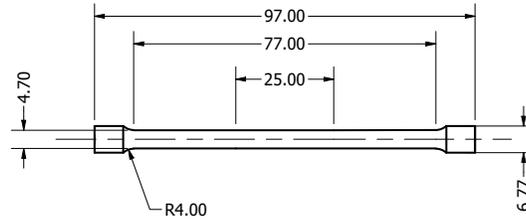


Figura 3.1: Dimensiones de la probeta del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.

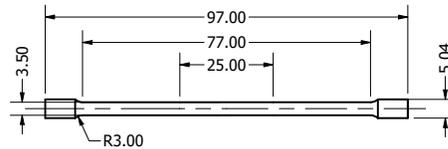


Figura 3.2: Dimensiones de la probeta del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

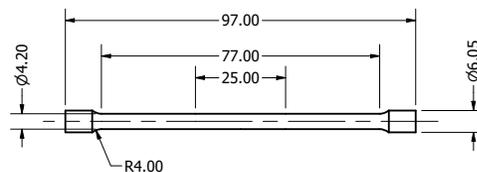


Figura 3.3: Dimensiones de la probeta del alambre acero de 4.2 [mm] de diámetro.

¹ Valores de **A** y **G** establecidos por la norma corresponden a la transformación isométrica de la probeta estándar definida en la "ASTM E 8M"[14]. Los valores utilizados difieren de la probeta estándar, pero siguen cumpliendo los parámetros recomendados en la norma.

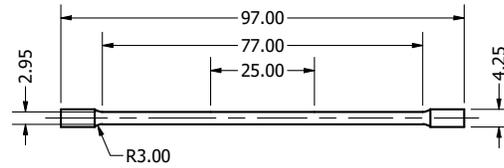
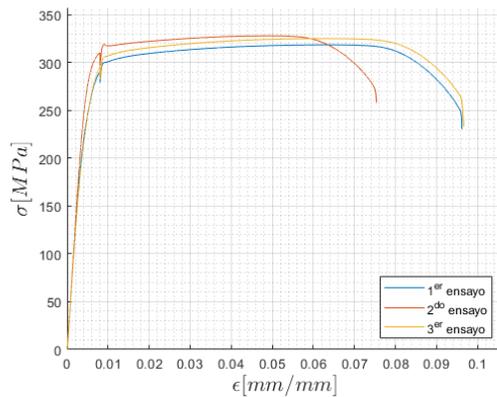


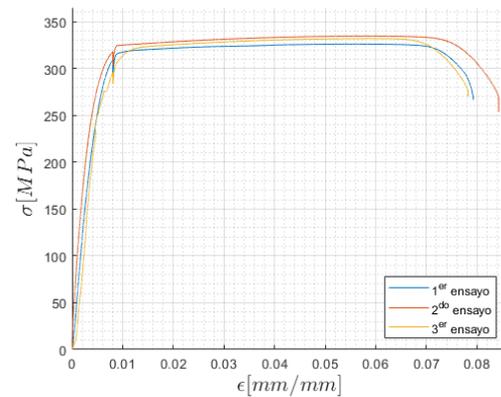
Figura 3.4: Dimensiones de la probeta del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

3.2.2. Ley de ingeniería experimental

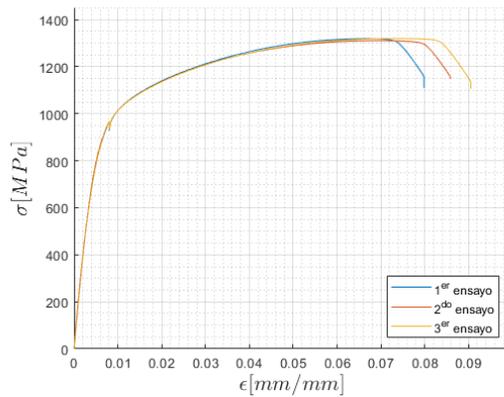
Del ensayo de tracción, se obtuvo las leyes de esfuerzo-deformación, las cuales se muestran en las figuras en los anexos A.1a, A.1b, A.1c y A.1d, a partir de las cuales, utilizando las Ecuaciones 2.3 y 2.4 se determinó las leyes de ingeniería para los cuatro alambres. Estas leyes se muestran en las Figuras 3.5a, 3.5b, 3.5c y 3.5d del Anexo A.



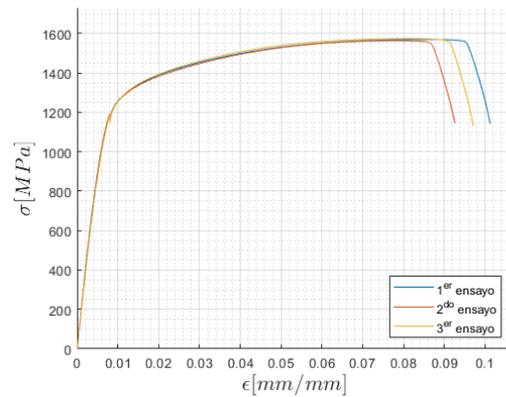
(a) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



(d) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 3.5: Ley esfuerzo-deformación ingenieril de los alambres de los cables mostrados en la Tabla 3.1.

3.2.3. Propiedades mecánicas

De las leyes de ingeniería, de acuerdo a la norma "ASTM E 8M"[14], se determinaron las propiedades mecánicas de cada uno de los alambres, las cuales se muestran en las Tablas A.1, A.2, A.4, A.3 y se encuentran resumidas en la Tabla 3.3, donde E es el módulo de Young, ϵ_y^{ing} y σ_y^{ing} la deformación y esfuerzo de ingeniería en la fluencia, ϵ_u^{ing} y σ_u^{ing} la deformación y esfuerzo de ingeniería al inicio de la estricción (esfuerzo último), ϵ_f^{ing} y σ_f^{ing} la deformación y esfuerzo de ingeniería en la fractura y n el parámetro de endurecimiento del modelo de Hollomon, Ecuación 2.14.

Tabla 3.3: Resumen módulo de elasticidad, punto de fluencia, último y fractura, y endurecimiento obtenido experimentalmente para cada alambre

	E [GPa]	ϵ_y^{ing} [mm/mm]	σ_y^{ing} [MPa]	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	σ_u^{ing} [MPa]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	σ_f^{ing} [MPa]	n
Aluminio 4.7 [mm]	64.60	0.00640	282.79	0.0585	323.97	0.0894	240.66	0.0512
Aluminio 3.5 [mm]	62.81	0.00673	293.59	0.0567	330.99	0.0806	263.43	0.0376
Acero 4.2 [mm]	195.85	0.00660	898.87	0.0702	1316.40	0.0854	1121.67	0.1116
Acero 2.95 [mm]	199.91	0.00787	1181.47	0.0810	1569.57	0.0969	1139.90	0.0813

Adicionalmente a las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente mediante la ley de ingeniería, se estimó, por medio de búsqueda bibliográfica el módulo de Poisson ν y la densidad ρ del acero y aluminio[8], las cuales se muestran en la Tabla 3.4. La reducción de área Z , se determinó a partir de un conjunto de alambres ensayados de acero de 2.95[mm] y aluminio de 3.5[mm] mostrados en el Anexo A, con los cuales se determinó el diámetro de fractura como es mostrado en la Tabla A.5, y utilizando la Ecuación 2.5 se determinó la reducción de área Z .

Tabla 3.4: Reducción de área y módulo de Poisson estimado.

	ν	Z	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]
Aluminio	0.33	0.536	2700
Acero	0.27	0.448	7860

Capítulo 4

Procedimiento numérico: estimación de la evolución del daño dúctil

Con el fin de determinar la evolución del daño dúctil en los cables, a medida que presentan un mayor número de alambres cortados, se realizara un procedimiento numérico. El procedimiento se encuentra subdividido en una serie de pasos, resolviendo el problema desde la unidad fundamental del cable, el alambre, a el cable con alambres cortados.

En base a los ensayos de tracción realizados a los alambres, se deberá ajustar una ley esfuerzo-deformación real mediante un proceso iterativo en un modelo de elementos finitos, **MEF**, la ley real se construirá utilizando un modelo de potencia no convergente, el modelo de Hockett-Sherby (**MHS**). Para realizar este ajuste se simulará en el **MEF** el ensayo de tracción realizado en los alambres, Sección 3.2, donde la ley de endurecimiento del material queda determinada por la ley real, la cual se ajustará de manera que de la simulación se obtenga la ley esfuerzo-deformación ingenieril experimental.

Luego, con el modelo de daño no-lineal acoplado Gurson–Tvergaard-Needleman(**MDGTN**), se determinarán los parámetros del modelo que permiten capturar la ley de daño de los alambres mediante un procedimiento iterativo. Para esto se requerirá la ley esfuerzo-deformación real sin daño de los alambres, la cual se determinará a partir de la ley esfuerzo-deformación real, ya que esta posee la ley de daño del alambre implícitamente. El ajuste de los parámetros del **MDGTN** se realizará en el **MEF**

Del **MEF**, utilizando el los parámetros obtenidos del **MDGTN** se determinará la ley de daño acoplada de los alambres. Las leyes obtenidas se ajustarán a la ley de daño del modelo de daño de Bonora (**MDB**), la cual permite capturar el comportamiento exponencial de la ley de daño. El ajuste permitirá normalizar las leyes de daño, caracterizando las leyes con el conjunto de parámetros del **MDB**.

Con las leyes de daño de los alambres determinadas, se utiliza un modelo de cables, donde se determinan las leyes ingenieriles de los alambres en los cables, virgen o con más de un alambre cortado. Conociendo las leyes de ingeniería de los alambres, se determinan sus leyes de daño de forma desacoplada, ya que el daño se encuentra implícito en las leyes de ingeniería. Luego, se determina la ley de daño de los cables mediante la definición del daño. La evolución del daño en los cables, a

medida que se le cortan alambres, se determina a partir de la ley de Miner y Ye Dui.

4.1. Modelo de elementos finitos

El modelo de elementos finitos, **MEF**, se utilizará para modelar los ensayos de tracción realizados en los alambres de los cables de acero y aluminio, mostrados en la Tabla 3.1. Este modelo se utilizará en primer lugar, mediante un proceso iterativo, para determinar las leyes esfuerzo-deformación real de los alambres. Luego, utilizando la ley real sin daño de los alambres, se incorporará un modelo micromecánico que incorpora la evolución de las microporosidades en el material, que determinan la evolución del daño dúctil.

El modelo de elementos finitos requiere un conjunto de información de entrada la cual permitirá realizar las simulaciones deseadas. Las propiedades de los materiales, la geometría del modelo, las condiciones de borde impuestas en este, el mallado de la geometría y las configuraciones de análisis. El software a utilizar para realizar las simulaciones es "ANSYS 2020 R2", en el módulo "Static Structural".

4.1.1. Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales se determinarán a partir de las propiedades mecánicas determinadas experimentalmente, mediante el ensayo de tracción. Como se mostró en la Sección 2.2, las propiedades mecánicas que se pueden determinar mediante un ensayo de tracción son el esfuerzo-deformación de fluencia, último y fractura, el módulo de Young y la reducción de área. Las propiedades mecánicas que no son obtenidas directamente del ensayo de tracción, como el módulo de Poisson¹ son determinadas a partir del estado del arte en la literatura.

Para capturar el endurecimiento producto de las deformaciones, se debe ingresar una ley de endurecimiento en el módulo "Multilinear isotropic hardening". La ley de endurecimiento corresponde a la ley real del material, esta ley puede tener de forma implícita el daño. En caso de ingresar una ley de endurecimiento sin daño, ley real sin daño, el daño debe ser incorporado utilizando un modelo de daño como el del **MDGTN**. El modelo de Gurson disponible en "ANSYS 2020 R2" requiere como configuración los parámetros del **MDGTN**, mostrados en la Sección 2.5.

4.1.2. Geometría

La geometría utilizada para la construcción del **MEF** debe permitir la correcta modelación de los ensayos de tracción realizados con los alambres. Con este propósito se opta por utilizar una probeta con las dimensiones establecidas por la norma "ASTM E 8M"[14]. No es estrictamente necesario utilizar las dimensiones del ensayo de tracción experimental, ya que el modelo de elementos finitos no tiene como restricciones el espacio para la instalación del extensómetro o la distancia mínima entre las mordazas del equipo.

¹ El módulo de Poisson se puede determinar en el ensayo de tracción, utilizando un extensómetro transversal y longitudinal de forma simultánea.

Dado que las probetas poseen tres ejes de simetría, para disminuir el costo computacional se podría modelar solo un octavo de la probeta, como la que se ve en la Figura 4.1, aplicando condiciones de borde adecuadas a las caras creadas. Pero, dado que se busca modelar el ensayo de tracción hasta la fractura, las condiciones de borde creadas en la superficie impiden la eliminación de elementos² en dichos lugares, alterando el resultado que se obtendría si se simulase la probeta entera.

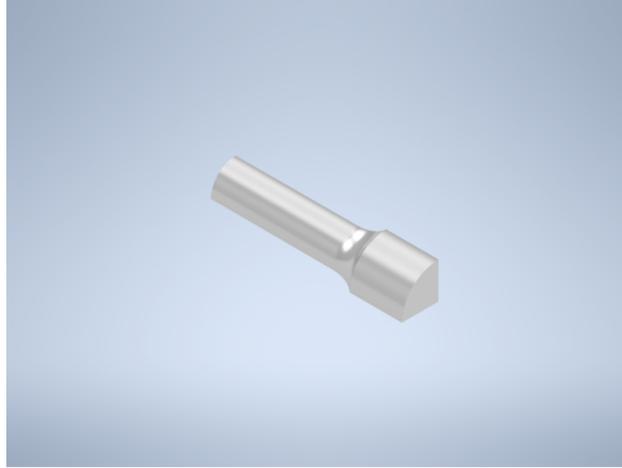


Figura 4.1: Octavo de probeta del cable de aluminio con 4.7 [mm] de diámetro.

Se utilizará la geometría de la probeta completa con las dimensiones establecidas en la Tabla 4.1 de acuerdo a la norma "ASTM E 8M", de acuerdo a los resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad realizados a los valores de **A** y **G**, mostrado en el Anexo B.1.

Tabla 4.1: Dimensiones de las probetas de acuerdo con la norma "ASTM E 8M"[14] y corregidas para satisfacer la estabilidad en la simulación del **MEF**.

	D [mm]	A [mm]		G [mm]		R [mm]
		Norma ³	Utilizado ³	Norma ³	Utilizado ³	
Aluminio 4.7 [mm]	4.70	27.93	50	22.56	50	4
Aluminio 3.5 [mm]	3.50	20.81	50	16.80	50	3
Acero 4.2 [mm]	4.20	25.27	50	20.16	50	4
Acero 2.95 [mm]	2.95	17.89	50	14.16	50	3

4.1.3. Condiciones de borde

Para modelar el ensayo de tracción se utilizaron dos condiciones de borde en la probeta, en la cara inferior se impone la condición de soporte fijo, área **B**, y en la cara superior la condición de

² La eliminación de elementos se realiza mediante la utilización del comando ekill, en "ANSYS 2020 R2", el cual no permite eliminar elementos que se encuentren con una restricción de sus grados de libertad. Código de eliminación de elementos en el Anexo D.1

³ Valores de **A** y **G** establecidos por la norma corresponden a la transformación isométrica de la probeta estándar definida en la "ASTM E 8M"[14]. Los valores utilizados difieren de la probeta estándar, pero siguen cumpliendo los parámetros recomendados en la norma.

desplazamiento, área **A**, como se muestra en la Figura 4.2, lo anterior de acuerdo a lo realizado por Kweon et al. (2020)[1].

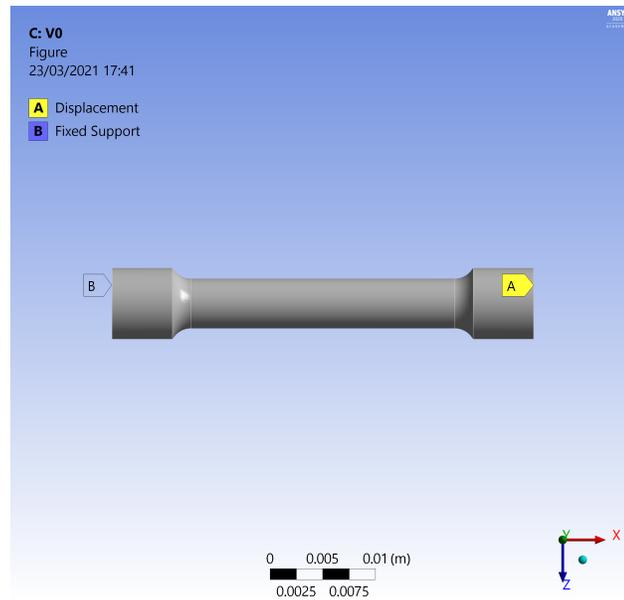
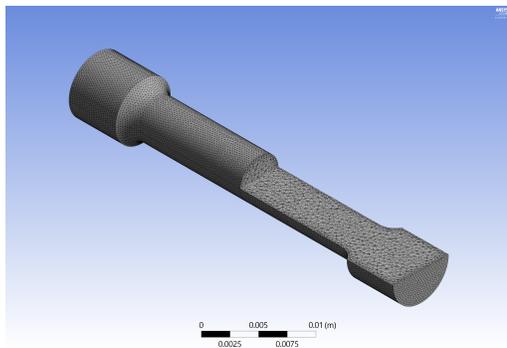


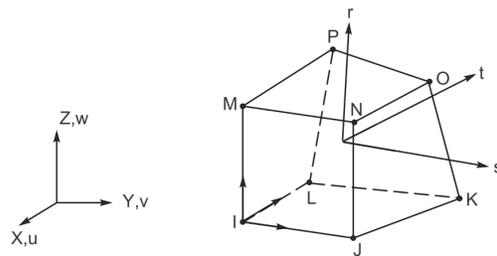
Figura 4.2: Configuración del ensayo de la probeta de aluminio de 4.7 [mm].

4.1.4. Mallado

Del análisis de sensibilidad realizado en el Anexo B.2, se decidió utilizar una malla uniforme con elementos de 0.5 [mm] de largo, con elementos hexaédricos SOLID45[38], obteniéndose una malla como la mostrada en la Figura 4.3a. El elemento SOLID45[38] es usado en el modelado 3D de estructuras sólidas, cada uno de los nodos de este elemento posee tres grados de libertad de traslación (direcciones \hat{r} , \hat{t} y \hat{s}) y permite modelar grandes deformaciones plásticas. Este elemento es mostrado en la Figura 4.3b.



(a) Mallado de 0.5 [mm] uniforme.



(b) Elemento SOLID45.[38]

Figura 4.3: Mallado de 0.5 [mm] uniforme, con elementos SOLID45.

4.1.5. Configuraciones de análisis

Dado que durante el ensayo de tracción se producirá la formación de la estricción en la probeta, es necesario activar la opción de "Large Deformations". Adicionalmente, se ajustará la duración del

ensayo a 10 segundos. Para determinar la ley de ingeniería del **MEF** se obtendrá de la simulación la reacción en el soporte fijo y el desplazamiento de la zona calibrada.

4.2. Ley real del MHS

Se seguirá el procedimiento establecido por Kweon et al. (2020)[1], con el **MEF** establecido en la Sección 4.1, con las dimensiones de las probetas de la Tabla 4.1 y un tamaño de elemento de $0.5[mm]$. En cada iteración se actualizará las propiedades del material, en particular el "Multilinear Isotropic Hardening", donde se ingresa la ley real determinada mediante el **MHS**. El ajuste se realizará hasta que la ley de ingeniería obtenida del **MEF** se ajuste a la ley de ingeniería experimental o, hasta que no se mejore cuantitativamente los resultados en comparación con las simulaciones previas.

Para determinar el valor de los resultados obtenidos se utilizará el **RMSE**, el cual corresponde al error cuadrático medio entre las leyes esfuerzo-deformación ingenieril experimental y simulada, como se muestra en la Ecuación 4.1. Se considerará que mientras menor sea el error obtenido, la ley esfuerzo-deformación obtenida por el **MEF** es mejor. Se tiene en cuenta que el valor obtenido de **RMSE** no representa ninguna variable física, por lo que no se debe considerar la magnitud obtenida. Donde, σ_{MEF}^{ing} corresponde a la ley de ingeniera obtenida utilizando el **MEF**.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma^{ing}_i - \sigma_{MEFi}^{ing})^2} \quad (4.1)$$

El procedimiento establecido por Kweon et al. (2020)[1] se muestra resumido en la Figura 4.4, donde, se pueden observar dos ciclos retroactivos, el primero es el que ajusta el valor de n , y está contenido en el ciclo de corrección de σ_f^B . Por lo cual, cada vez que se complete un ciclo de n , se realiza una iteración de σ_f^B .

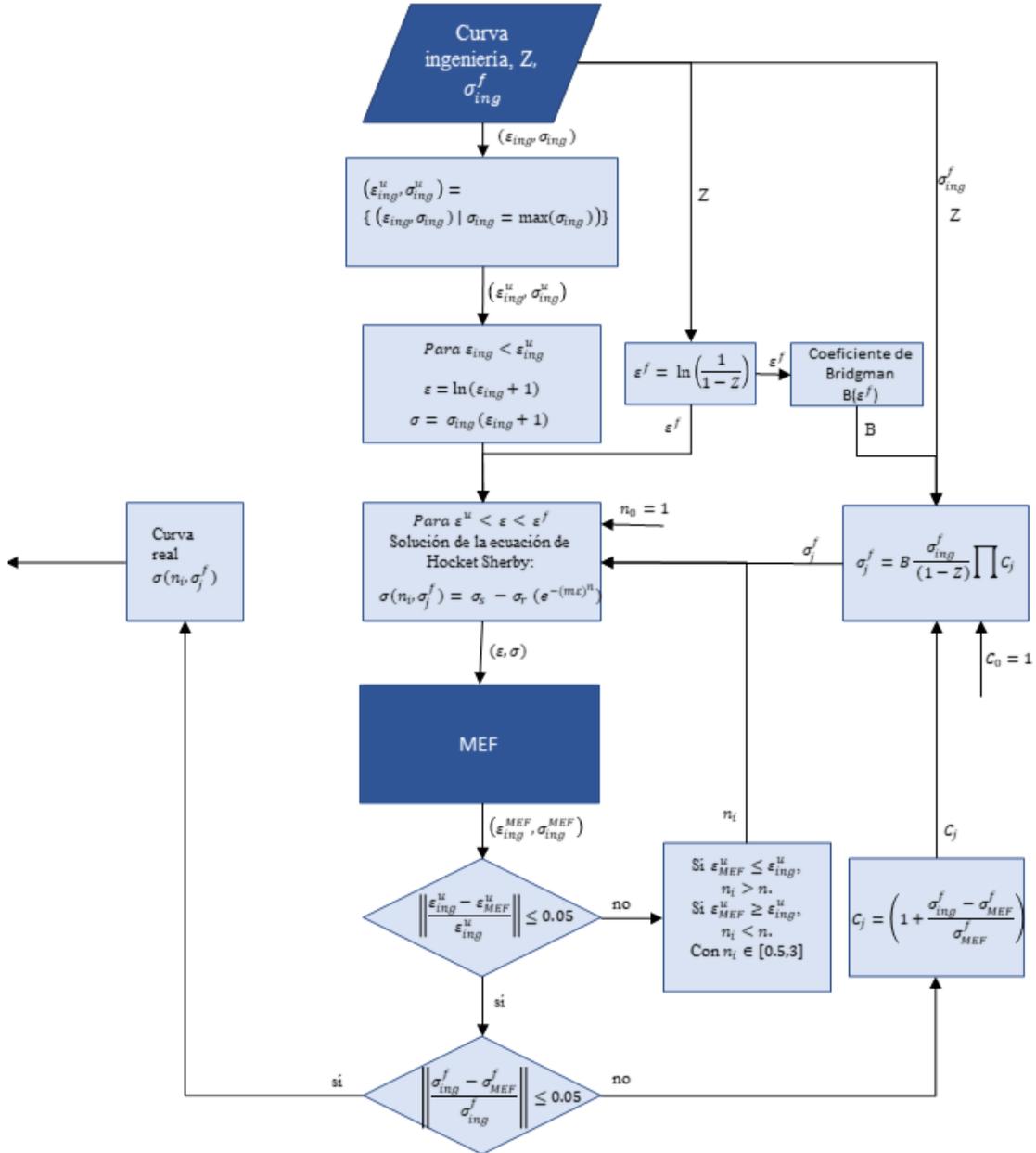


Figura 4.4: Diagrama de bloques del procedimiento utilizado para determinar la ley de esfuerzo versus deformación real de los alambres[1].

4.2.1. Ley real sin daño

Como se estableció en el capítulo 2.4.2.2, la ley real sin daño debe ser mayor a la ley real con daño, por lo cual se debe cumplir que los esfuerzos alcanzados en esta deben ser superiores, para mismos estados de deformación. Dado que el modelo que se utilizó para determinar la ley con daño es el **MHS**, que se muestra en la Ecuación 2.18, para cumplir la condición basta con elegir un σ_s mayor que el de la ley real obtenida para cada alambre.

4.3. Modelo de daño del MDGTN

El **MDGTN** permite incorporar a un modelo elastoplástico el daño producido por la nucleación, crecimiento y coalescencia de microporosidades en el material. El daño dúctil se caracteriza por la evolución de las microporosidades, por lo que el modelo elastoplástico debe ser la ley sin daño de los alambres. Por lo anterior, es necesario determinar en primer lugar un modelo de la ley sin daño del material. De acuerdo con Kweon et al. (2020)[1], la ley sin daño puede ser determinada por una ley de potencia[39] o particularmente por el modelo de Hollomon, mostrado en la Ecuación 2.14. Dado que ya se conocen las leyes reales de los materiales, las leyes sin daño pueden ser modeladas a partir del **MHS**, como una variación de la ley real obtenida.

De los resultados obtenidos en el Anexo E.1, se tiene que el ajuste de los parámetros constitutivos permite obtener resultados equivalentes a los que se obtienen ajustando los parámetros del material, en concordancia por lo expuesto por Springmann y Kuna (2005)[40], es por lo anterior que se realizara el ajuste de los parámetros del **MDGTN** modificando los parámetros constitutivos y los parámetros del material de forma separada.

No existe un procedimiento estandarizado para determinar los parámetros del **MDGTN**, ya que depende en gran medida de la información experimental que se tenga y no existe una única solución[40], por lo cual para ajustar los parámetros del **MDGTN** se utilizara el proceso iterativo mostrado en la Figura 4.5. Este proceso iterativo busca ajustar los parámetros del modelo, para que la ley de ingeniería obtenida por la **MEF** sea similar a la experimental. La similitud de estas leyes será medida utilizando el **RMSE**.

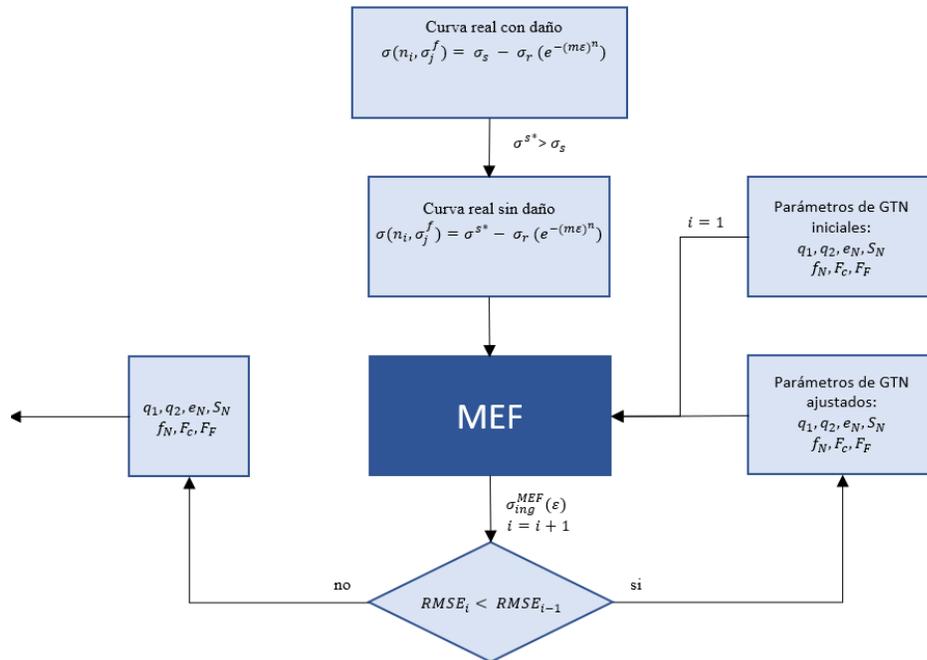


Figura 4.5: Diagrama de bloques del procedimiento utilizado para determinar los parámetros del **MDGTN**.

4.3.1. Ajuste de los parámetros constitutivos

Como valor inicial de los parámetros se consideran los valores mostrados en la Tabla 4.2, los cuales se seleccionaron a partir de la recopilación bibliográfica realizada por Benseddiq e Imad (2008)[28], y se ajustaron los parámetros constitutivos q_1 y q_2 , además de los parámetros del material e_N y S_N utilizando el proceso iterativo mostrado en la Figura 4.5

Tabla 4.2: Parámetros del **MDGTN** iniciales para el ajuste de los parámetros constitutivos.

	q_1	q_2	f_0	f_N	e_N	S_N	f_C	f_F	δ
Aluminio 4.7 [mm]	1.500	1.000	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167
Aluminio 3.5 [mm]	1.500	1.000	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167
Acero 4.2 [mm]	1.500	1.000	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167
Acero 2.95 [mm]	1.500	1.000	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167

4.3.2. Ajuste de los parámetros del material

Como valor inicial de los parámetros se consideran los valores mostrados en la Tabla 4.3, los cuales se seleccionaron a partir de la recopilación bibliográfica realizada por Benseddiq e Imad (2008)[28] y los parámetros constitutivos desde la Tabla 2.2. Utilizando el proceso iterativo mostrado en la Figura 4.5 se ajustaron los parámetros del material f_C , f_N y f_F , además de los parámetros e_N y S_N .

Tabla 4.3: Parámetros del **MDGTN** iniciales para el ajuste de los parámetros del material.

	q_1	q_2	f_0	f_N	e_N	S_N	f_C	f_F	δ
Aluminio 4.7 [mm]	1.564	0.973	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167
Aluminio 3.5 [mm]	1.704	0.975	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167
Acero 4.2 [mm]	1.511	0.914	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167
Acero 2.95 [mm]	1.453	0.953	0.001	0.040	0.160	0.05	0.15	0.25	5.167

4.4. Ley de daño ingenieril de los alambres

Las leyes de daño ingenieriles se pueden determinar de dos formas, la primera utilizando la definición de daño del **RVE**, Ecuación 2.26, y la segunda usando la expresión de daño definida a partir del **MDGTN**, Ecuación 2.53. Ambos métodos requieren los resultados de las simulaciones del **MEF** con los parámetros del **MDGTN** obtenidos de los ajustes. Dado que el resultado de las simulaciones del **MEF** son discretas, las ecuaciones de daño del **MDGTN** y **RVE** deben ser discretizadas.

Para determinar el daño mediante el **RVE**, es necesario considerar la expresión de la Ecuación 2.26, la cual puede ser discretizada como se muestra en la siguiente expresión:

$$D(t = t_i) = \frac{V_{poros}(t_i) - V_{poros}(t_{i-1})}{V_{RVE}(t_i) - V_{RVE}(t_{i-1})} + D(t = t_{i-1}) \quad (4.2)$$

donde, se tiene que $t_i = i\Delta t$, con $i \in \mathbb{N}^+$. Además, se tiene que el material es inicialmente virgen, por lo que el $D(t = t_0) = 0$, luego $V_{poros}(t_0) = 0$.

Como la variación de volumen del **RVE**, $\Delta V_{RVE} = V_{RVE}(t_i) - V_{RVE}(t_{i-1})$, depende de la variación de volumen por Poisson y porosidad, donde la segunda únicamente está relacionada con el daño. Por lo cual el **RVE** se puede escribir como:

$$V_{RVE}(t_i) = V_{RVE}^{Poisson}(t_i) + V_{RVE}^{poros}(t_i) + V_{RVE}(t_0) \quad (4.3)$$

donde, $V_{RVE}^{Poisson}$ se puede determinar desde el **MEF** sin el modelo de daño, por lo que queda expresado como, $V_{RVE}^{Poisson}(t_i) = V_{RVE}^{sindaño}(t_i) - V_{RVE}^{sindaño}(t_0)$, dado que $V_{RVE}^{poros} = 0$.

Luego V_{poros} se determina a partir del **MEF** con el modelo de daño incorporado, de manera que este queda determinado como:

$$V_{RVE}^{poros}(t_i) = V_{RVE}(t_i) - V_{RVE}^{Poisson}(t_i) - V_{RVE}(t_0) \quad (4.4)$$

El daño en el **MDGTN** se determina a partir de la Ecuación 2.53, la cual se puede expresar como:

$$D(t_i) = 1 - \sqrt{1 + q_3 f^*(t_i)^2 - 2q_1 f^*(t_i) \cosh\left(\frac{3}{2}q_2 T_x(t_i)\right)} \quad (4.5)$$

Donde q_1 y q_2 son parámetros constitutivos del **MDGTN**, que se determinan como se muestra en la Sección 4.3, y f^* y T_x se determinan a partir del **MEF**.

La porosidad corregida, f^* , se determina a partir de la Ecuación 2.41, donde los parámetros del **MDGTN** se determinan como se muestra en la Sección 4.3. El valor de la porosidad f se determina a partir del **MEF**, utilizando la expresión de la Ecuación 2.45, la cual puede ser expresada de forma discreta, como se muestra a continuación:

$$f(t_i) = \Delta f_{nucleación} + \Delta f_{crecimiento} + f(t_{i-1}) \quad (4.6)$$

donde, $\Delta f_{nucleación}$ y $\Delta f_{crecimiento}$ se pueden determinar de forma diferencial como se muestra en las Ecuaciones 2.46 y 2.51 respectivamente.

Las evoluciones de la porosidad, $\Delta f_{nucleación}$ y $\Delta f_{crecimiento}$, se pueden determinar de forma discreta como se muestra en las Ecuaciones 4.7 y 4.8 respectivamente:

$$\Delta f_{nucleación} = A\Delta\epsilon_{vm}^p + B(\Delta\epsilon_{vm} + c\Delta\sigma_{kk}) \quad (4.7)$$

$$\Delta f_{crecimiento} = (1 - f)\Delta\epsilon_{kk}^p \quad (4.8)$$

donde, $\Delta\epsilon_{vm}^p = \epsilon_{vm}^p(t_i) - \epsilon_{vm}^p(t_{i-1})$, $\Delta\epsilon_{vm} = \epsilon_{vm}(t_i) - \epsilon_{vm}(t_{i-1})$, $\Delta\sigma_{kk} = \sigma_{kk}(t_i) - \sigma_{kk}(t_{i-1})$ y $\Delta\epsilon_{kk} = \epsilon_{kk}(t_i) - \epsilon_{kk}(t_{i-1})$.

4.4.1. Ajuste a él MDB

El modelo de daño de Bonora, **MDB**, permite modelar el comportamiento exponencial de la acumulación de daño que se obtiene del **MDGTN**. Con fin de seleccionar una ley de daño representativa para cada alambre, las leyes obtenidas utilizando los métodos del **MDGTN** o **RVE** son ajustadas a

la ley de daño del **MDB**, mostrada en la Ecuación 2.58, lo cual permite caracterizarlas en función de cinco parámetros.

4.5. Ley ingenieril de los cables

Utilizando el modelo de cables de Beltrán et al. (2018)[7] para determinar la ley ingenieril de los cables, se determinan las leyes ingenieriles de los cables establecidos en la Tabla 3.1, considerando los casos mostrados en las Figuras 4.6. Adicional a las leyes ingenieriles de los cables se obtiene también las leyes ingenieriles de los alambres.

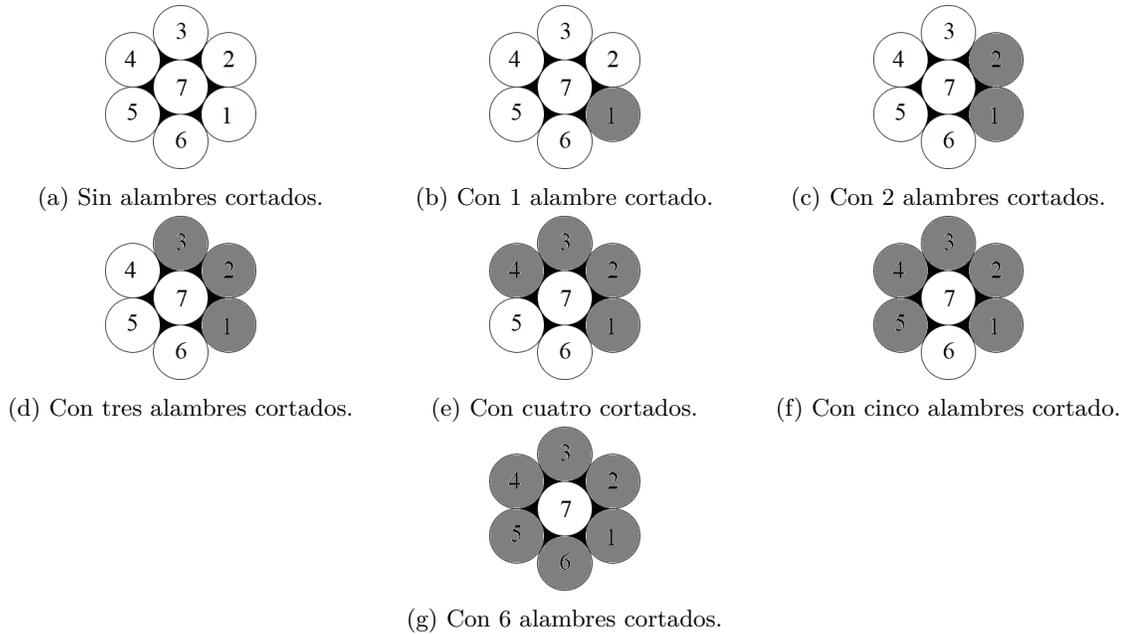


Figura 4.6: Cable 1×7 a analizar, con distintos estados de daño inicial.

4.6. Ley de daño ingenieril de los cables

Dado que las leyes de daño de los alambres están en el plano de las deformaciones ingenieriles, se determina el estado de daño de los alambres, y utilizando la definición de daño de 2.28 se determina la evolución del daño desacoplada en el cable. Lo anterior para cada uno de los casos mostrados en las Figuras 4.6. Adicional a la ley de daño del cable determinada por la evolución del daño en los alambres, se determinará a partir de la ley de daño de Miner, Ecuación 2.63, y la expresión de daño de Duyi y Zhenlin (2001)[26], Ecuación 2.64 otras métricas de la evolución del daño en los cables.

Capítulo 5

Resultados: leyes de daño dúctil en cables dañados

5.1. Modelo del MHS

5.1.1. Parámetros del MHS

Los parámetros del **MHS** obtenidos del proceso iterativo, mostrado en el diagrama de bloques de la Figura 4.4, se muestran en la Tabla 5.1.

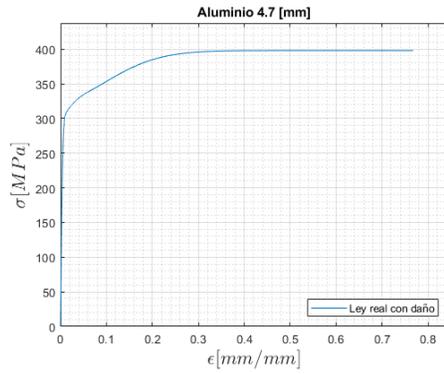
Tabla 5.1: Parámetros del **MHS** obtenidos para cada uno de los alambres.

	σ_s [MPa]	σ_r [MPa]	m	n
Aluminio 4.7 [mm]	397.8	71.8	6.7	1.825
Aluminio 3.5 [mm]	400.4	68.6	7.6	1.800
Acero 4.2 [mm]	1,561.4 ¹	11.8e+6 ¹	5.0e+11 ¹	0.100 ¹
Acero 2.95 [mm]	2,033.1	406.6	5.72	2.050

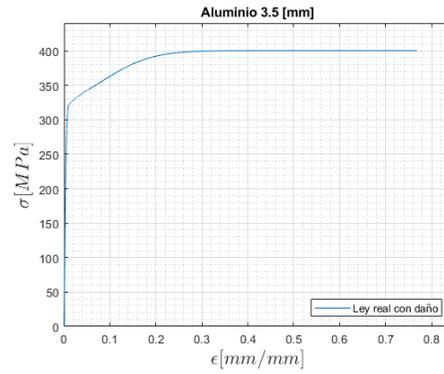
5.1.2. Ley real del MHS

Utilizando el procedimiento iterativo mostrado en el diagrama de bloques de la Figura 4.4, se obtuvieron las leyes reales con daño mostradas en las Figuras 5.1a, 5.1b, 5.1c y 5.1d.

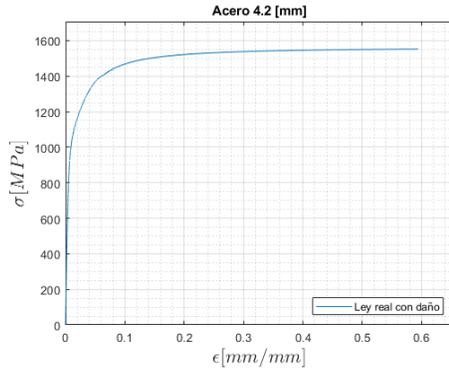
¹ Los parámetros del **MHS** obtenidos para el alambre de acero de 4.2 [mm] corresponden a los que minimizan el **RMSE**, a pesar de que no se ajusten a los rangos establecidos en 2.3.1.



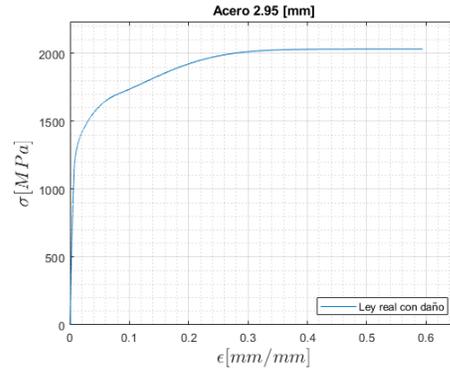
(a) Ley real con daño del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Ley real con daño del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Ley real con daño del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

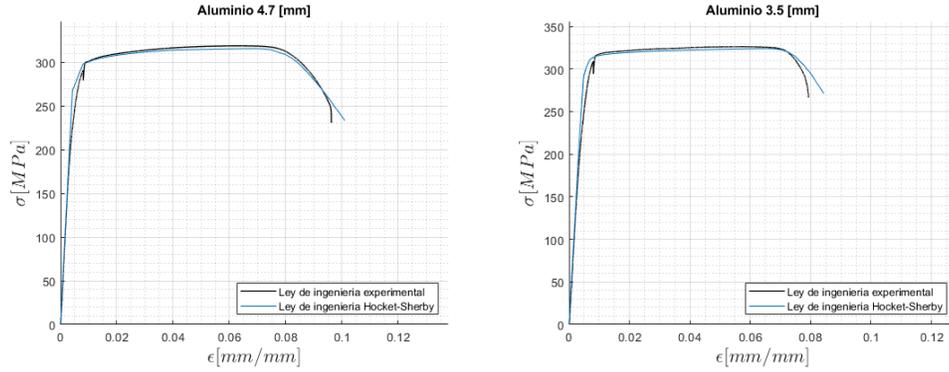


(d) Ley real con daño del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

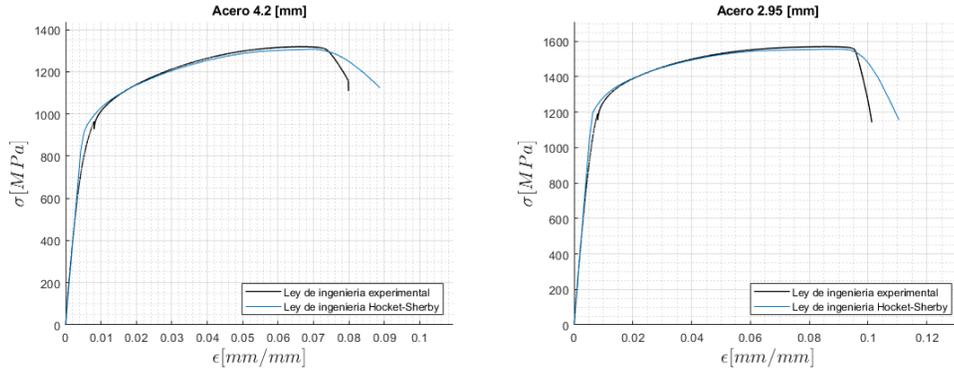
Figura 5.1: Leyes reales con daño obtenidas del **MHS**.

5.1.3. Ley ingenieril MEF

Las leyes ingenieriles del **MEF** de las Figuras 5.2a, 5.2b, 5.2c y 5.2d fueron obtenidas del **MEF** con las leyes reales del **MHS** como "Multilinear Isotropic Hardening", estas poseen el daño incorporado de forma implícita.



(a) Ley ingenieril con daño del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ley ingenieril con daño del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Ley ingenieril con daño del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ley ingenieril con daño del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.2: Leyes reales con daño obtenidas del **MHS**.

5.1.4. Ley real sin daño

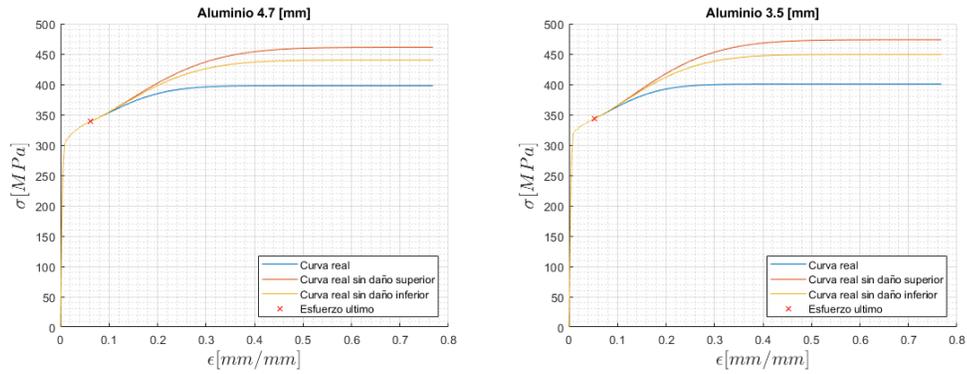
Dado que no se determinó en los ensayos de tracción el daño crítico (D_c) de los alambres, no se puede determinar el valor de σ_s de forma exacta. A pesar de lo anterior se pueden determinar dos valores de D_C , para establecer un límite superior e inferior para la ley real sin daño. Utilizando los parámetros del **MHS** encontrados para cada alambre (Tabla 5.1), se seleccionan dos valores arbitrarios de σ_s , el límite superior será 1.15 veces el valor obtenido en la ley real y el valor inferior 1.1 veces, los cuales serán validados en función de los resultados obtenidos del ajuste del **MDGTN**. De esta manera los parámetros del **MHS** son los mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros del **MHS** obtenidos para cada uno de los alambres.

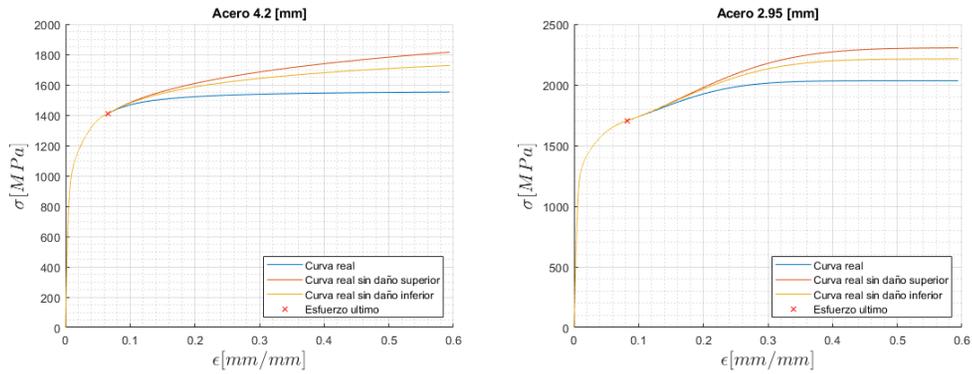
	σ_s [MPa] Superior	σ_s [MPa] Inferior	σ_r [MPa]	m	n
Aluminio 4.7 [mm]	457.47	437.58	71.8	6.7	1.825
Aluminio 3.5 [mm]	460.46	440.44	68.6	7.6	1.800
Acero 4.2 [mm]	1,795.61	1,717.54	11.8e+6	5.0e+11	0.100
Acero 2.95 [mm]	2,338.06	2,236.41	406.6	5.72	2.050

Utilizando los parámetros del **MHS** mostrados en la Tabla 5.2, con la Ecuación 2.18 del **MHS**, se determinan las leyes reales sin daño para cada alambre, las cuales se muestran en las Figuras 5.3a,

5.3b, 5.3c y 5.3d. La ley real posee el daño de forma implícita.



(a) Leyes reales sin daño para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Leyes sin daño para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



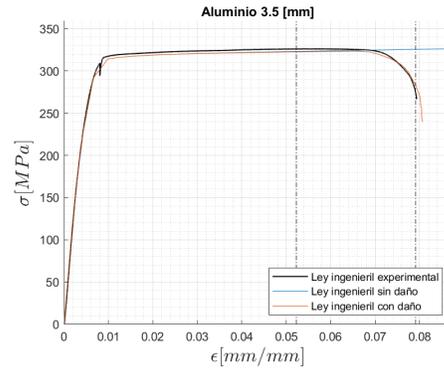
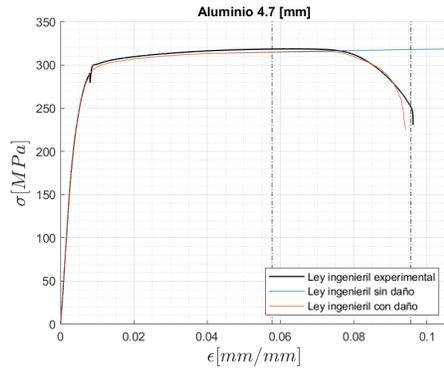
(c) Leyes sin daño para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Leyes sin daño para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.3: Leyes sin daño superior e inferior de los alambres.

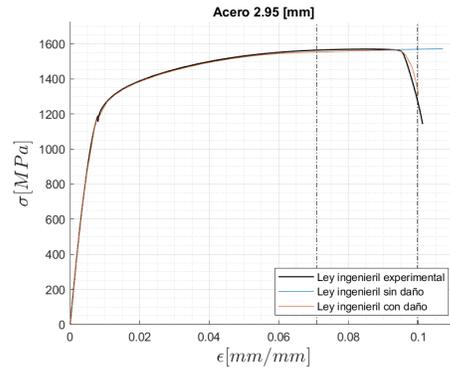
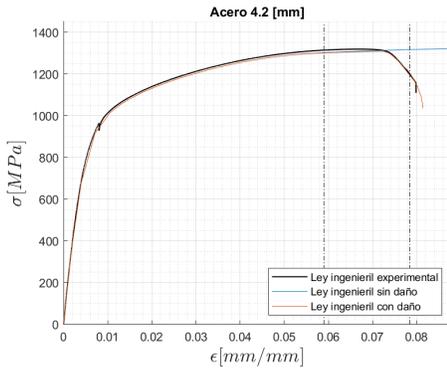
5.2. Modelo de daño del MDGTN

5.2.1. Ajuste de los parámetros constitutivos

Considerando los análisis de sensibilidad realizados en el Anexo E.1, se realizó un proceso de ajuste de los parámetros de constitutivos del MDGTN, mostrado en la Figura 4.5. Como conjunto inicial de los parámetros se consideran los valores mostrados en la Tabla 4.2, y, se ajustaron los parámetros constitutivos q_1 y q_2 , además de los parámetros del material e_N y S_N utilizando las leyes reales sin daños de las Figuras 5.3. Las leyes ingenieriles con daño resultantes se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5, para la ley real sin daño superior e inferior respectivamente.

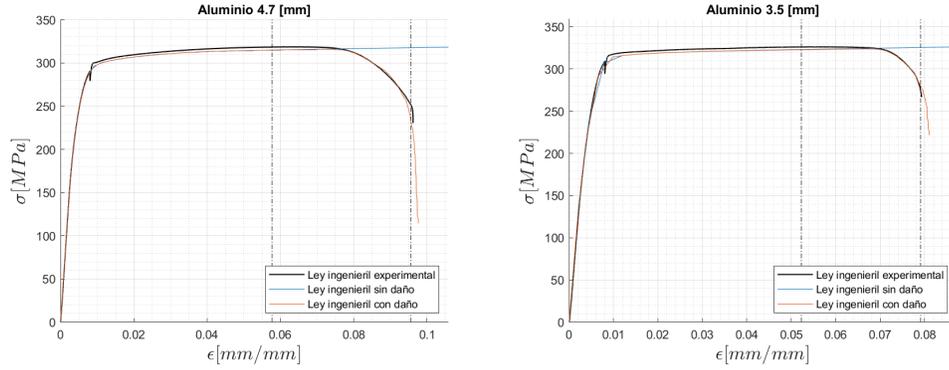


(a) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, (b) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

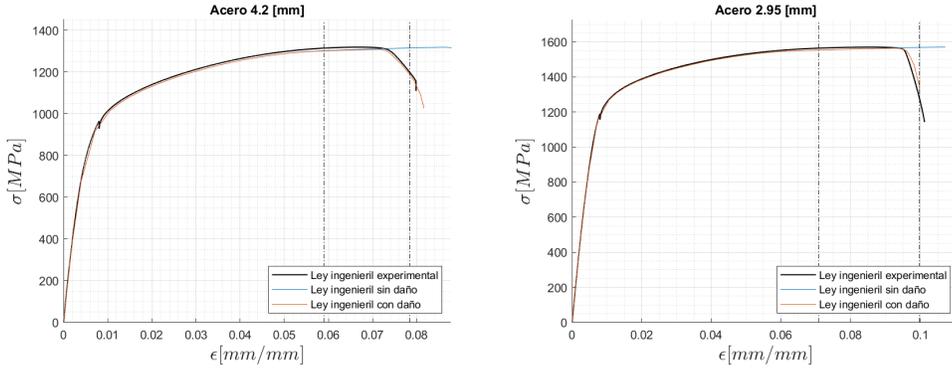


(c) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, (d) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro, para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.4: Leyes de ingeniería con daño del MDGTN, ajustando los parámetros constitutivos y utilizando la ley real sin daño superior.



(a) Ley de ingeniería con daño del MDGNTN, (b) Ley de ingeniería con daño del MDGNTN, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Ley de ingeniería con daño del MDGNTN, (d) Ley de ingeniería con daño del MDGNTN, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.5: Leyes de ingeniería con daño del MDGNTN, ajustando los parámetros constitutivos y utilizando la ley real sin daño inferior.

Los parámetros del MDGNTN obtenidos para el ajuste de los parámetros constitutivos, que generan las leyes ingenieriles con daño mostradas en las Figuras 5.4 y 5.5, se muestran en la Tabla 5.3.

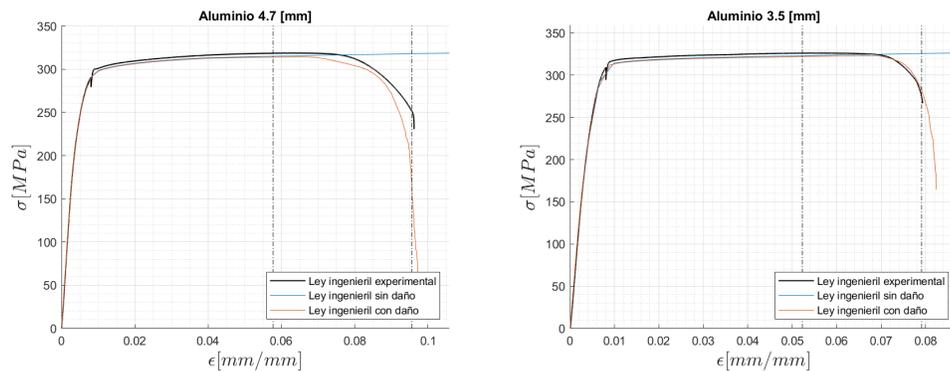
Tabla 5.3: Parámetros del MDGNTN obtenidos mediante el ajuste de los parámetros constitutivos.

	q_1	q_2	f_0	f_N	e_N	S_N	f_C	f_F	δ
Superior									
Aluminio 4.7 [mm]	1.500	1.500	0.001	0.040	0.181	0.048	0.150	0.250	5.167
Aluminio 3.5 [mm]	1.500	1.650	0.001	0.040	0.162	0.048	0.150	0.250	5.167
Acero 4.2 [mm]	1.500	1.800	0.001	0.040	0.146	0.039	0.150	0.250	5.167
Acero 2.95 [mm]	1.500	2.000	0.001	0.040	0.210	0.044	0.150	0.250	5.167
Inferior									
Aluminio 4.7 [mm]	1.500	1.400	0.001	0.040	0.189	0.048	0.150	0.250	5.167
Aluminio 3.5 [mm]	1.500	1.650	0.001	0.040	0.172	0.048	0.150	0.250	5.167
Acero 4.2 [mm]	1.500	1.700	0.001	0.040	0.151	0.039	0.150	0.250	5.167
Acero 2.95 [mm]	1.500	2.000	0.001	0.040	0.215	0.044	0.150	0.250	5.167

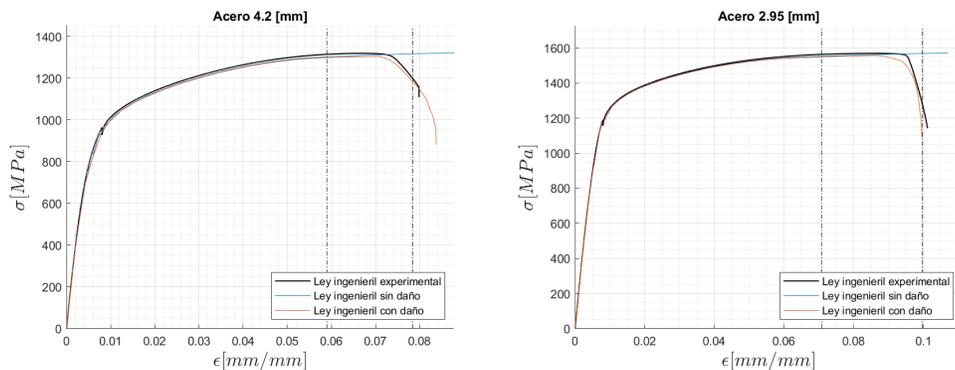
5.2.2. Ajuste de los parámetros del material

Considerando los análisis de sensibilidad realizados en el Anexo E.1, se realizó un proceso de ajuste de los parámetros del material f_C y f_F . Como valores iniciales de los parámetros del **MDGTN** se utilizaron los establecidos en la Tabla 4.3, y, dado que e_N y S_N son parámetros del material y estos ya fueron ajustados con los parámetros constitutivos, se utilizaron los obtenidos en la Tabla 5.3. Se realiza el ajuste para las leyes sin daño superior e inferior de la Figura 5.3. Las leyes ingenieriles con daño resultantes se muestran en las Figuras 5.6 y 5.7, para la ley real sin daño superior e inferior respectivamente.

Considerando los análisis de sensibilidad realizados en el Anexo E.1, se realizó un proceso de ajuste de los parámetros de constitutivos del **MDGTN**, como valor inicial de los parámetros se consideran los valores mostrados en la Tabla 4.2, y se ajustaron los parámetros constitutivos q_1 y q_2 , además de los parámetros del material e_N y S_N utilizando las leyes reales sin daños de las Figuras 5.3. Las leyes ingenieriles con daño resultantes se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5, para la ley real sin daño superior e inferior respectivamente.

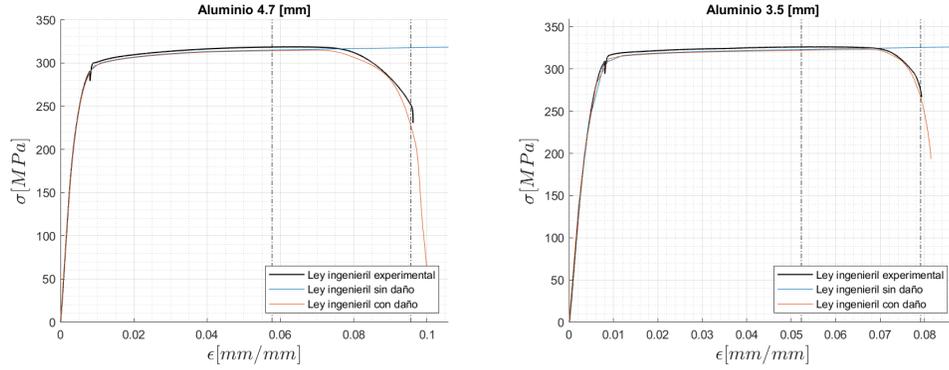


(a) Ley de ingeniería con daño del **MDGTN**, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ley de ingeniería con daño del **MDGTN**, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

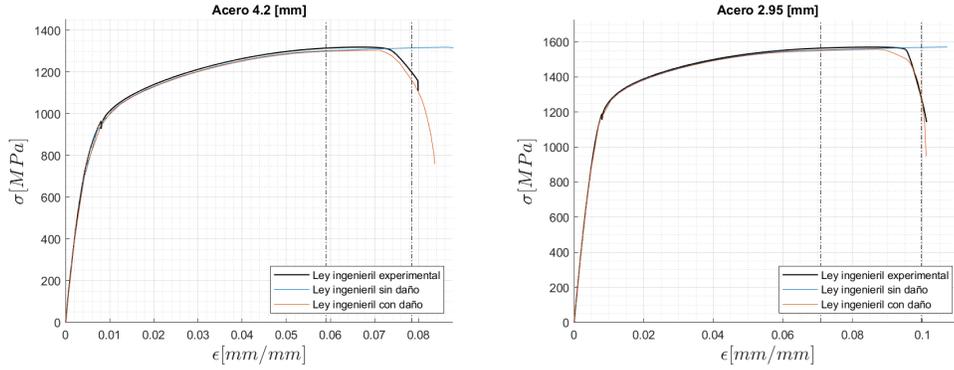


(c) Ley de ingeniería con daño del **MDGTN**, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ley de ingeniería con daño del **MDGTN**, para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.6: Ley de ingeniería con daño del **MDGTN**, ajustando los parámetros del material, utilizando la ley real sin daño superior.



(a) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, (b) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(c) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, (d) Ley de ingeniería con daño del MDGTN, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

Figura 5.7: Ley de ingeniería con daño del MDGTN, ajustando los parámetros del material, utilizando la ley real sin daño inferior.

Los parámetros del MDGTN obtenidos por el ajuste que generan las leyes con daño mostradas en las Figuras 5.6 y 5.7, se muestran en la Tabla 5.4.

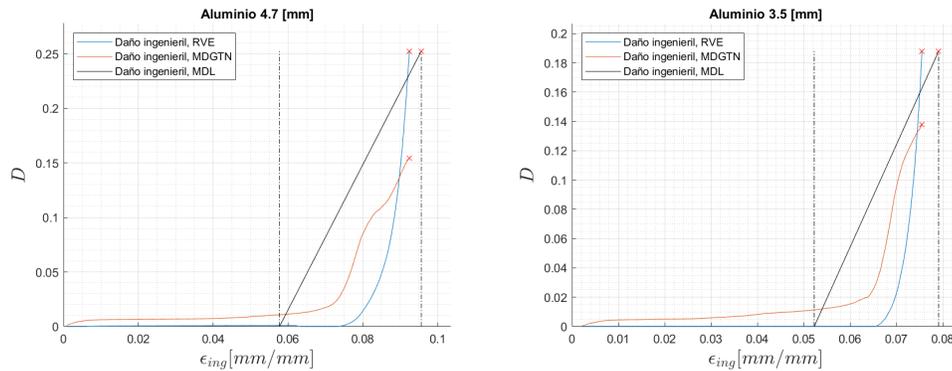
Tabla 5.4: Parámetros del MDGTN obtenidos mediante el ajuste de los parámetros del material.

	q_1	q_2	f_0	f_N	e_N	S_N	f_C	f_F	δ
Superior									
Aluminio 4.7 [mm]	1.564	0.973	0.001	0.040	0.172	0.048	0.050	0.286	2.500
Aluminio 3.5 [mm]	1.704	0.975	0.001	0.050	0.168	0.048	0.050	0.229	3.000
Acero 4.2 [mm]	1.511	0.914	0.001	0.040	0.137	0.039	0.030	0.241	3.000
Acero 2.95 [mm]	1.453	0.953	0.001	0.040	0.190	0.044	0.040	0.184	4.500
Inferior									
Aluminio 4.7 [mm]	1.564	0.973	0.001	0.040	0.184	0.048	0.050	0.286	2.500
Aluminio 3.5 [mm]	1.704	0.975	0.001	0.050	0.175	0.048	0.050	0.229	3.000
Acero 4.2 [mm]	1.511	0.914	0.001	0.040	0.145	0.039	0.030	0.241	3.000
Acero 2.95 [mm]	1.453	0.953	0.001	0.040	0.199	0.044	0.040	0.184	4.500

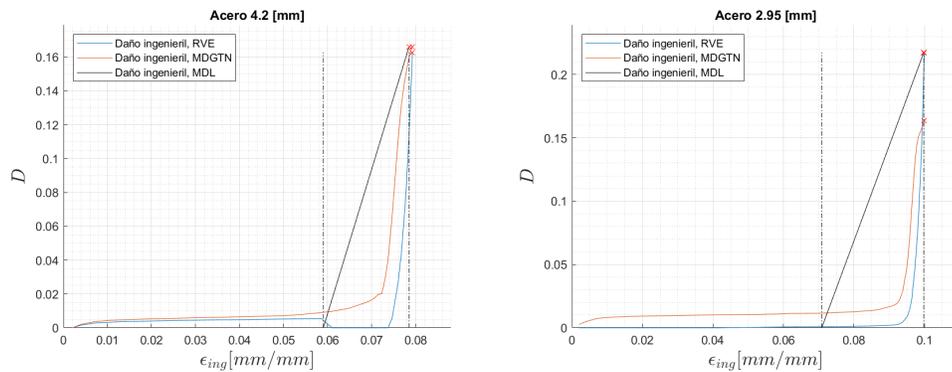
5.3. Ley de daño ingenieril de los alambres

Utilizando los parámetros del MDGTM ajustados, y siguiendo el procedimiento establecido en 4.4, se obtienen las leyes de daño utilizando el MDGTM, el RVE y el MDL. Las leyes de daño, con los parámetros constitutivos del MDGTM ajustados, se muestran en las Figuras 5.8 y 5.9, para la ley real sin daño superior e inferior respectivamente. Las leyes de daño, con los parámetros del material del MDGTM ajustados, se muestran en las Figuras 5.10 y 5.11, para la ley real sin daño superior e inferior respectivamente.

5.3.1. Ajuste de los parámetros constitutivos

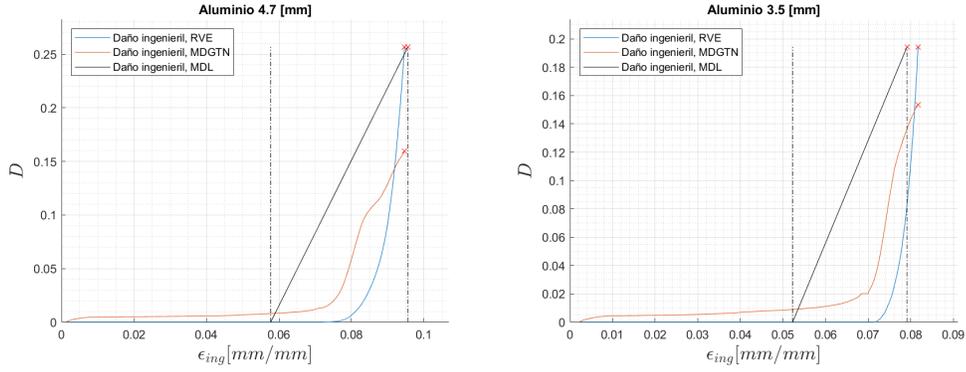


(a) Ley de daño ingenieril del MDGTM, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ley de daño ingenieril del MDGTM, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

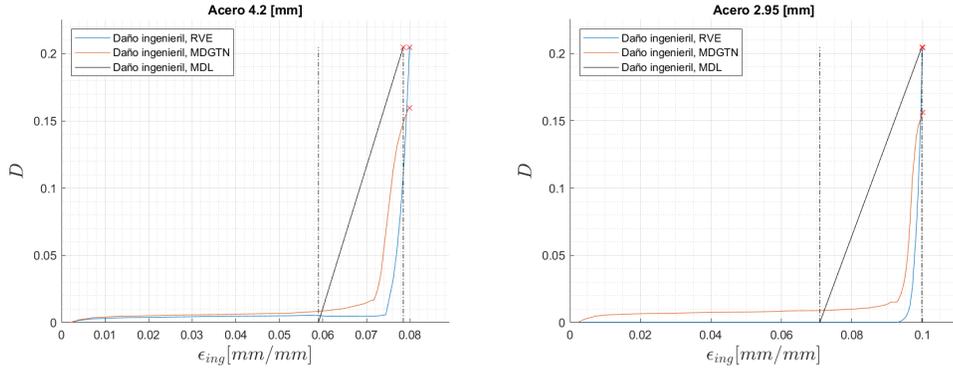


(c) Ley de daño ingenieril del MDGTM, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ley de daño ingenieril del MDGTM, para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.8: Ley de daño ingenieril del MDGTM, ajustando los parámetros constitutivos, utilizando la ley real sin daño superior.



(a) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

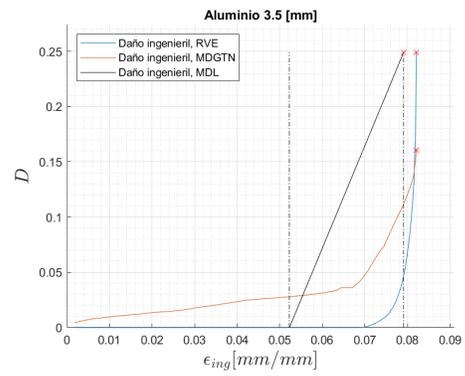
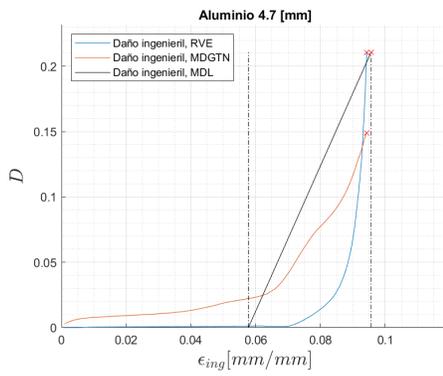
Figura 5.9: Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, ajustando los parámetros constitutivos, utilizando la ley real sin daño inferior.

De las leyes de daño obtenidas ajustando los parámetros de constitutivos del **MDGTN**, Figuras 5.8 y 5.9, se obtuvieron los daños críticos que se muestran en la Tabla 5.5. Los valores obtenidos están agrupados de acuerdo al método utilizado para medir el estado de daño del **MEF**.

Tabla 5.5: Daño crítico D_C obtenido para cada uno de los alambres, con los parámetros del **MDGTN** ajustados por los parámetros constitutivos.

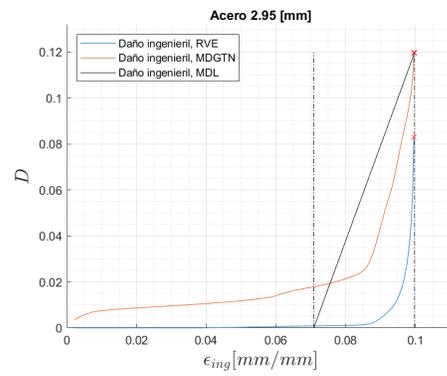
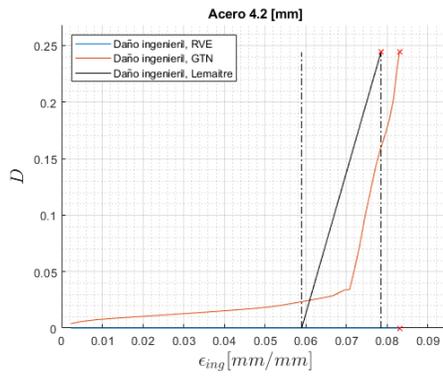
	RVE			GTN		
	D_C Superior	D_C Inferior	\overline{D}_c	D_C Superior	D_C Inferior	\overline{D}_c
Aluminio 4.7 [mm]	0.252	0.257	0.255	0.155	0.160	0.157
Aluminio 3.5 [mm]	0.188	0.194	0.191	0.138	0.154	0.146
Acero 4.2 [mm]	0.163	0.205	0.184	0.166	0.160	0.163
Acero 2.95 [mm]	0.217	0.205	0.211	0.164	0.156	0.160

5.3.2. Ajuste de los parámetros del material



(a) Ley de daño ingenieril del MDGTN, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.

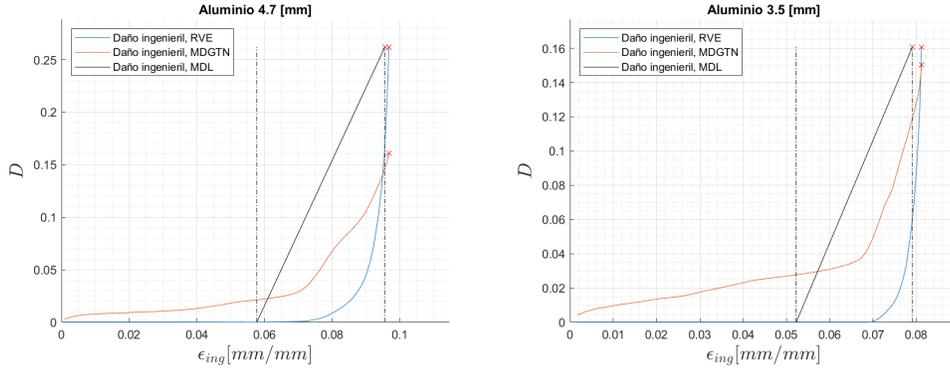
(b) Ley de daño ingenieril del MDGTN, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



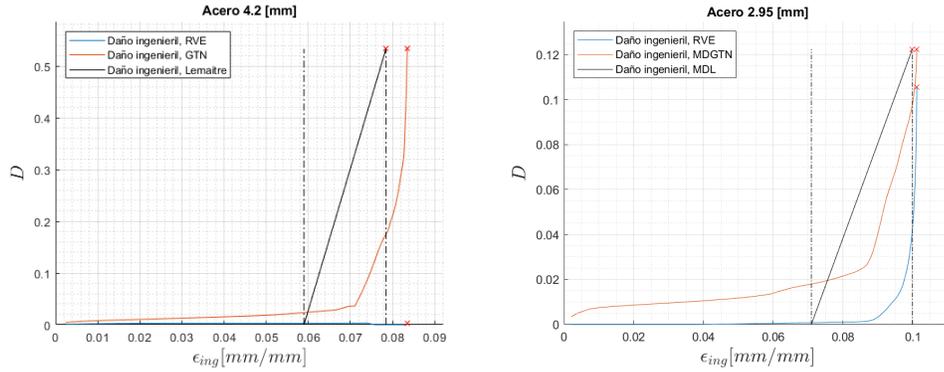
(c) Ley de daño ingenieril del MDGTN, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

(d) Ley de daño ingenieril del MDGTN, para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.10: Ley de daño ingenieril del MDGTN, ajustando los parámetros del material, utilizando la ley real sin daño superior.



(a) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 5.11: Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, ajustando los parámetros del material, utilizando la ley real sin daño inferior.

De las leyes de daño obtenidas ajustando los parámetros del material del **MDGTN**, Figuras 5.10 y 5.11, se obtuvieron los daños críticos que se muestran en la Tabla 5.6. Los valores obtenidos están agrupados de acuerdo al método utilizado para medir el estado de daño del **MEF**.

Tabla 5.6: Daño crítico D_C obtenido para cada uno de los alambres, con los parámetros del **MDGTN** ajustados por los parámetros del material.

	RVE			GTN		
	D_C Superior	D_C Inferior	\overline{D}_c	D_C Superior	D_C Inferior	\overline{D}_c
Aluminio 4.7 [mm]	0.211	0.262	0.237	0.149	0.161	0.155
Aluminio 3.5 [mm]	0.249	0.161	0.205	0.161	0.150	0.156
Acero 4.2 [mm]	- ²	- ²	- ²	0.240 ²	0.533 ²	0.387 ²
Acero 2.95 [mm]	0.083	0.106	0.094	0.120	0.126	0.123

² La simulación del **MEF** con los parámetros del **MDGTN** seleccionados no pudieron entregar la información requerida para realizar el análisis de evolución del daño utilizando el método del **RVE**, y no entregaron una solución estable para el daño calculado con el **MDGTN**.

5.3.3. Ajuste a el MDB

Las leyes de daño ingenieril obtenidas en la Secciones 5.3.1 y 5.3.1 se ajustaron a la ley de daño del **MDB**, ajustes que se muestran en el Anexo F. En particular se ajustan las leyes de daño obtenidas del **MDGTN** utilizando el método del **RVE**, ya que estas generan resultados más estables, como se determinará en la Sección 6.3.1. Se obtienen los parámetros del **MDB** mostrados en la Tabla 5.7 y 5.8, para el ajuste de los parámetros del **MDGTN** constitutivos y del material respectivamente.

Tabla 5.7: Parámetros del **MDB**, para las leyes de daño del **MDGTN**, ajustadas por los parámetros constitutivos[37].

Superior					
	ϵ_D [mm/mm]	ϵ_{cr} [mm/mm]	D_C	D_0	α
Aluminio 4.7 [mm]	0.0775	0.0925	0.2523	0.0	0.440
Aluminio 3.5 [mm]	0.0666	0.0755	0.1880	0.0	0.490
Acero 4.2 [mm]	0.0737	0.0792	0.1661	0.0	0.587
Acero 2.95 [mm]	0.0932	0.0999	0.2174	0.0	0.497
Inferior					
	ϵ_D [mm/mm]	ϵ_{cr} [mm/mm]	D_C	D_0	α
Aluminio 4.7 [mm]	0.0794	0.0947	0.2569	0.0	0.425
Aluminio 3.5 [mm]	0.0728	0.0817	0.1944	0.0	0.535
Acero 4.2 [mm]	0.0726	0.0799	0.2048	0.0	0.562
Acero 2.95 [mm]	0.0953	0.1000	0.2047	0.0	0.568

Tabla 5.8: Parámetros del **MDB**, para las leyes de daño del **MDGTN**, ajustadas por los parámetros del material[37].

Superior					
	ϵ_D [mm/mm]	ϵ_{cr} [mm/mm]	D_C	D_0	α
Aluminio 4.7 [mm]	0.0731	0.0943	0.2108	0.0	0.338
Aluminio 3.5 [mm]	0.0721	0.0821	0.2492	0.0	0.267
Acero 4.2 [mm]	_3	_3	_3	_3	_3
Acero 2.95 [mm]	0.0898	0.0996	0.1198	0.0	0.225
Inferior					
	ϵ_D [mm/mm]	ϵ_{cr} [mm/mm]	D_C	D_0	α
Aluminio 4.7 [mm]	0.0773	0.0968	0.2622	0.0	0.318
Aluminio 3.5 [mm]	0.0711	0.0812	0.1608	0.0	0.391
Acero 4.2 [mm]	_3	_3	_3	_3	_3
Acero 2.95 [mm]	0.0902	0.1011	0.1255	0.0	0.236

5.3.4. Ley de daño ingenieril

De los parámetros de la ley de daño del **MDB** mostrados en las Tablas 5.7 y 5.8, se seleccionaron las leyes de daño ajustadas por los parámetros del material del **MDGTN**, dado estas capturan con mayor completitud la micromecánica del daño. Dado que los parámetros de las leyes superiores e

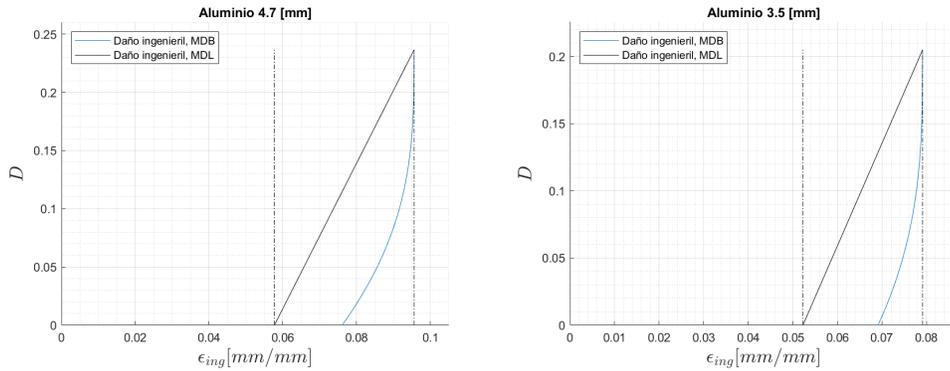
³ La simulación del **MEF** con los parámetros del **MDGTN** seleccionados no pudieron entregar la información requerida para realizar el análisis de evolución del daño utilizando el método del **RVE**.

inferiores del **MDB** mostradas en la tabla 5.8 poseen valores similares, se utilizó el promedio de estas. Con estas leyes de daño se obtuvieron los parámetros del **MDB** mostrados en la Tabla 5.9.

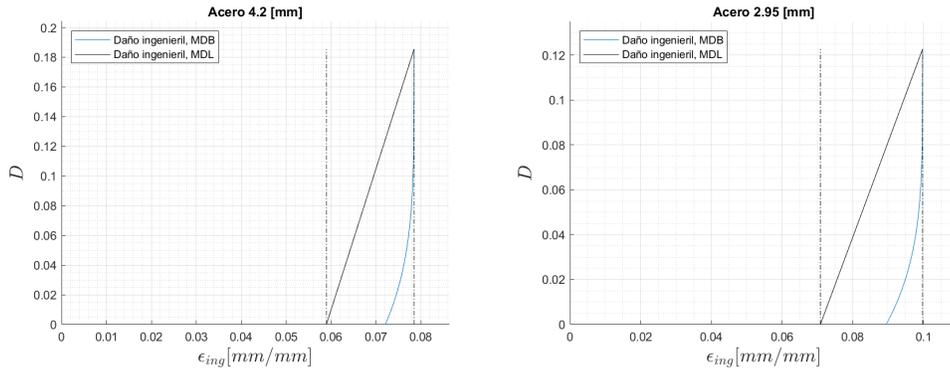
Tabla 5.9: Parámetros de ley de daño del **MDB** para cada uno de los alambres.

	ϵ_D [mm/mm]	ϵ_{cr} [mm/mm]	D_C	D_0	α
Aluminio 4.7 [mm]	0.0761	0.0956	0.2365	0.0	0.3280
Aluminio 3.5 [mm]	0.0691	0.0791	0.2050	0.0	0.3290
Acero 4.2 [mm]	0.0721	0.0785	0.1855	0.0	0.2305
Acero 2.95 [mm]	0.0895	0.0998	0.1227	0.0	0.2305

Los parámetros determinados en la Tabla 5.9 determinan las leyes de daño de los alambres, las cuales se muestran en las Figuras 5.12a, 5.12b, 5.12c y 5.12d, en conjunto con la ley de daño del **MDL**.



(a) Ley de daño ingenieril del **MDGTN** y (b) Ley de daño ingenieril del **MDGTN** y ajustada a la ley de daño del **MDB**, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



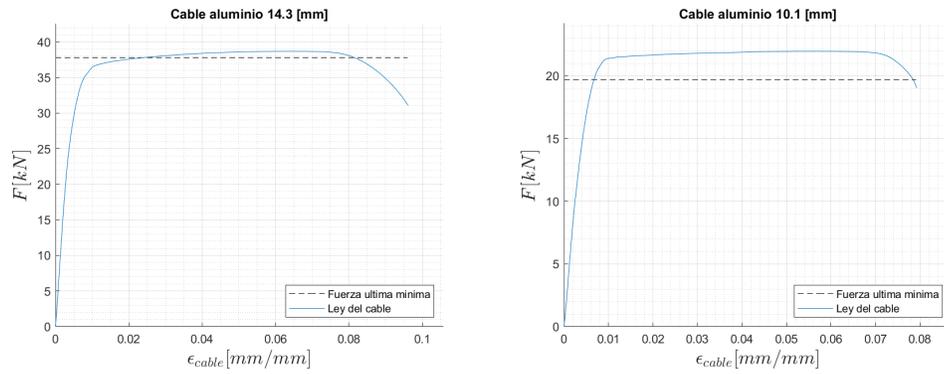
(c) Ley de daño ingenieril del **MDGTN** y (d) Ley de daño ingenieril del **MDGTN** y ajustada a la ley de daño del **MDB**, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

Figura 5.12: Ley de daño ingenieril del **MDGTN**, ajustada a la ley de daño del **MDB**.

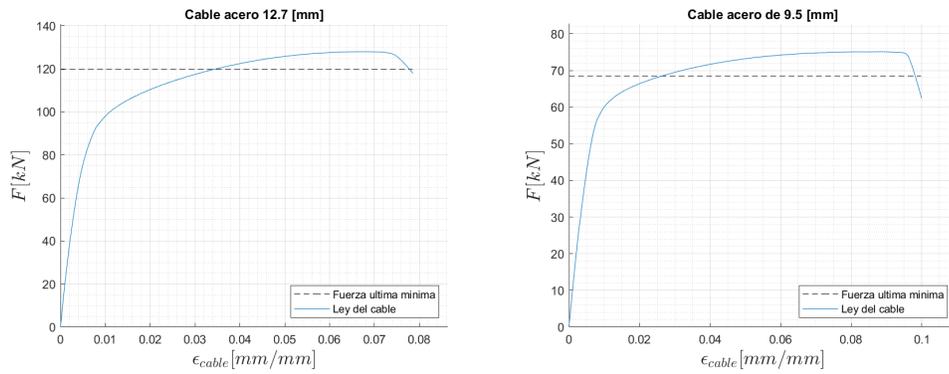
5.4. Ley ingenieril de los cables

Utilizando el procedimiento establecido en la Sección 4.5 y las leyes experimentales de los alambres, Figura 3.5, se obtienen las leyes de ingeniería de los cables inicialmente vírgenes, mostradas en la

Figura 5.13, las cuales se determinan de las leyes de ingeniera de los alambres, mostradas en el Anexo G. El modelo de cables utilizados, Beltrán et al. (2018)[7], fue probado con datos experimentales.



(a) Ley del cable de aluminio de 14.3 [mm] de diámetro inicialmente virgen. (b) Ley del cable de aluminio de 10.1 [mm] de diámetro inicialmente virgen.

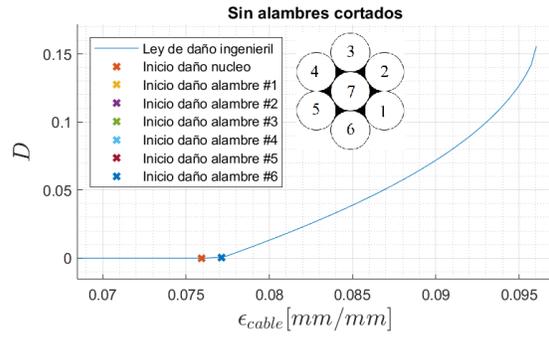


(c) Ley del cable de acero de 12.7 [mm] de diámetro inicialmente virgen. (d) Ley del cable de acero de 9.5 [mm] de diámetro inicialmente virgen.

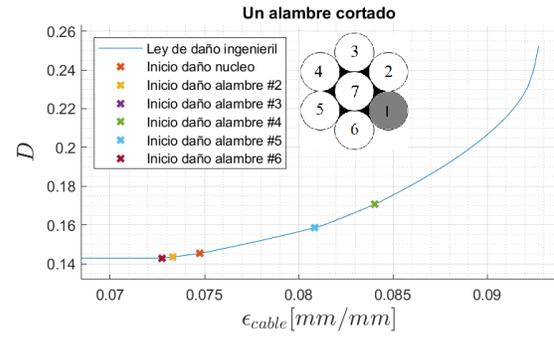
Figura 5.13: Leyes de los cables inicialmente vírgenes.

5.5. Ley de daño ingenieril de los cables

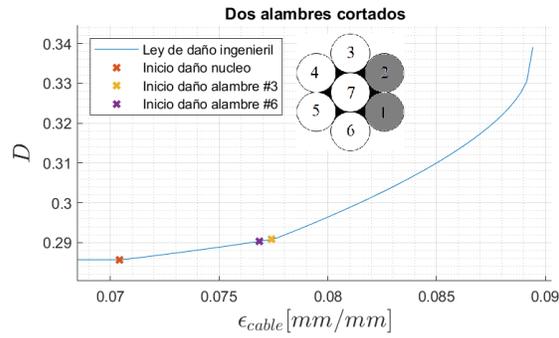
De las leyes de daño de los alambres, y la evolución del daño de los alambres en los cables, mostradas en el Anexo G, utilizando la definición de daño del **MDEL** se obtiene la ley de daño de los cables mostrada en las Figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17. Para cada cable se determinó la ley de daño desde el caso sin alambres cortados inicialmente a cinco, en el orden que se muestra en la Figura 4.6.



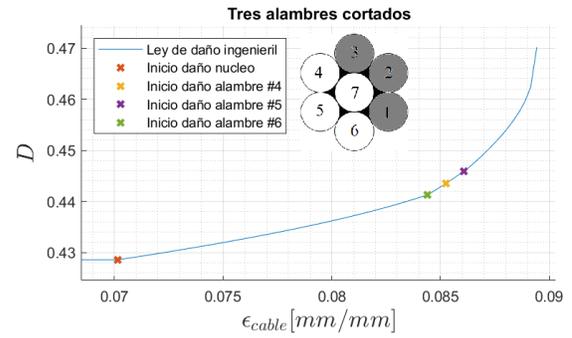
(a) Cable virgen.



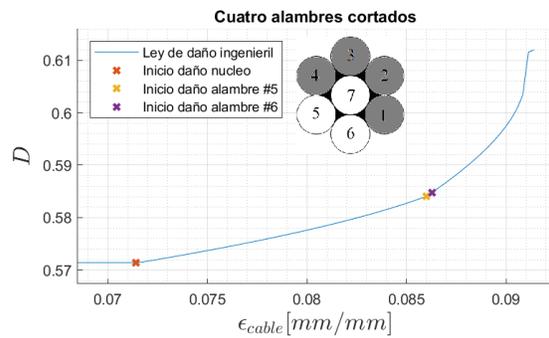
(b) Un alambre cortado.



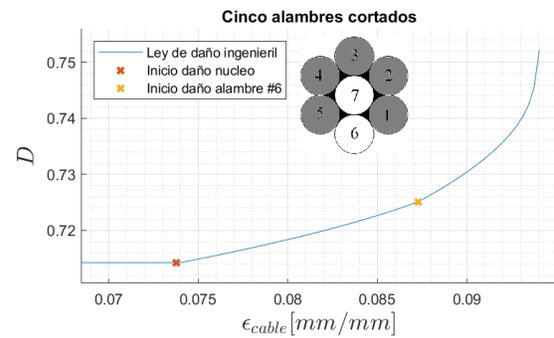
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.

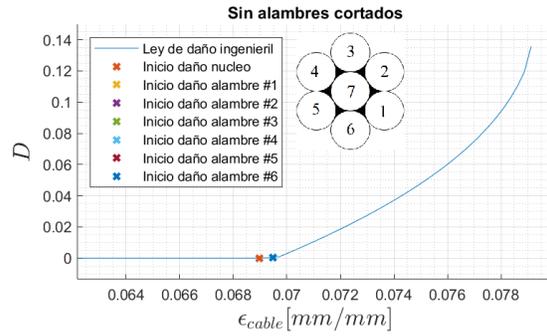


(e) Cuatro alambres cortados.

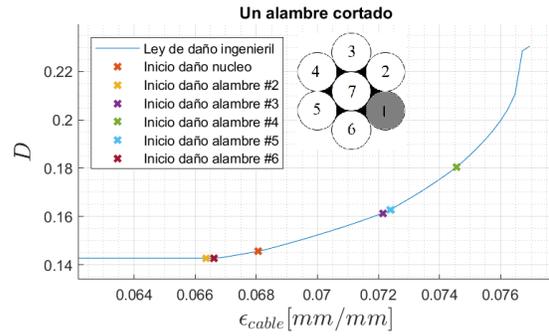


(f) Cinco alambres cortados.

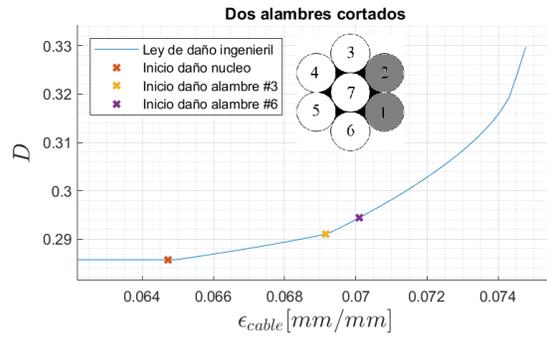
Figura 5.14: Ley ingenieril de daño del cable de aluminio de 14.3 [mm].



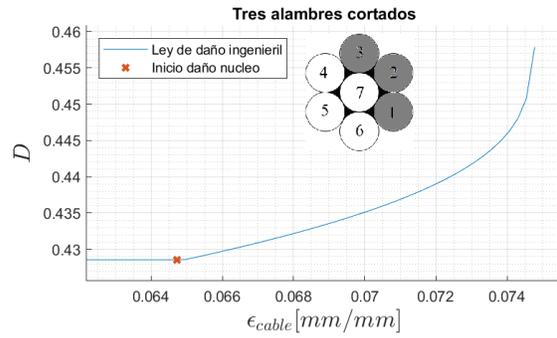
(a) Cable virgen.



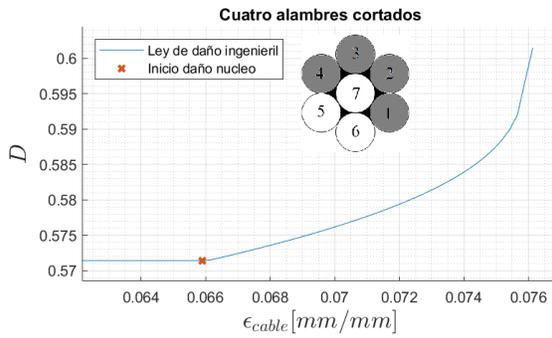
(b) Un alambre cortado.



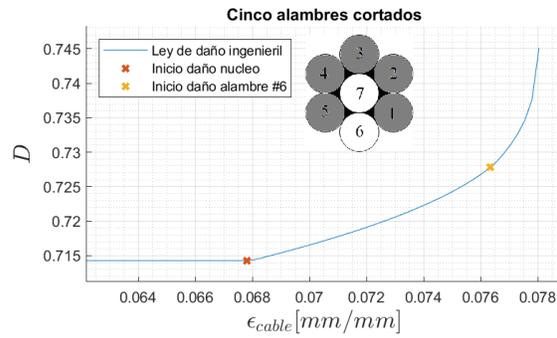
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.

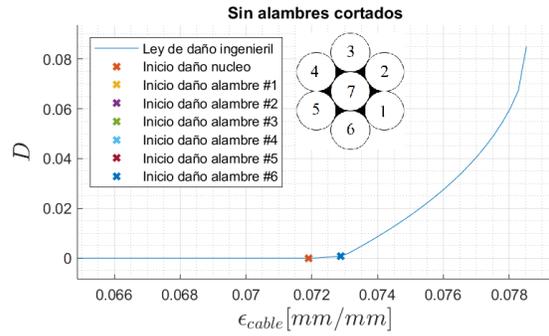


(e) Cuatro alambres cortados.

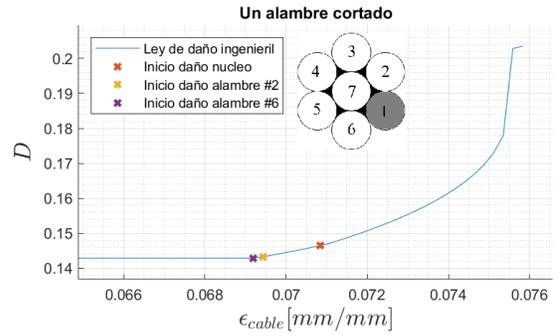


(f) Cinco alambres cortados.

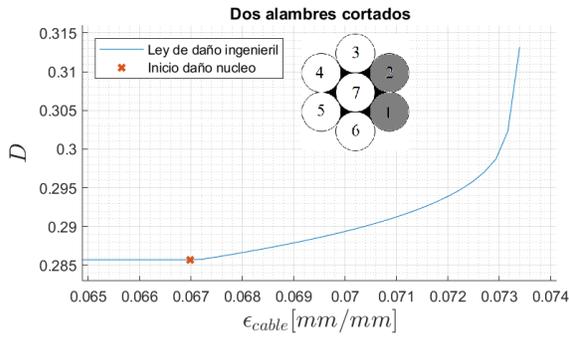
Figura 5.15: Ley ingenieril de daño del cable de aluminio de 10.1 [mm].



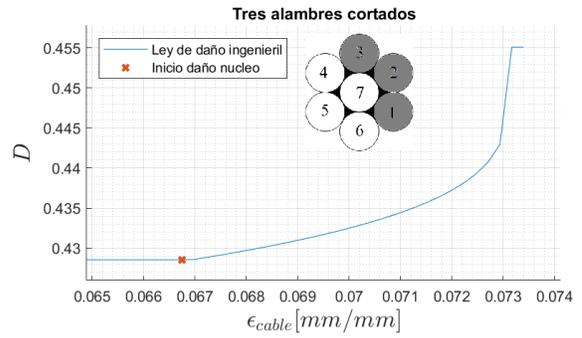
(a) Cable virgen.



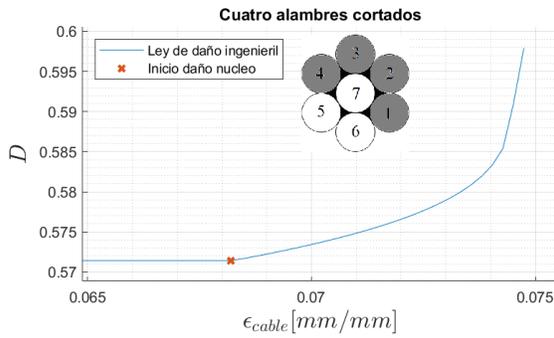
(b) Un alambre cortado.



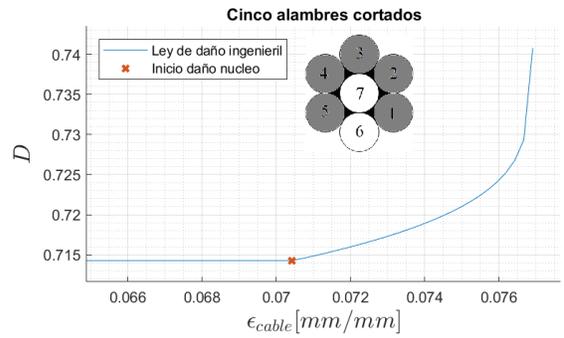
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.



(e) Cuatro alambres cortados.



(f) Cinco alambres cortados.

Figura 5.16: Ley ingenieril de daño del cable de acero de 12.7 [mm].

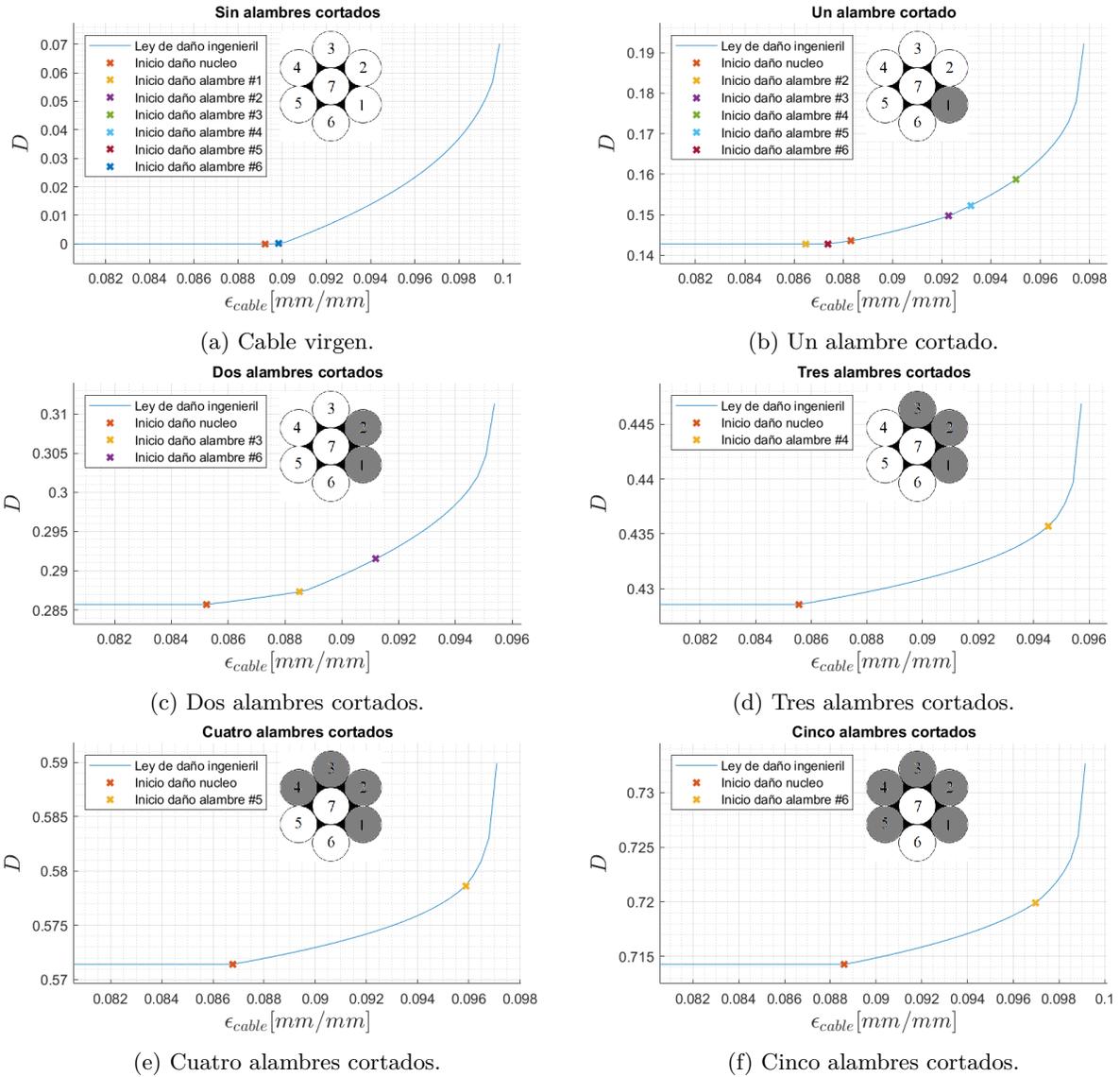


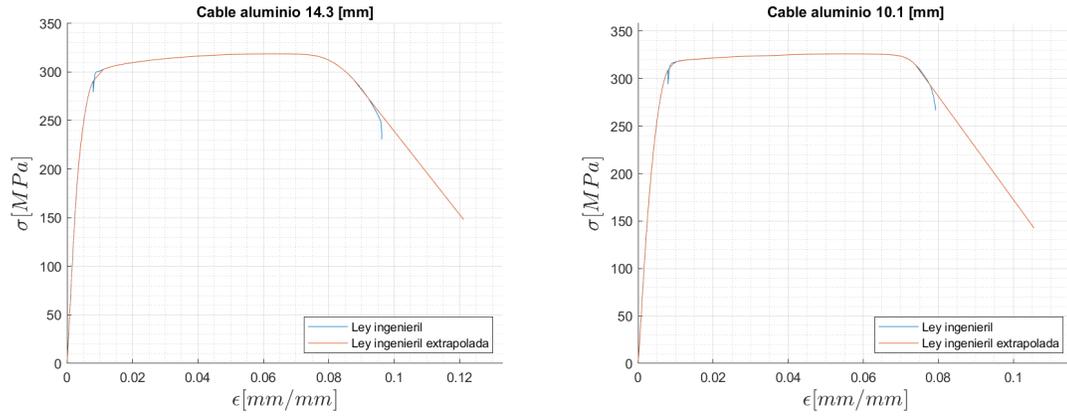
Figura 5.17: Ley ingenieril de daño del cable de acero de 9.5 [mm].

5.6. Ley de daño ingenieril extrapolada

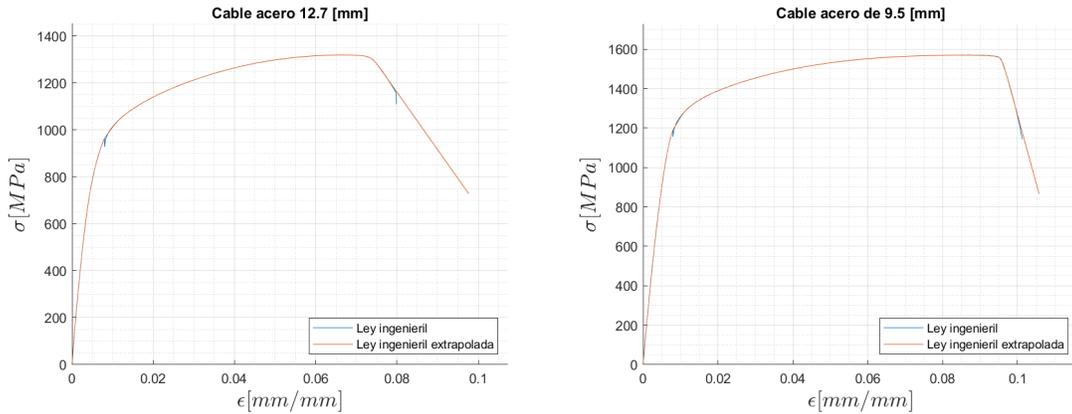
Utilizando el **MDEL**, mostrada en la Sección 2.2.7, se determinó una nueva la ley de daño con el **MDB** obtenido en la Sección 5.9, y se determinaron nuevas leyes de ingeniería y daño de los cables.

5.6.1. Ley de ingeniería extrapolada de los alambres

Utilizando el **MDEL** en las leyes de ingeniería experimentales, mostradas en la Figura 3.5, se obtienen las leyes ingenieriles mostradas en la Figura 5.18, cuyas propiedades mecánicas se encuentran resumidas en la Tabla 5.10.



(a) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro, con el MDEL. (b) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro, con el MDEL.



(c) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del cable alambre de 4.2 [mm] de diámetro, con el MDEL. (d) Ley esfuerzo-deformación ingenieril del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro, con el MDEL.

Figura 5.18: Ley de esfuerzo-deformación ingenieril experimental de los alambres, con el MDEL.

Tabla 5.10: Resumen módulo de elasticidad, punto de fluencia, último y fractura, y endurecimiento obtenido experimentalmente para cada alambre

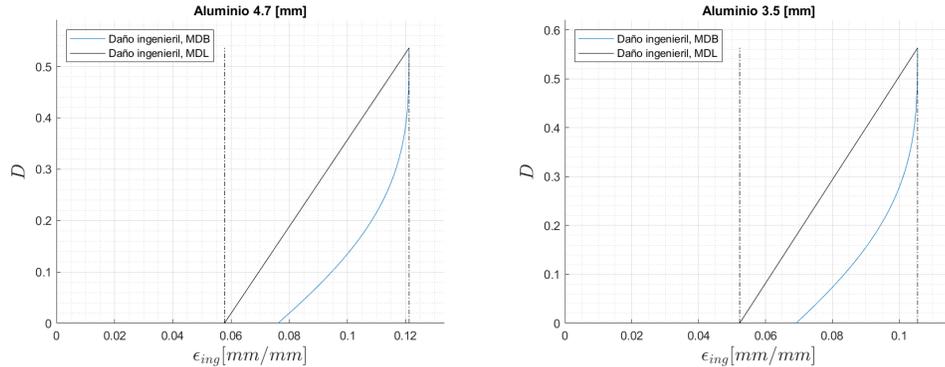
	E [GPa]	ϵ_y^{ing} [mm/mm]	σ_y^{ing} [MPa]	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	σ_u^{ing} [MPa]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	σ_f^{ing} [MPa]
Aluminio 4.7 [mm]	64.60	0.00640	282.79	0.0585	323.97	0.6376	0.1212	147.85
Aluminio 3.5 [mm]	62.81	0.00673	293.59	0.0567	330.99	0.6778	0.1055	142.53
Acero 4.2 [mm]	195.85	0.00660	898.87	0.0702	1316.40	0.5140	0.0976	728.11
Acero 2.95 [mm]	199.91	0.00787	1181.47	0.0810	1569.57	0.5140	0.1057	866.61

5.6.2. Ley de daño ingenieril extrapolada

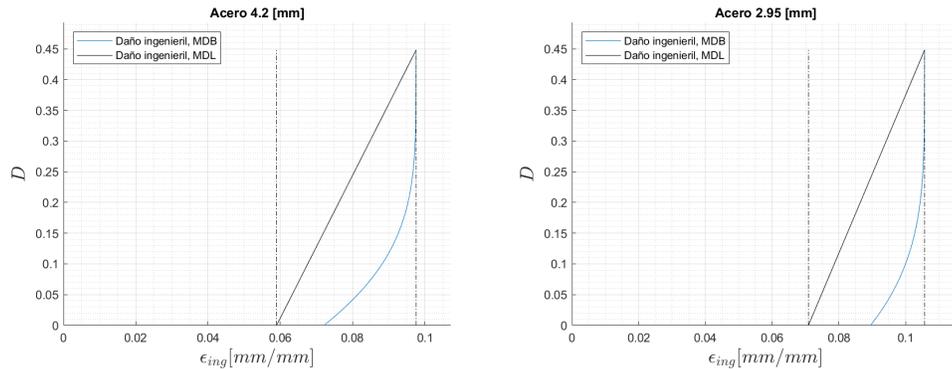
Considerando los parámetros del MDB mostrados en la Tabla 5.9, y utilizando las nuevas leyes de ingeniera de los alambres, mostradas en la Figura 5.18, se obtienen los parámetros de la ley de daño del MDB mostrados en la Tabla 5.11, los cuales determinan las leyes de la Figura 5.19.

Tabla 5.11: Parámetros de ley de daño del **MDB** para cada uno de los alambres, con el **MDEL**.

	ϵ_D [mm/mm]	ϵ_{cr} [mm/mm]	D_C	D_0	α
Aluminio 4.7 [mm]	0.0761	0.1212	0.5360	0.0	0.3280
Aluminio 3.5 [mm]	0.0691	0.1055	0.5630	0.0	0.3290
Acero 4.2 [mm]	0.0721	0.0976	0.4480	0.0	0.2305
Acero 2.95 [mm]	0.0895	0.1057	0.4480	0.0	0.2305



(a) Ley de daño ingenieril del **MDG**TN y (b) Ley de daño ingenieril del **MDG**TN y ajustada a la ley de daño del **MDB**, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro, con el **MDEL**.

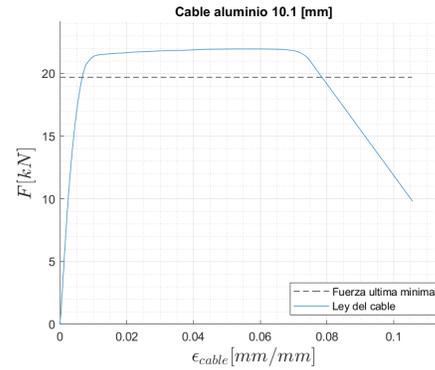
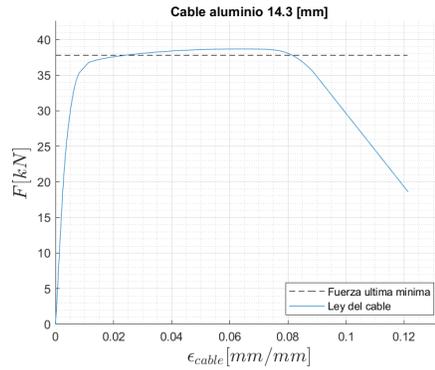


(c) Ley de daño ingenieril del **MDG**TN y (d) Ley de daño ingenieril del **MDG**TN y ajustada a la ley de daño del **MDB**, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro, con el **MDEL**.

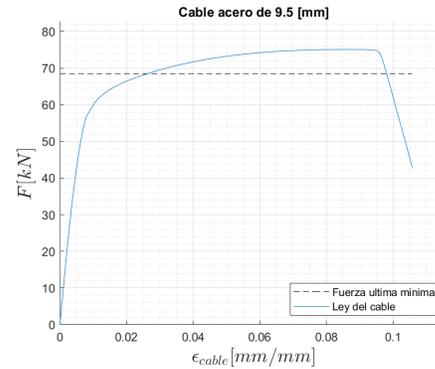
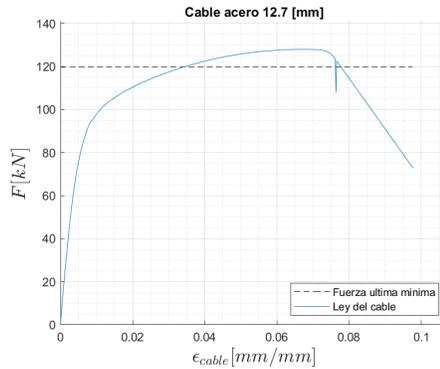
Figura 5.19: Ley de daño ingenieril del **MDG**TN, ajustada a la ley de daño del **MDB**, con el **MDEL**.

5.7. Ley ingenieril de los cables extrapolada

Utilizando el procedimiento establecido en la Sección 4.5 y las leyes experimentales de los alambres, Figura 5.18, se obtienen las leyes de ingeniería de los cables inicialmente vírgenes, mostradas en la Figura 5.20, las cuales se determinan de las leyes de ingeniera de los alambres, mostradas en el Anexo H.



(a) Ley del cable de aluminio de 14.3 [mm] de (b) Ley del cable de aluminio de 10.1 [mm] de diámetro inicialmente vírgen.

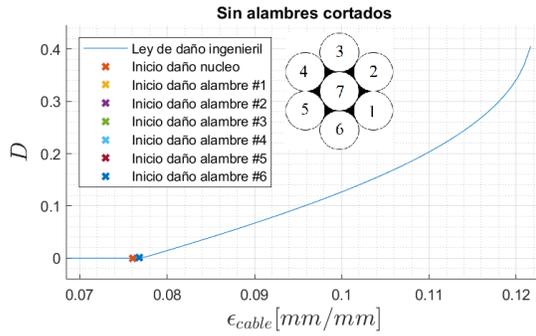


(c) Ley del cable de acero de 12.7 [mm] de (d) Ley del cable de acero de 9.5 [mm] de diámetro inicialmente vírgen.

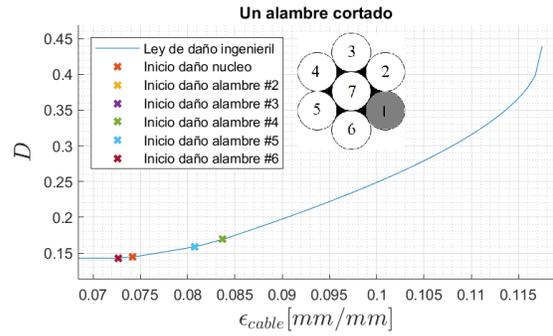
Figura 5.20: Leyes de los cables inicialmente vírgenes.

5.8. Ley de daño ingenieril de los cables extrapolada

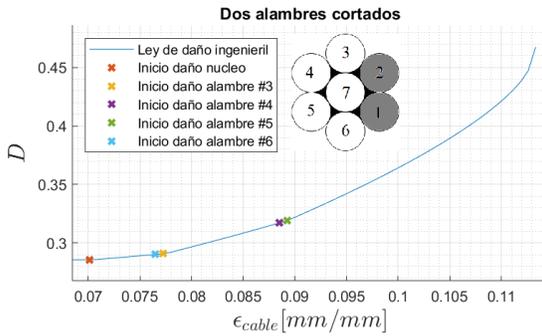
De las leyes de daño de los alambres, y la evolución del daño de los alambres en los cables, mostradas en el Anexo H, utilizando la definición de daño crítico de Lemaitre, Ecuación 2.61, se obtiene la ley de daño de los cables mostrada en las Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24. Para cada cable se determinó la ley de daño desde el caso sin alambres cortados inicialmente a cinco.



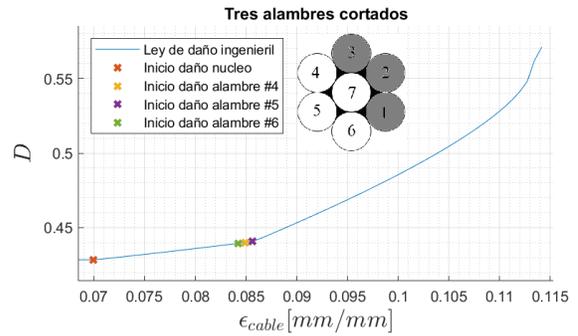
(a) Cable virgen.



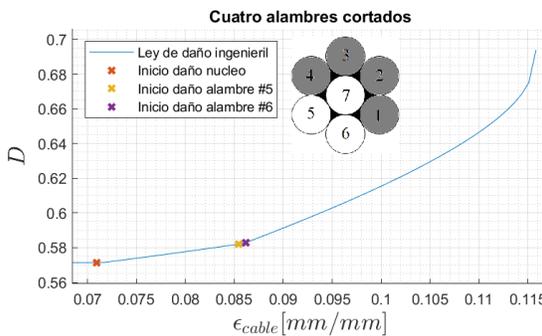
(b) Un alambre cortado.



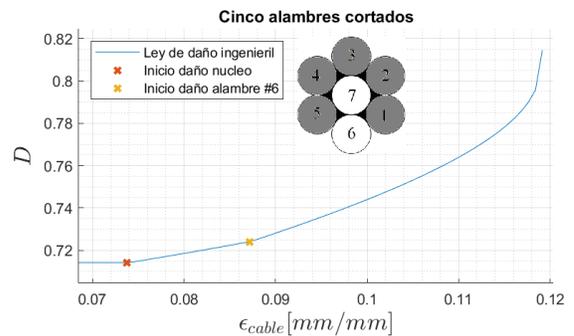
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.

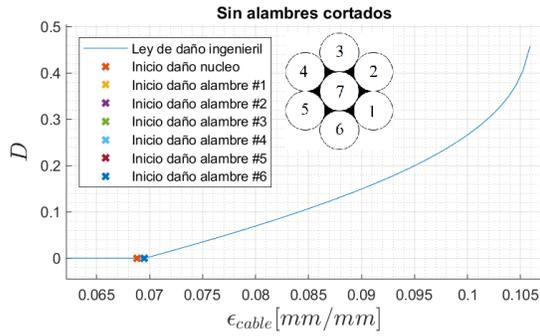


(e) Cuatro alambres cortados.

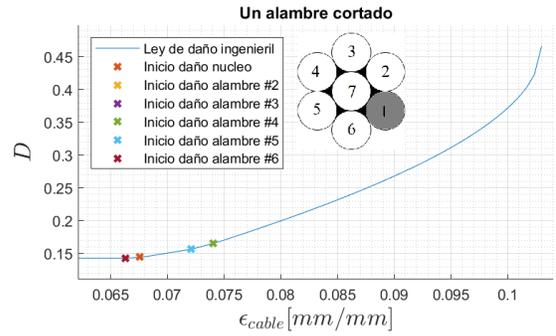


(f) Cinco alambres cortados.

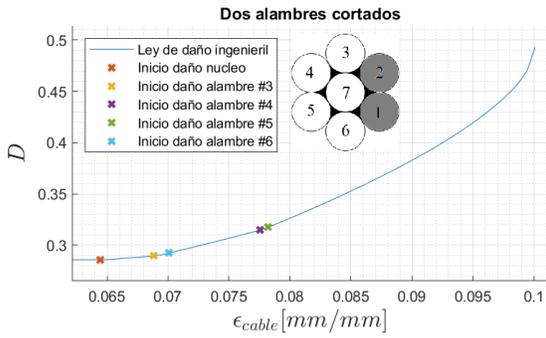
Figura 5.21: Ley ingenieril de daño del cable de aluminio de 14.3 [mm].



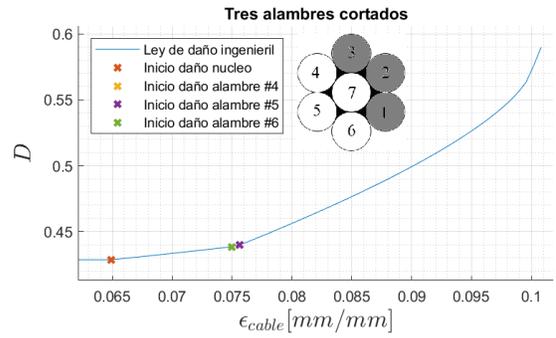
(a) Cable virgen.



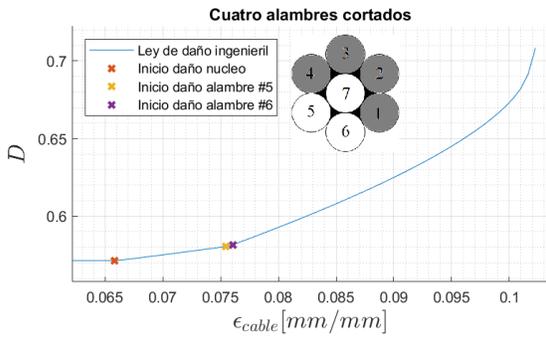
(b) Un alambre cortado.



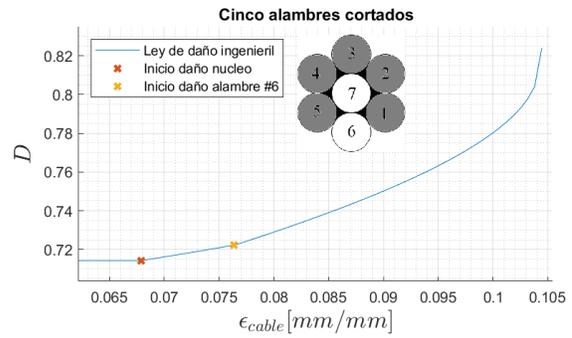
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.

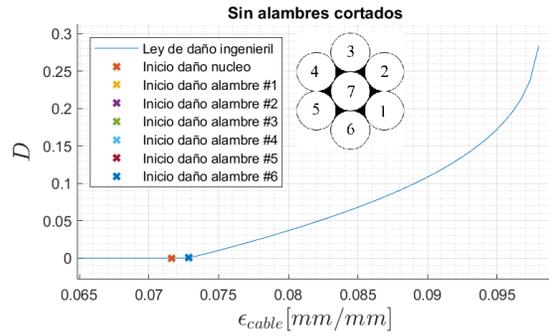


(e) Cuatro alambres cortados.

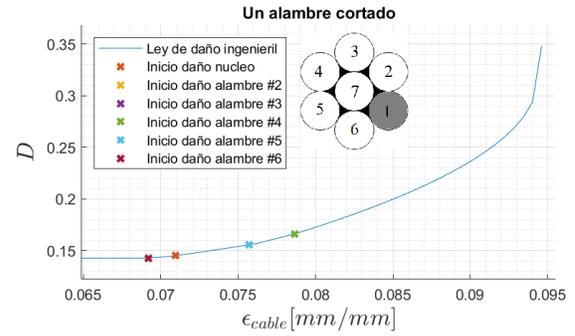


(f) Cinco alambres cortados.

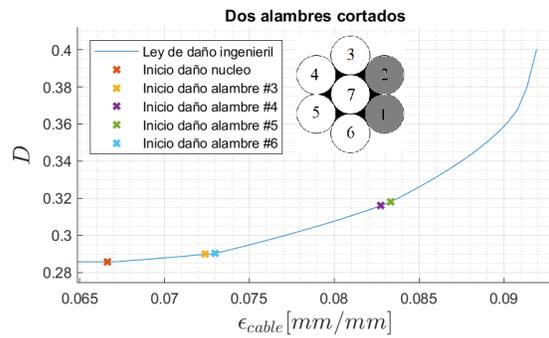
Figura 5.22: Ley ingenieril de daño del cable de aluminio de 10.1 [mm].



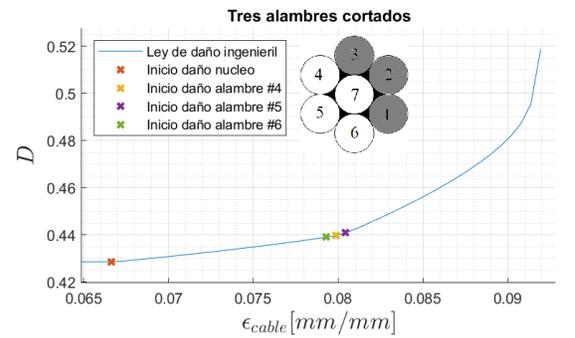
(a) Cable virgen.



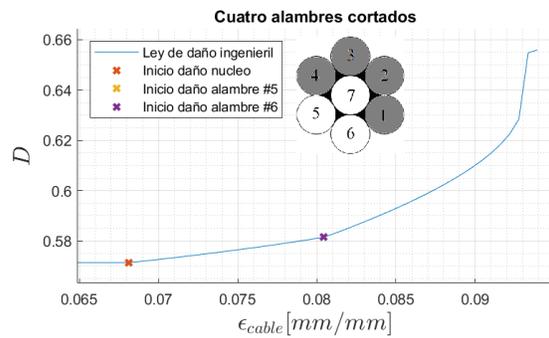
(b) Un alambre cortado.



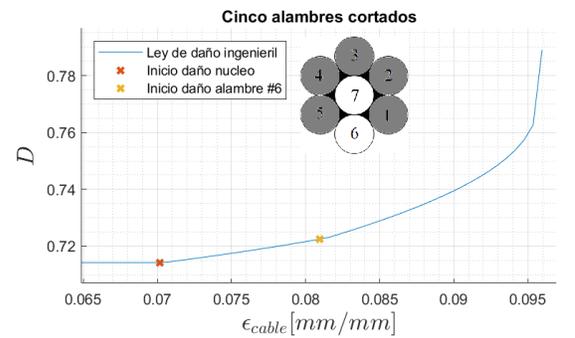
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.

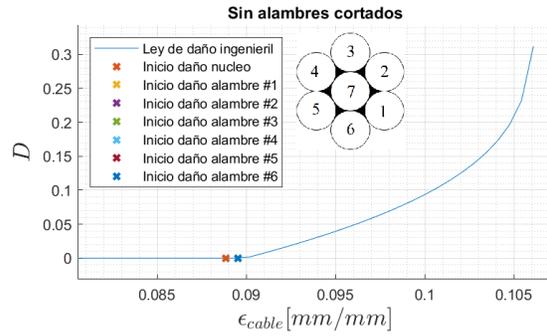


(e) Cuatro alambres cortados.

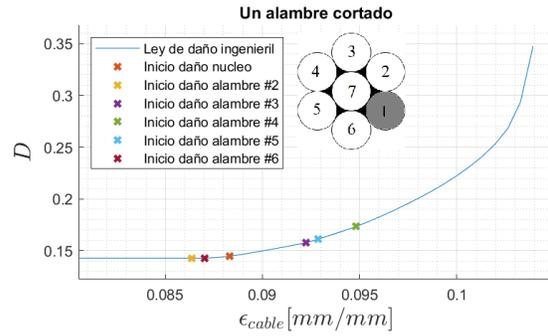


(f) Cinco alambres cortados.

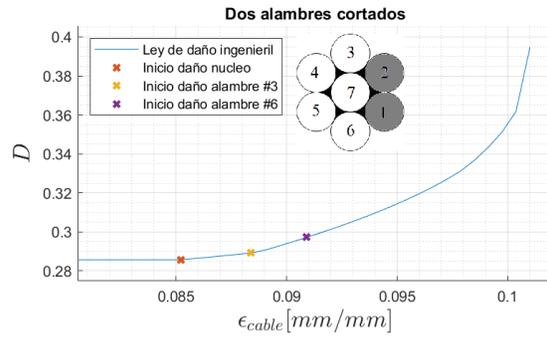
Figura 5.23: Ley ingenieril de daño del cable de acero de 12.7 [mm].



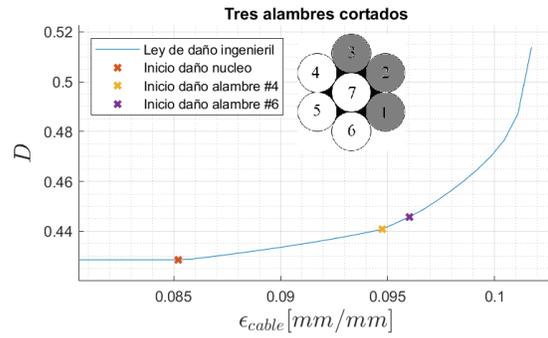
(a) Cable virgen.



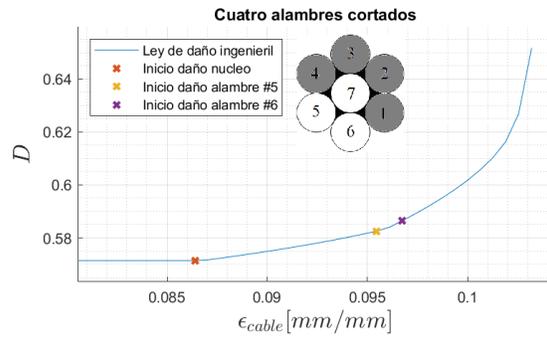
(b) Un alambre cortado.



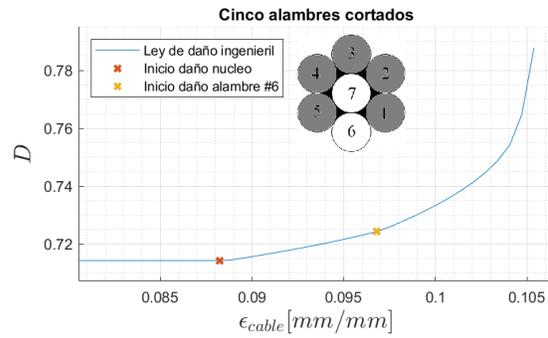
(c) Dos alambres cortados.



(d) Tres alambres cortados.



(e) Cuatro alambres cortados.



(f) Cinco alambres cortados.

Figura 5.24: Ley ingenieril de daño del cable de acero de 9.5 [mm].

Capítulo 6

Discusiones: modelos elastoplasticos, de daño y la evolución del daño en cables de metales dúctiles

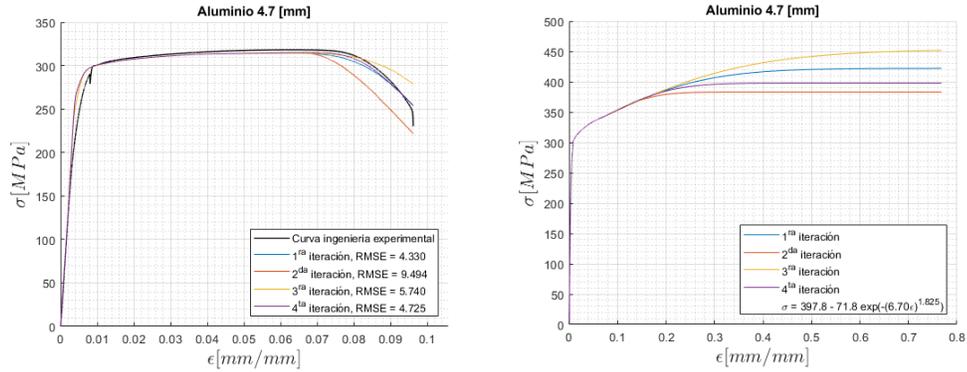
6.1. Modelo del MHS

6.1.1. Parámetros del MHS

Los parámetros obtenidos del proceso iterativo mostrado en la Figura 4.4, se muestran en la Tabla 5.1. En la Sección 2.3.1 se estableció los valores que toman estos parámetros para los metales dúctiles, de lo cual se puede establecer que para los alambres de aluminio de 4.7 y 3.5 [mm] y el alambre de acero de 2.95 [mm] los parámetros están en los rangos establecidos, en particular σ_s corresponde al esfuerzo de fractura real, σ_r es menor que σ_s , n este entorno a 1.5 y 2 y m esta entre 5 y 10. El caso del alambre de acero de 4.2 [mm] se tiene que los parámetros σ_r , m y n están fuera de rango, esto se puede deber a que el material no cumple con las condiciones de ductilidad requeridas por el **MHS**.

6.1.2. Ley real del MHS

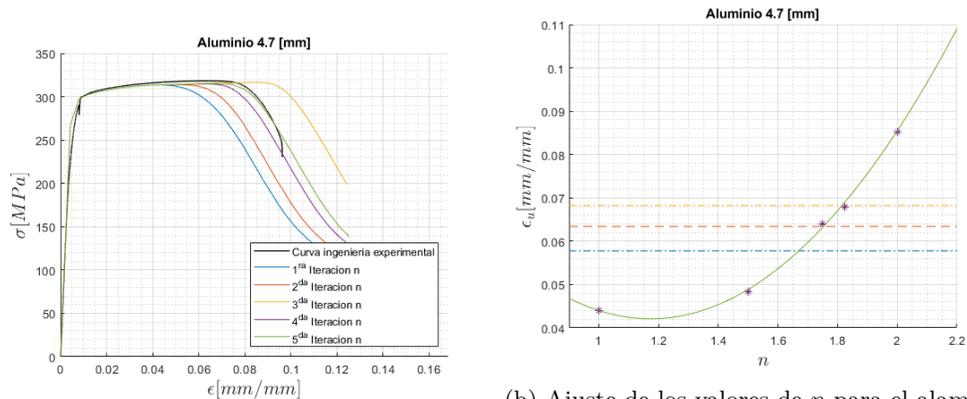
Para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro, en la Figura 6.1b se muestran las leyes reales que fueron ingresadas en el **MEF** en cada iteración de σ_f^B , y en la Figura 6.1a se muestra las leyes de ingeniería obtenidas del **MEF**. La primera iteración es la que tiene el menor **RMSE**, y en la cuarta iteración sobre σ_f^B se tiene que el **RMSE** es un 9.12% mayor que en la primera iteración, pero captura de forma más precisa la pendiente de reblandecimiento.



(a) Ley ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ley real obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.

Figura 6.1: Ley real e ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.

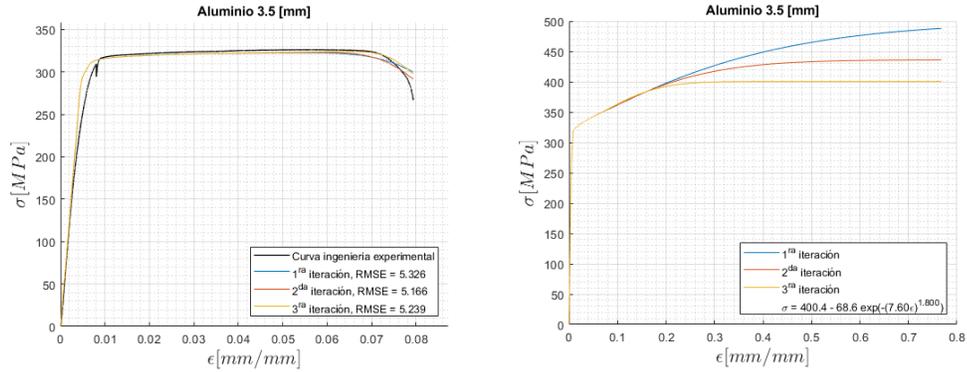
Los resultados obtenidos en cada iteración de σ_f^B para el aluminio de 4.7 [mm] de diámetro son considerados adecuados, dada la convergencia de n en cada uno de los ciclos, como se muestra en el Anexo C. En particular, en la cuarta iteración de σ_f^B , el parámetro n posee un valor que permite ajustar el ϵ_u de ingeniera del **MEF** al experimental, tal como se muestra en la Figura 6.2.



(a) Cuarta iteración de la ley real para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ajuste de los valores de n para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro, a la ϵ_u experimental.

Figura 6.2: Cuarta iteración en n de la ley real para los alambres de aluminio con 4.7 [mm] de diámetro.

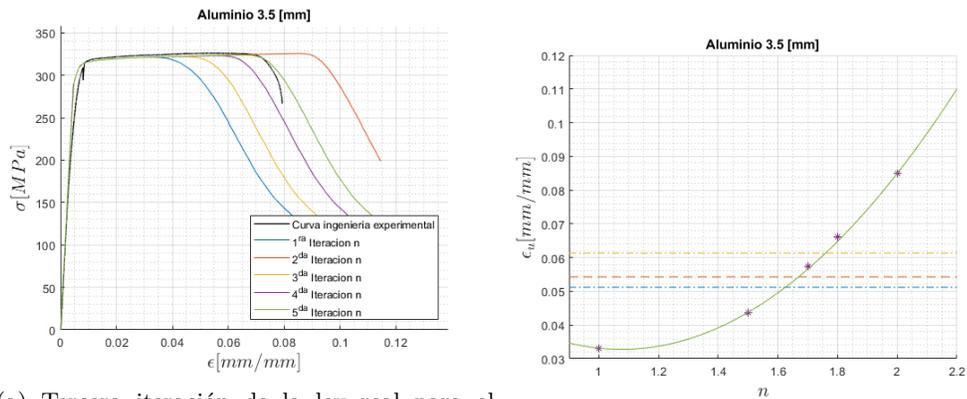
Para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro, en la Figura 6.3b se muestran las leyes reales que fueron ingresadas en el **MEF** en cada iteración de σ_f^B , y en la Figura 6.3a se muestra las leyes de ingeniería obtenidas del **MEF**. La variación del **RMSE** para cada una de las iteraciones es menor al 3%, por lo anterior, se consideró que en solo tres iteraciones se convergió a la solución óptima. A pesar de que la segunda iteración posee el menor **RMSE**, la tercera iteración es una mejor aproximación ya que permite captura de mejor manera la pendiente de reblandecimiento y el ϵ_u .



(a) Ley ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro. (b) Ley real obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

Figura 6.3: Ley real e ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

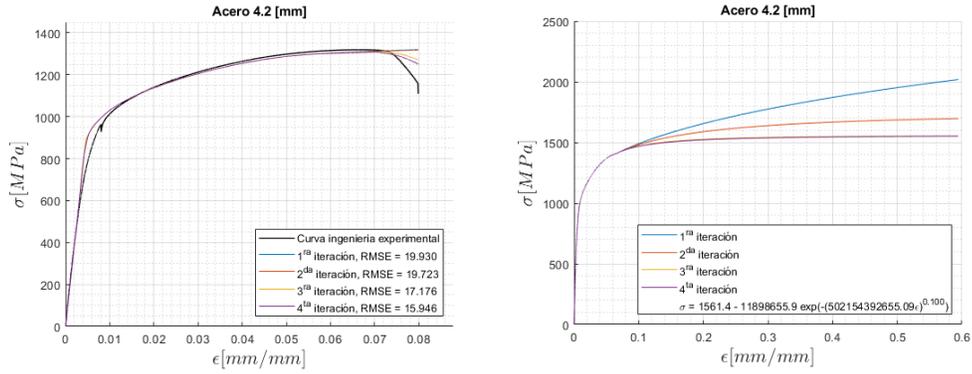
Los resultados obtenidos en cada iteración de σ_f^B para el aluminio de 3.5 [mm] de diámetro son considerados adecuados, dada la convergencia de n en cada uno de los ciclos, como se muestra en el Anexo C. En particular, en la tercera iteración de σ_f^B , el parámetro n posee un valor que permite ajustar el ϵ_u^{ing} de ingeniera del MEF al experimental, tal como se muestra en la Figura 6.4.



(a) Tercera iteración de la ley real para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro. (b) Ajuste de los valores de n para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

Figura 6.4: Tercera iteración en n de la ley real para los alambres de aluminio con 3.5 [mm] de diámetro.

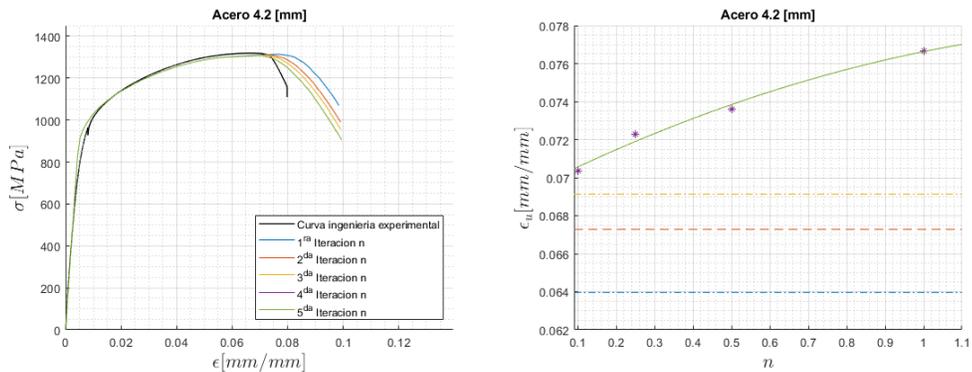
Para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro, en la Figura 6.5b se muestran las leyes reales que fueron ingresadas en el MEF en cada iteración de σ_f^B , y en la Figura 6.5a se muestra las leyes de ingeniería obtenidas del MEF. El RMSE disminuyó en cada una de las iteraciones, llegando al mínimo en la cuarta iteración. La cuarta iteración posee el mínimo RMSE y posee la mayor pendiente de reblandecimiento de las iteraciones, pero no logra capturar la pendiente de reblandecimiento de la ley experimental. Pese a que la cuarta iteración no captura la pendiente de reblandecimiento, el proceso iterativo no se puede continuar, ya que como se muestra en la Figura 6.5b, las leyes reales convergieron al σ_f^B mínimo admisible.



(a) Ley ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (b) Ley real obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

Figura 6.5: Ley real e ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

Los resultados obtenidos en cada iteración de σ_f^B para el acero de 4.2 [mm] de diámetro no son óptimos por la no convergencia de n en cada uno de los ciclos, como se muestra en el Anexo C. En particular, en la cuarta iteración de σ_f^B , el parámetro n no posee un valor válido¹ que permita ajustar el ϵ_u^{ing} de ingeniería del MEF al experimental, tal como se muestra en la Figura 6.6.

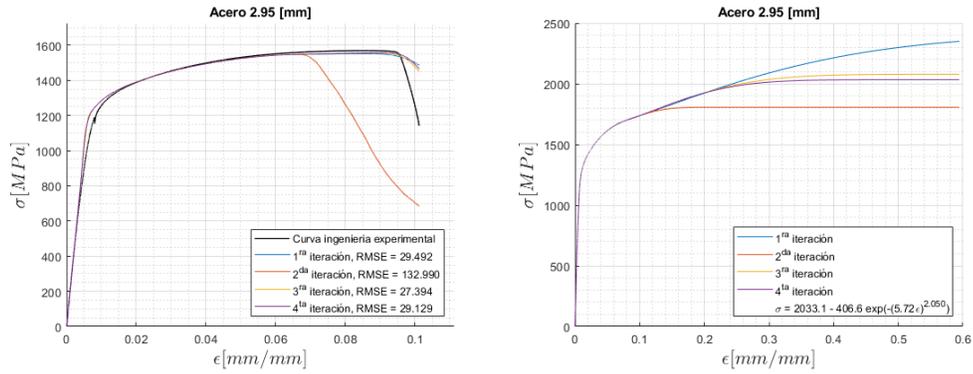


(a) Cuarta iteración de la ley real para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (b) Ajuste de los valores de n para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.

Figura 6.6: Cuarta iteración en n de la ley real para los alambres de acero con 4.2 [mm] de diámetro.

Para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro, en la Figura 6.7b se muestran las leyes reales que fueron ingresadas en el MEF en cada iteración de σ_f^B , y en la Figura 6.7a se muestra las leyes de ingeniería obtenidas del MEF. El RMSE de la primera a la segunda iteración incrementa en un factor de 4 aproximadamente, pero, como se aprecia en la Figura 6.7b, las leyes reales convergen a un valor medio entre la primera y la segunda iteración. EL RMSE de la tercera y cuarta iteración se mantiene en el mismo orden que la primera, pero la cuarta iteración posee la mayor pendiente de reblandecimiento.

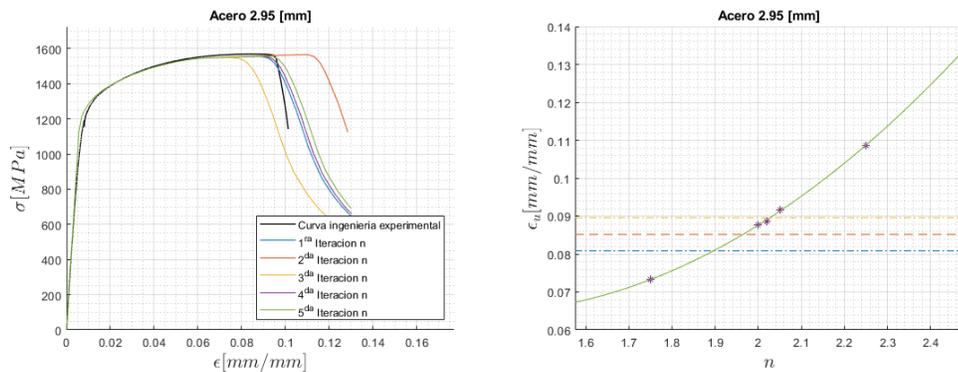
¹ El parámetro n puede tomar valores entre 0 y 3, pero, en el caso de los aceros el rango es entre 1.5 y 2[1].



(a) Ley ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro. (b) Ley ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura 6.7: Ley real e ingenieril obtenida en las iteraciones de σ_f^B para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Los resultados obtenidos en cada iteración de σ_f^B para el acero de 4.2 [mm] de diámetro son considerados adecuados, dada la convergencia de n en cada uno de los ciclos, como se muestra en el Anexo C. En particular, en la tercera iteración de σ_f^B , el parámetro n posee un valor que permite ajustar el ϵ_u^{ing} de ingeniera del **MEF** al experimental, tal como se muestra en la Figura 6.6.



(a) Cuarta iteración de la ley real para el alambre de acero de 2.95 [mm]. (b) Ajuste de los valores de n para el alambre de acero de 2.95 [mm].

Figura 6.8: Cuarta iteración de la ley real para los alambres de acero con 2.95 [mm] de diámetro.

6.1.3. Ley ingenieril del MHS

De las leyes de esfuerzo-deformación ingenieriles obtenidas del **MEF** utilizando los parámetros del **MHS**, mostradas en la Figura 5.2, se determina la precisión del ajuste utilizando la métrica del **RMSE**, Ecuación 4.1, comparándolas con las leyes experimentales de cada alambre. En la Tabla 6.1 se muestra el **RMSE** obtenido para cada alambre, de donde se obtiene que para los alambres de aluminio el error está en torno a 5, pero para los alambres de acero el error es mayor a 15.

Tabla 6.1: RMSE obtenido para cada una de las leyes de ingeniería obtenidas del **MHS** y la ductilidad de las leyes ingenieriles experimentales.

	RMSE	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	$\Delta\epsilon^{ing}$ [mm/mm]
Aluminio 4.7 [mm]	4.752	0.0634	0.0962	0.0328
Aluminio 3.5 [mm]	5.239	0.0542	0.0792	0.0250
Acero 4.2 [mm]	15.946	0.0673	0.0789	0.0116
Acero 2.95 [mm]	29.129	0.0851	0.1012	0.0161

Que para los alambres de aluminio se obtengan resultados más precisos se puede deber a que la ductilidad de estos sea mayor que la de los alambres de acero, esto ya que el **MHS** permite determinar la ley real de metales dúctiles, pero de acuerdo a lo determinado experimentalmente, la ductilidad medida como ϵ_f^{ing} no presenta dicha diferencia. Lo que sí se pudo notar es que la pendiente de reblandecimiento de los alambres de acero es mucho mayor que la de los alambres de aluminio, lo cual se debe a que la elongación entre el esfuerzo último y la fractura es menor, como lo muestra el parámetro $\Delta\epsilon^{ing}$.

Entonces, los mejores resultados del **MHS** son obtenidos cuando la ley ingenieril de los materiales acumula una mayor deformación después del esfuerzo último. Desde este punto de vista, se obtuvieron tres resultados distintos, para los alambres de aluminio, la ductilidad obtenida es suficiente para determinar los coeficientes del **MHS**, donde el **RMSE** obtenido es minimizado. Para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro, la ductilidad es suficiente para poder ajustar el modelo, pero, para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro la ductilidad obtenida es menor a la requerida y la pendiente de reblandecimiento es muy alta, por lo que los parámetros del **MHS** no pudieron ser ajustados.

6.2. Modelo de daño del MDGTTN

Los parámetros del **MDGTTN** fueron ajustados para dos leyes reales sin daño de los alambres, una superior y otra inferior, esto ya que no se conocía el estado de daño final de los alambres, por lo que las leyes superiores e inferiores se seleccionaron como cotas de daño. Para cada ley real sin daño se ajustaron los parámetros del **MDGTTN** de dos formas distintas, la primera ajustando los parámetros constitutivos y la segunda ajustando los parámetros del material. Las leyes de ingeniería resultantes de dichos ajustes se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5 para el ajuste de los parámetros constitutivos con la ley real superior e inferior respectivamente, y en las Figuras 5.6 y 5.7 para el ajuste de los parámetros del material con la ley real superior e inferior respectivamente.

El ajuste se realizó a todos los alambres, incluyendo el de acero de 4.2 [mm] de diámetro, a pesar de que los parámetros del **MHS** no se ajustaran a los valores estándar, esto porque la ley de ingeniería obtenida del **MEF**, Figura 5.2c, si se ajusta parcialmente a la ley ingenieril experimental.

En la Tabla 6.2 se muestra el error las leyes ingenieriles con el daño del **MDGTTN**. Se puede destacar que el error de las leyes obtenidas ajustando los parámetros constitutivos es menor que ajustando los parámetros del material. En promedio, el error para los aluminios es menor que el error de los alambres de acero, esto en línea con lo obtenido en el ajuste del **MHS**, lo anterior porque

el **MDGTN** es para materiales dúctiles y los alambres de acero presentan una menor ductilidad, medida como $\Delta\epsilon^{ing}$.

Tabla 6.2: Error de las leyes de ingeniería obtenidas del **MEF**, con el **MDGTN**.

	Parámetros constitutivos		Parámetros del material	
	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Aluminio 4.7 [mm]	3.0251	1.7882	8.5066	2.8466
Aluminio 3.5 [mm]	1.9437	1.8108	2.1229	2.1934
Acero 4.2 [mm]	4.3689	4.6989	6.1693	7.3177
Acero 2.95 [mm]	12.6032	12.6355	15.2054	13.4281

En el caso particular del alambre de aluminio 4.7 [mm], el **RMSE** del ajuste con los parámetros del material con la ley sin daño superior es mayor que para la ley sin daño inferior, lo cual se puede deber a que los parámetros encontrados corresponden a un mínimo de error local, ya que no existe un único set de parámetros que entreguen un mínimo local y, para encontrar otro se requiere iniciar las iteraciones con un nuevo set de parámetros.

En general los parámetros del **MDGTN** ajustados con los parámetros constitutivos y de material, en conjunto con las leyes sin daño, permiten modelar en el **MEF** la ley de ingeniería experimental de los alambres. Los parámetros obtenidos corresponden a mínimos locales², por lo que para verificar si son globales es necesario repetir el procedimiento iterativo con nuevos sets de parámetros iniciales.

6.3. Ley de daño ingenieril de los alambres

Para cada uno de los conjuntos de parámetros del **MDGTN**, utilizando el **MEF** se determinaron las leyes de daño, utilizando el **MDGTN**, el **RVE** y la ley de Lemaitre. Estas se muestran en las Figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11.

En primer lugar, el daño medido con el **MDGTN** es un modelo de daño acoplado a los alambres, donde los tres mecanismos de daño dúctil, crecimiento, nucleación y coalescencia, son incorporados al modelo por separado. En las Figuras 6.9 y 6.10 se muestra cómo evoluciona la porosidad producto de los tres mecanismos ya mencionados. Cabe destacar que en el inicio de la deformación se inicia la acumulación de porosidad debido al crecimiento de los microporos que se encuentran inicialmente en el material, luego, pasado la deformación última se inicia la acumulación de porosidad por la nucleación, en el caso del ajuste de los parámetros de constitutivos del **MDGTN** no se presenta un incremento de porosidad debido a la coalescencia.

² De acuerdo a que corresponden a un mínimo de error local entre la ley ingenieril obtenida del **MEF** con los parámetros del **MDGTN**, con respecto a la ley ingenieril experimental.

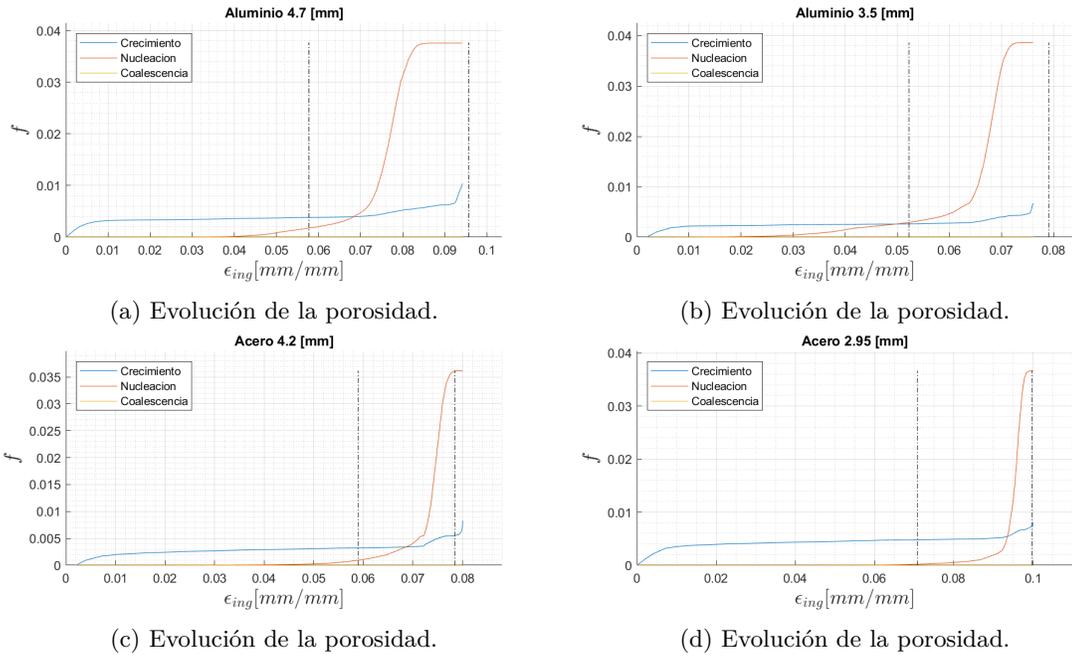


Figura 6.9: Evolución de los tres mecanismos de porosidad, para el MDGTN, con el ajuste de los parámetros constitutivos y la ley sin daño superior.

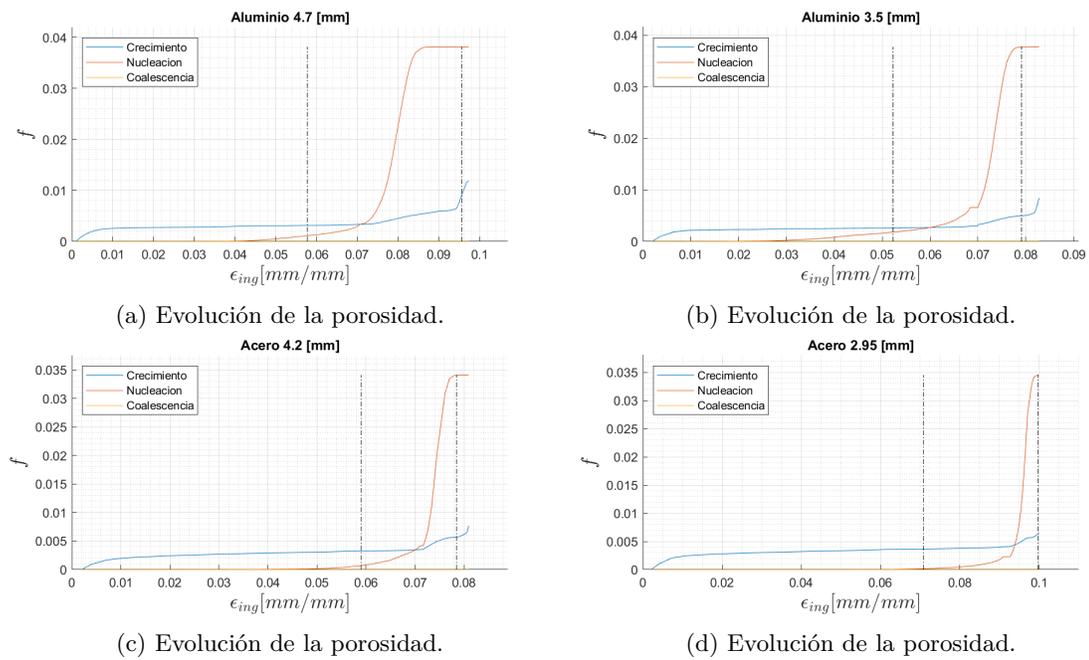


Figura 6.10: Evolución de los tres mecanismos de porosidad, para el MDGTN, con el ajuste de los parámetros constitutivos y la ley sin daño inferior.

En el caso del ajuste de los parámetros del material del MDGTN, están presentes los tres mecanismos de acumulación de porosidad, tal como se muestra en las Figuras 6.11 y 6.12. En particular, se logra capturar el incremento acelerado de la porosidad al alcanzarse el esfuerzo de fractura, lo cual finaliza con la propagación de la grieta en la mesoescala.

En el caso particular del ajuste de los parámetros del material del **MDGTN** para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro, Figuras 6.11c y 6.12c, la acumulación de porosidad debido a la coalescencia es mucho mayor que la del resto e inicia en simultaneo con la nucleación, esto ya que $\Delta\epsilon^{ing}$ es la menor entre alambres, por lo que la porosidad se debe acumular más rápidamente. Por esta misma razón es que no se pudo determinar la evolución del daño mediante el **RVE**, Figuras 5.10c y 5.10c, ya que este incremento de porosidad acelerado (producto de la coalescencia) genera una discontinuidad en el incremento del volumen la cual no está asociada a la fractura del alambre.

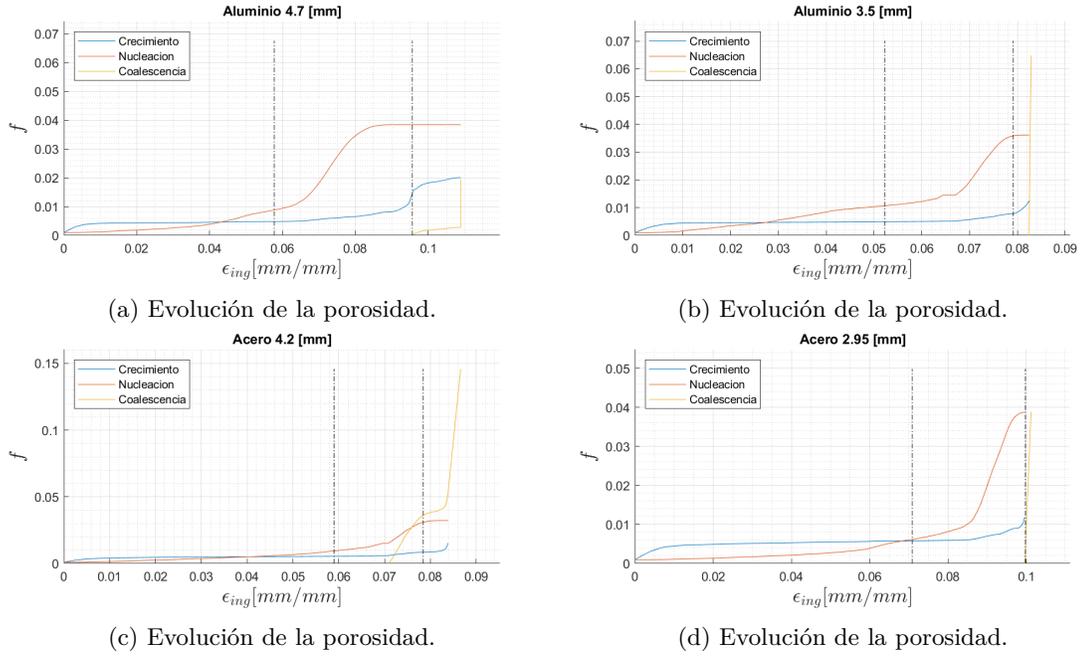


Figura 6.11: Evolución de los tres mecanismos de porosidad, para el **MDGTN**, con el ajuste de los parámetros del material y la ley sin daño superior.

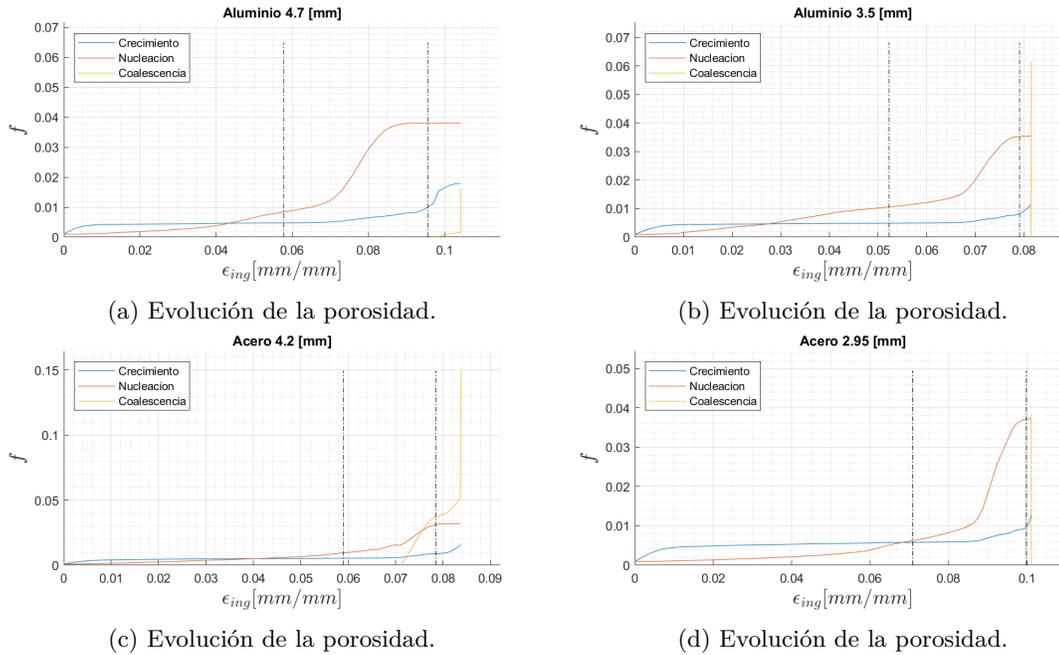


Figura 6.12: Evolución de los tres mecanismos de porosidad, para el MDGTN, con el ajuste de los parámetros del material y la ley sin daño inferior.

En las Figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 se muestra la evolución del daño medida mediante el **RVE**. La medición del daño mediante el **RVE** es un método acoplado, donde se determina la evolución de la porosidad en el material, sin considerar los mecanismos por los cuales esta evoluciona. Al igual que la evolución del daño determinada por el **MDGTN**, la evolución de la porosidad determinada por el **RVE** posee un comportamiento exponencial, el cual inicia la acumulación de daño posterior al esfuerzo último e incrementa hasta la fractura. A diferencia de lo obtenido del **MDGTN**, la acumulación de daño previo al esfuerzo último es incipiente, y solo acumula daño iniciada la formación de la estricción. Lo anterior debido a que el **MDGTN** posee un parámetro de porosidad inicial f_0 el cual no es medido mediante el método del **RVE**.

De los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del **MDGTN** y **RVE**, Anexo E.1, se obtuvo que el **MDGTN** es más sensible al tamaño de los elementos para el **MEF**, por lo cual una malla más fina permite al **MDGTN** capturar más daño. En cambio, el daño medido por el **RVE** no presenta dicha dependencia, por lo que una malla fina basta para capturar la evolución del daño, adicionalmente, al disminuir el tamaño de los elementos, el daño capturado por el **MDGTN** converge al daño que captura el **RVE**.

De acuerdo con Lemaitre y Desmorat (2005)[18], el daño se empieza a acumular de forma no incipiente después del esfuerzo último, lo cual coincide con la evolución del daño determinada por el **RVE**. A diferencia de la evolución del modelo de daño de Lemaitre, la cual es lineal, los mecanismos de evolución de la porosidad generan una evolución del daño exponencial, que se ajusta más a la evolución del daño propuesta por el **MDB**.

6.3.1. Ley de daño MDB

Dado que el **MDB** permite capturar de mejor manera el comportamiento exponencial de las leyes obtenidas utilizando el **MDGTN** y **RVE**, estas fueron ajustadas a este modelo. Se utilizaron únicamente las leyes de daño obtenidas mediante el **RVE**³ ya que estas se no presentaron sensibilidad a la malla, los ajustes realizados se encuentran en el Anexo F. En las Tablas 5.7 y 5.8 se muestran los parámetros del **MDB** obtenidos del ajuste de los parámetros constitutivos y del material respectivamente. Como se muestra en la Tabla 6.3 el error asociado al ajuste de las leyes de daño del **RVE** con el **MDB** es pequeño y constate para los alambres.

Tabla 6.3: Error del ajuste de leyes de daño del **MDB**, con respecto a las del **MDGTN** obtenida del **RVE** en el **MEF**.

	Parámetros constitutivos		Parámetros del material	
	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Aluminio 4.7 [mm]	0.2659	0.2677	0.2637	0.2713
Aluminio 3.5 [mm]	0.2316	0.2443	0.2420	0.2470
Acero 4.2 [mm]	0.2449	0.2566	-	-
Acero 2.95 [mm]	0.2706	0.2706	0.2794	0.2855

El parámetro α para el ajuste de los parámetros constitutivos del **MDGTN** entregan que la evolución del daño es entre tipo 2 y 3, como se muestra en la Figura 2.21, tanto para los aluminios como los aceros. Esto se traduce en que la evolución de la porosidad ocurre de forma continua, con poca porosidad debido a la coalescencia, pero de acuerdo a lo obtenido del **MDGTN**, Figuras 6.9 y 6.10, la acumulación de porosidad ocurre de forma acelerada sin presencia de coalescencia. Lo cual muestra que el ajuste de los parámetros constitutivos del **MDGTN** no permiten determinar de forma correcta la evolución del daño en los alambres dúctiles.

El parámetro α determinado para las leyes de daño determinadas del ajuste de los parámetros del material del **MDGTN** entregan que la evolución del daño de los alambres de aluminio y de acero es entre tipo 1 y 2, lo cual sugiere que la evolución de la porosidad es debido a una fracción de poros que nuclea al inicio del daño, los cuales crecen y coalescen de forma acelerada alcanzado el esfuerzo de fractura, lo cual coincide con las evoluciones de la porosidad obtenidas del **MDGTN**, Figuras 6.11 y 6.12. De este resultado se puede concluir que el ajuste de los parámetros del material del **MDGTN** permiten caracterizar de la evolución del daño del material.

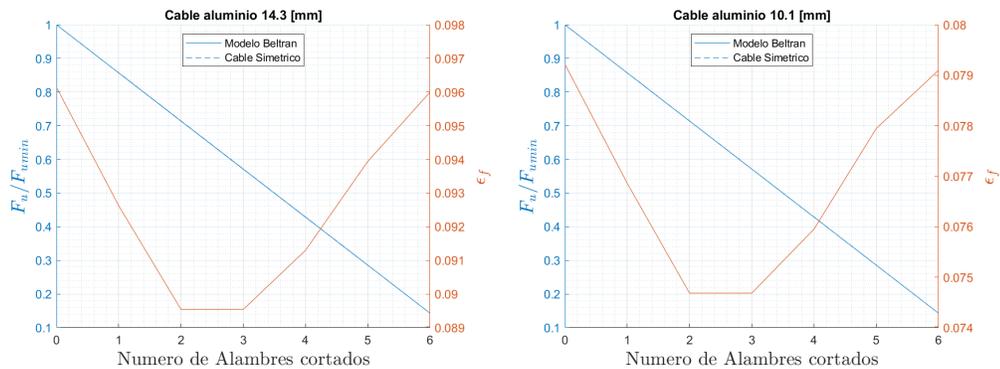
Considerando que el ajuste de los parámetros del material del **MDGTN** (medido con el **RVE**) es aquel que entrega mejores resultados, se seleccionaron estos para determinar las leyes de daño ingenieril de los alambres, cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 5.9. De estos se puede destacar que, para los alambres de aluminio, los D_C y α obtenidos son próximos, en particular α el cual está asociado a las propiedades mecánicas del material[37]. Considerando lo anterior se determinó el parámetro α del alambre de acero de 4.2 [mm], el cual debía ser igual al del acero de 2.95 [mm].

³ Las leyes de daño medidas con el **RVE** son estimadas a partir del **MEF** con los parámetros del **MDGTN**.

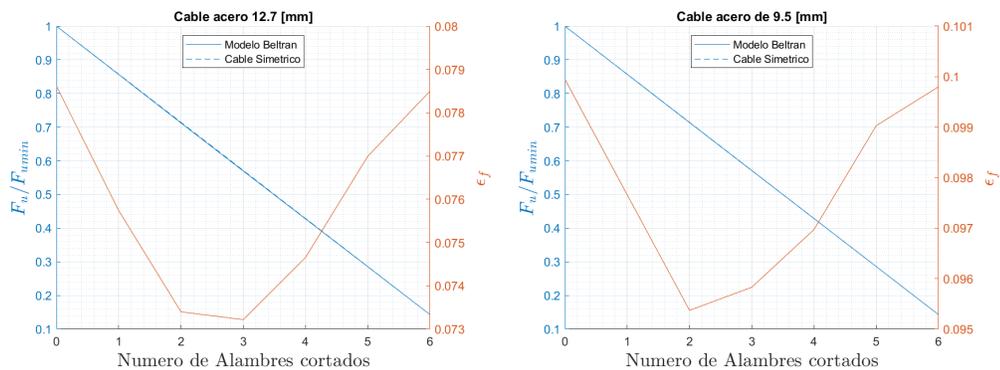
6.4. Ley ingenieril de los cables

De las leyes de esfuerzo-deformación ingenieril de los cables inicialmente vírgenes, Figura 5.13, se obtuvo que la utilización del modelo de cables de Beltrán et al. (2018)[7] permite determinar la ley de los cables utilizando la ley de ingenieril de los alambres y la ley de daño ingenieril de estos. Además, se pudo confirmar que las leyes determinadas por el modelo se ajustan a las especificaciones del fabricante, en particular, para los cuatro alambres la fuerza última, F_u^{ing} , es mayor a la F_u^{ingmin} definida en la Tabla 3.1.

Utilizando el modelo de cables de Beltrán et al. (2018)[7], se considera para el análisis los casos propuestos en las Figuras 4.6, donde se muestran los cables sin daño inicial y con uno a cinco alambres inicialmente cortados. Las leyes ingenieriles de los cables en dichos casos se muestran en el Anexo G, con los cuales se determina la Figura 6.13, donde se muestra la evolución de la fuerza última, F_u^{ing} , y la deformación ingenieril de fractura, ϵ_f^{ing} , a medida que el cable presenta más alambres inicialmente cortados.



(a) Cable de aluminio de 14.3 [mm] de diámetro inicialmente virgen. (b) Cable de aluminio de 10.1 [mm] de diámetro inicialmente virgen.



(c) Cable de acero de 12.7 [mm] de diámetro inicialmente virgen. (d) Cable de acero de 9.5 [mm] de diámetro inicialmente virgen.

Figura 6.13: Leyes de los cables inicialmente vírgenes.

De la Figura 6.13 se puede notar que para los cuatro cables sin alambres cortados la fuerza última, F_u^{ing} , determinada con el modelo de cables de Beltrán et al. (2018) evoluciona de la misma forma que en el caso simétrico. Esto se debe a que el caso simétrico considera que la capacidad de carga de los cables disminuye de forma proporcional al área transversal de los alambres, y el modelo de cables de

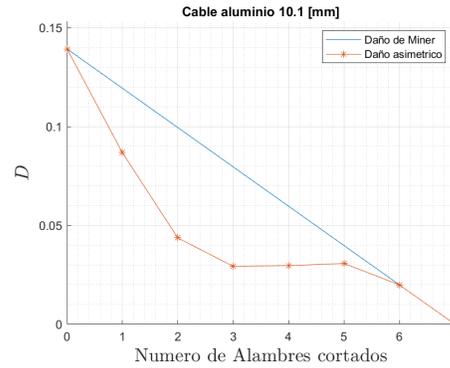
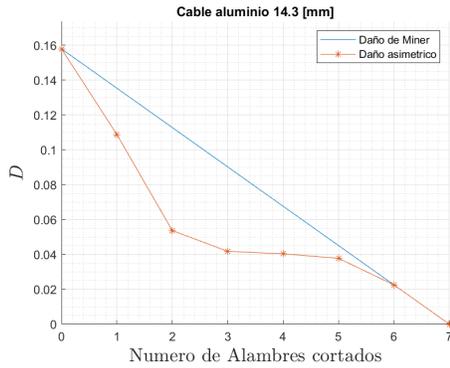
Beltrán et al. (2018) entrega el mismo resultado ya que los alambres modelados pierden capacidad posterior a ϵ_u^{ing} . La evolución de ϵ_f^{ing} muestra un comportamiento similar para los cuatro cables, donde para uno y dos alambres cortados se genera una disminución de la capacidad de deformarse, y luego, para 3 o más alambres cortados la ϵ_u^{ing} se recupera hasta llegar a los valores iniciales. Que los cables con uno o dos alambres cortados se presente una disminución de ϵ_f^{ing} se debe en principio a la asimetría geométrica de los alambres, lo cual incide en que el estado de esfuerzos sea no homogéneo y que algunos alambres se dañen y fallen antes.

En mayor detalle, que el estado de esfuerzos no homogéneo conlleve a que algunos alambres se dañen y falle antes se debe a que, algunos alambres inician la acumulación de daño antes que el resto de los alambres, como se muestra en las Figuras de la Sección 5.5. Luego, los alambres que inician la acumulación de daño antes que el resto alcanzan primeros el daño crítico, D_C , lo cual coincide con la propagación de la grieta en la mesoescala del alambre, y su consiguiente fractura. Dado que cuando se corta un alambre de un cable, el estado esfuerzo-deformación abandona su estado cuasi estático, iniciando mecanismos dinámicos que se escapan del análisis de evolución de daño dúctil, por lo cual, cuando un alambre alcanza su daño crítico se considera que el cable falla en su totalidad.

6.5. Ley de daño ingenieril de los cables

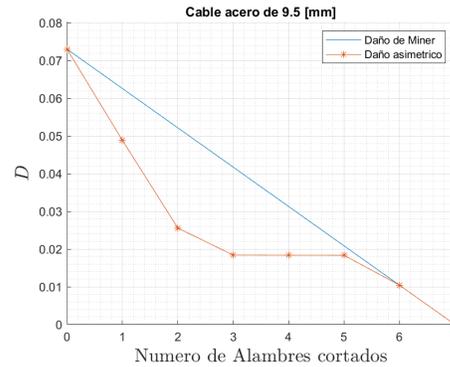
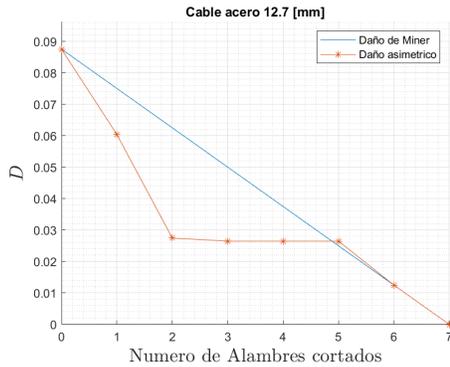
En las Figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran las leyes de daño de los cables. Estas son construidas a partir de las leyes de daño de los alambres que se muestran en el Anexo G, las cuales fueron determinadas con el modelo de cables de Beltrán et al. (2018)[7] utilizando las leyes de daño determinadas con el **MDB**, Figuras 5.12, y las leyes de ingeniería obtenidas experimentalmente.

En primer lugar, se destaca que la evolución del daño obtenida en los cables es exponencial, al igual que la de los alambres. Luego, se puede observar que, dada la asimetría generada por los alambres cortados inicialmente, el daño de los alambres inicia en distintos momentos, y que en el caso del inicialmente virgen todos los alambres acumulan daño desde el mismo momento. Para que un cable opere de forma correcta es necesario que los alambres que lo componen actúen de forma paralela, por esta razón, que en el cable sin daño inicial todos los alambres acumulen daño de forma simultánea es un resultado esperado, por lo cual, es de especial interés determinar cómo varía la capacidad de acumulación de daño a medida que se cortan uno o más alambres. En la Figura 6.14 se muestra la capacidad de acumular daño de los cables en función del número de alambres inicialmente cortados, calculados con las expresiones mostradas en la Sección 2.8.



(a) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de aluminio de 14.3 [mm].

(b) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de aluminio de 10.1 [mm].



(c) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de acero de 12.7 [mm].

(d) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de acero de 9.5 [mm].

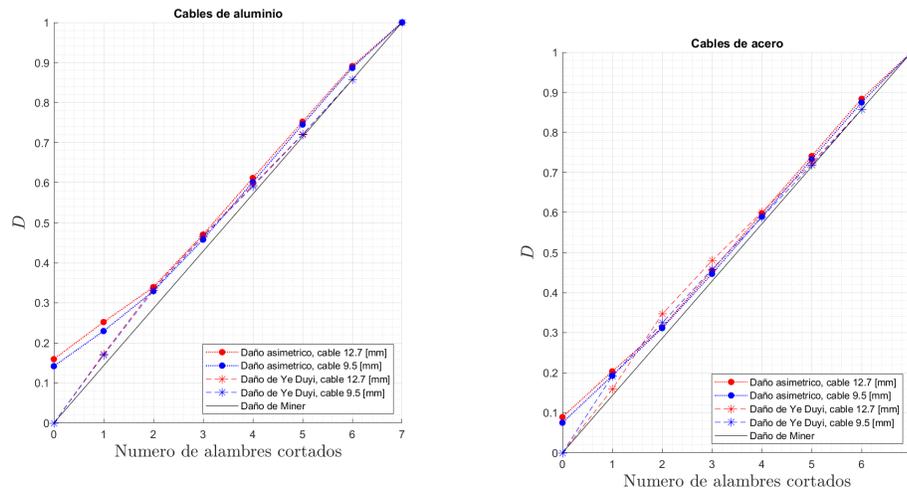
Figura 6.14: Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados.

Se usan dos métricas de daño para determinar esta evolución, la primera es el daño de Miner, que supone que el daño se distribuye homogéneamente en el cable, lo cual muestra una disminución lineal de la capacidad de daño del cable. La segunda métrica es utilizando los resultados obtenidos del modelo de Beltrán, el cual permite determinar la evolución asimétrica del daño. De la Figura 6.14 se puede determinar que cuando se tiene uno o dos alambres cortados la capacidad de acumular daño desciende con mayor velocidad que en el caso simétrico de Miner. Luego, con dos a cinco alambres inicialmente cortados se obtiene que la capacidad de acumulación de daño es constante y para seis alambres cortados se vuelve a tener una caída en la acumulación de daño.

Una capacidad de acumulación de daño constante está asociada a una inestabilidad desde el punto de vista del estado de daño del cable, ya que el nivel de asimetría alcanzado con dos a cinco alambres cortados es tal que la distribución heterogénea del daño lleva a que el daño sea acumulado únicamente por un alambre. Por lo anterior, desde el punto de vista del estado de daño del cable, es indiferente tener dos a cinco alambres cortados.

En la Figura 6.15 se muestra la evolución daño total de los cables, a diferencia de los gráficos de acumulación del daño. Las leyes de daño de Miner y de Ye Duyi muestran el daño inicial simétrico e inicial asimétrico respectivamente y la ley de daño asimétrico muestra el daño total final de los cables,

lo cual permite evaluar el efecto de la asimetría en el daño total que capturan los cables con uno o más alambres cortados inicialmente.



(a) Evolución del daño de los cables de aluminio.

(b) Evolución del daño de los cables de acero.

Figura 6.15: Evolución del daño de los cables en función del número de alambres inicialmente cortados.

Considerando las leyes de daño de Miner y de Ye Duyi se puede notar el efecto de la asimetría en el daño inicial de los cables. Las leyes de daño de Ye Duyi son similares para los cables del mismo material y el comportamiento de esta es el mismo independiente del material, por lo cual son analizadas de forma paralela. En primer lugar, se pueden notar tres tramos en la ley de daño de Ye Duyi, el primero de uno a dos alambres cortados, donde el daño inicial asimétrico incrementa de forma lineal con respecto a la ley de Miner, el segundo de dos a cinco alambres cortados donde el daño inicial converge al daño simétrico de Miner y el tercero para cinco a seis alambres cortados, donde el daño inicial asimétrico de Ye Duyi es igual al daño simétrico de Miner.

Considerando las leyes de daño asimétrico de los alambres de aluminio, Figura 6.15a, las cuales poseen un mismo comportamiento para los dos cables. Con uno o dos alambres cortados el daño crítico de los cables crece a una menor tasa que el daño inicial y de dos a seis alambres cortados el daño crítico incrementa con la misma tasa que el daño inicial, de esto se puede concluir que el efecto de la asimetría posee un mayor efecto para uno o dos alambres cortados y de tres a seis alambres el efecto de la asimetría es incipiente, por lo cual la capacidad de acumular daño no varía, la cual es la misma conclusión a la cual se llegó del análisis de la Figura 6.14.

Para los alambres de acero, la ley de daño de Ye Duyi no presenta el comportamiento estable que se obtiene en el caso de los aluminios. Esto se obtiene de la Figura 6.15b, donde el daño simétrico es superado por el de Ye Duyi. Este comportamiento se puede deber a la baja ductilidad de los alambres de acero, en conjunto a que D_C es menor para este material.

En la Figura 6.16 se muestra el análisis de los resultados obtenidos utilizando el método de Ye Duyi, donde se obtiene que el análisis realizado de acuerdo a la Figura 2.22 entrega los mismos resultados que la ecuación de Ye Duyi, Ecuación 2.64, reafirmando la interpretación propuesta del

modelo en la Sección 2.8.2.

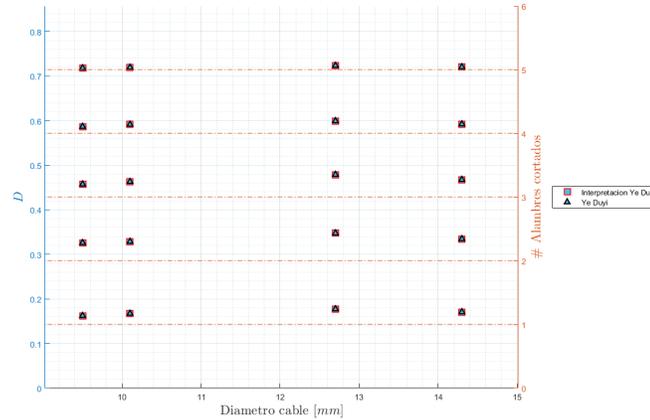


Figura 6.16: Análisis del daño estimado por energía de Ye Duyi, para los cuatro alambres.

Del análisis del daño por energía de Ye Duyi se puede determinar que el daño determinado por Ye Duyi corresponde a, una métrica del daño que permite estimar el daño adicional que reciben los cables por efecto de la asimetría, con respecto al cable sin daño inicial. Como se muestra en la Figura 6.16, el daño estimado por Ye Duyi converge a el daño simétrico a medida que se tienen más alambres cortados, debido a que el componente asimétrico de la Ecuación 2.69 tiende a 0, dado que los alambres que componen los cables alcanzan valores de D_C cercanos al caso inicialmente virgen.

Que la acumulación de daño alcance un plateau para los casos de dos a cinco alambres cortados permite determinar que el efecto de la asimetría es dominante en dichos casos y, producto de esta solo uno de los alambres acumula la mayor parte del daño total del cable. Como se puede determinar de las leyes de evolución del daño, Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24, es el núcleo del cable el cual acumula este daño, y sería el alambre que falla primero. De los resultados expuestos, se tiene que el criterio de cambio de un cable es cuando este posee dos alambres cortados, debido a que con dos o más alambres cortados la acumulación de daño alcanza disminuye a una tasa menor.

6.6. Ley de daño ingenieril del MDEL

Los ensayos de tracción realizados a los alambres de los cables, Figuras 3.5, no capturaron un reblandecimiento prolongado como los obtenidos en un ensayo de ductilidad, Sección 2.2.7. Para corregir esta falta de ductilidad se utilizó el **MDEL**, con lo cual se obtuvieron las leyes ingenieriles mostradas en la Figura 5.18. La nueva ductilidad de estas leyes se muestra en la Tabla 6.4, donde se puede destacar que las nuevas leyes de ingeniería tienen entre un 27.9% y 161% mayor que la ductilidad experimental, considerando la métrica de Δe^{ing} .

Tabla 6.4: RMSE obtenido para cada una de las leyes de ingeniería obtenidas del **MHS**.

	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	$\Delta\epsilon^{ing}$ [mm/mm]
Aluminio 4.7 [mm]	0.0634	0.1212	0.0578
Aluminio 3.5 [mm]	0.0542	0.1055	0.0513
Acero 4.2 [mm]	0.0673	0.0976	0.0303
Acero 2.95 [mm]	0.0851	0.1057	0.0206

Si bien, correspondería realizar el mismo procedimiento para determinar las leyes reales de los alambres, parámetros del **MDGTN**, la evolución del daño mediante el **MDGTN** y el **RVE** para las nuevas leyes ingenieriles de los alambres, se realizaron ajustes únicamente a él **MDB** de los alambres para así determinar cómo les afecta a estas tener una ley ingenieril más dúctil y su efecto en las leyes de los cables.

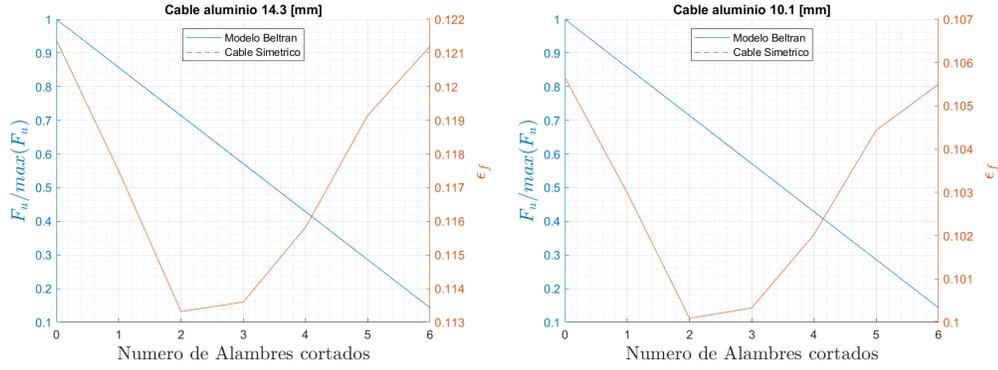
La ley de daño de los alambres con la ductilidad extrapolada se determinó directamente del **MDB**, ya que del ajuste realizado para la ley ingenieril experimental se obtuvo el parámetro α , el cual es intrínseco a el material. El daño crítico, D_C , se determinó del **MDL** y no del obtenido del **MDGTN**, esto porque el ajuste de los parámetros del **MDGTN** se realizó en una ley con una ductilidad reducida, por lo cual el D_C se habría subestimado. Los parámetros del **MDB** obtenidos se muestran en la Tabla 5.11.

Las leyes de daño obtenidas, Figura 5.19, poseen el mismo comportamiento exponencial que el **MDB** obtenida de la ley ingenieril experimental, pero el daño acumulado y la deformación de fractura son mayores, lo cual modificaría la evolución del daño en los cables.

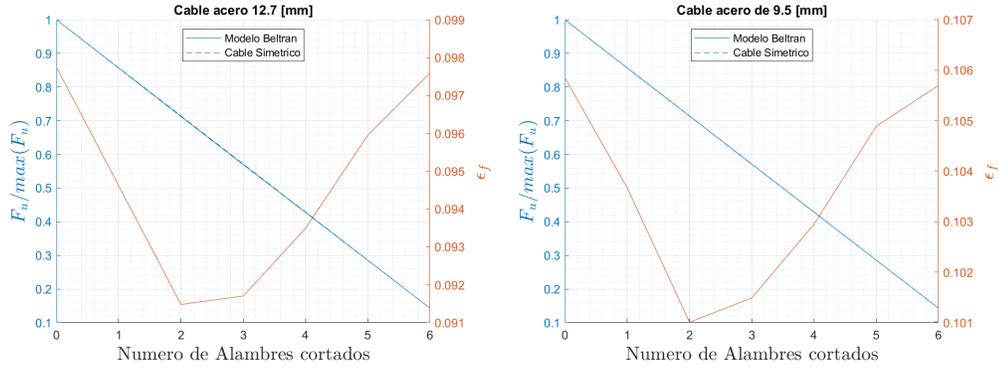
6.7. Ley ingenieril de los cables con el MDEL

De las leyes de esfuerzo-deformación ingenieril de los cables inicialmente vírgenes, Figura 5.20, se obtuvo que la utilización de las leyes ingenieriles de los alambres extrapoladas y la ley de daño ingenieril de estos permiten determinar la ley de los cables. Además, se pudo confirmar que las leyes extrapoladas por el **MDEL** determinan leyes ingenieriles de los cables que se ajustan a las especificaciones del fabricante, en particular, para los cuatro alambres la fuerza última, $F_u^{ing^{min}}$, es mayor a la $F_u^{ing^{min}}$ definida en la Tabla 3.1.

Utilizando el modelo de cables de Beltrán et al. (2018)[7], considerando los casos propuestos en las Figuras 4.6, donde se muestran los cables sin daño inicial y con uno a cinco alambres inicialmente cortados. Las leyes ingenieriles de los cables en dichos casos se muestran en el Anexo H, con los cuales se determina la Figura 6.17, donde se muestra la evolución de $F_u^{ing^{min}}$ y $\epsilon_f^{ing^{min}}$ a medida que el cable presenta más alambres inicialmente cortados.



(a) Cable de aluminio de 14.3 [mm] de diámetro inicialmente virgen. (b) Cable de aluminio de 10.1 [mm] de diámetro inicialmente virgen.



(c) Cable de acero de 12.7 [mm] de diámetro inicialmente virgen. (d) Cable de acero de 9.5 [mm] de diámetro inicialmente virgen.

Figura 6.17: Leyes de los cables inicialmente vírgenes.

De la Figura 6.17 se puede notar que para los cuatro cables la fuerza última, $F_u^{ing^{min}}$, determinada con el modelo de cables de Beltrán et al. (2018), evoluciona de la misma forma que en el caso simétrico. Esto se debe a que el caso simétrico considera que la capacidad de carga de los cables disminuye de forma proporcional al área transversal de los alambres, y el modelo de cables de Beltrán et al. (2018) entrega el mismo resultado ya que los alambres modelados pierden capacidad de carga después de $F_u^{ing^{min}}$. La evolución de $\epsilon_f^{ing^{min}}$ muestra un comportamiento similar para los cuatro cables, donde para uno y dos alambres cortados se genera una disminución de la capacidad de deformarse, y luego, para 3 o más alambres cortados la ϵ_f^{min} se recupera hasta llegar a los valores iniciales. Que los cables con uno o dos alambres cortados se presente una disminución de $\epsilon_f^{ing^{min}}$ se debe en principio a la asimetría geométrica de los alambres, lo cual incide en que el estado de esfuerzos sea no homogéneo y que algunos alambres se dañen y fallen antes.

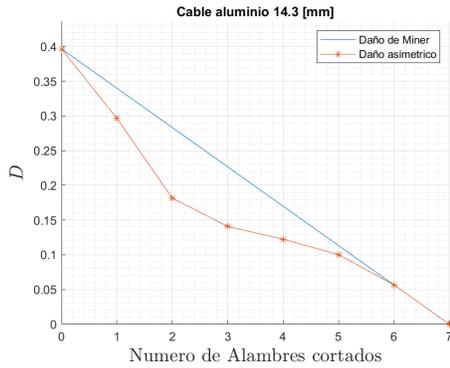
Las leyes ingenieriles de los cables con la ley de los alambres extrapolada poseen el mismo comportamiento que en el caso inicial, por lo cual efecto de la extrapolación de la ductilidad no conlleva a diferencias en las conclusiones obtenidas.

6.8. Ley de daño ingenieril de los cables con el MDEL

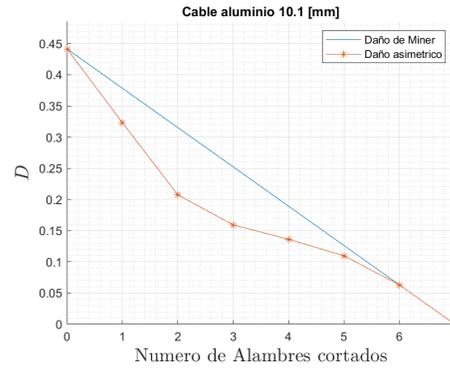
En las Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24 se muestran las leyes de daño de los cables. Estas son construidas a partir de las leyes de daño de los alambres que se muestran en el Anexo H, las cuales fueron determinadas con el modelo de cables de Beltrán utilizando las leyes de daño de Bonora extrapoladas, Figuras 5.19, y las leyes de ingeniería obtenidas experimentalmente extrapoladas con la metodología del **MDEL**.

En primer lugar, se destaca que la evolución del daño obtenida en los cables es exponencial, al igual que la de los alambres. Luego, se puede observar que, dada la asimetría generada por los alambres cortados inicialmente, el daño de los alambres inicia en distintos momentos, y que en el caso del inicialmente virgen todos los alambres acumulan daño desde el estado esfuerzo-deformación. Para que un cable opere de manera adecuada es necesario que los alambres que lo componen actúen de forma paralela, por esta razón, que en el cable sin daño inicial todos los alambres acumulen daño de forma simultánea es un resultado esperado, por lo cual, es de especial interés determinar cómo varia la capacidad de acumular daño a medida que se cortan uno o más alambres. En la Figura 6.18 se muestra la capacidad de acumular daño de los cables en función del número de alambres inicialmente cortados.

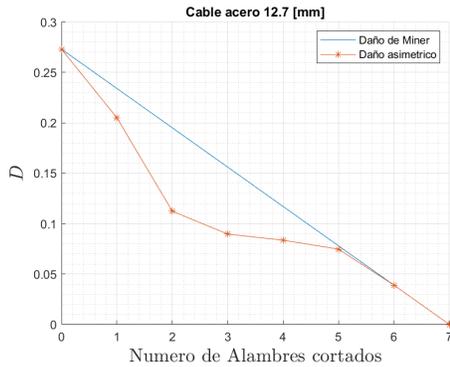
Las leyes de daño de los cables con el **MDEL** se diferencian de las originales en dos puntos, que el nivel de daño alcanzado por el cable es mayor y que el número de cables que acumulan daño también lo es. Esto es consecuencia directa de la extrapolación, los alambres al tener una mayor deformación de fractura permiten al cable deformarse más, por lo cual el número de alambres que empiezan a acumular daño también es mayor. Al haber más alambres acumulando daño y estos al poder acumular niveles mayores de daño permiten al cable acumular más daño.



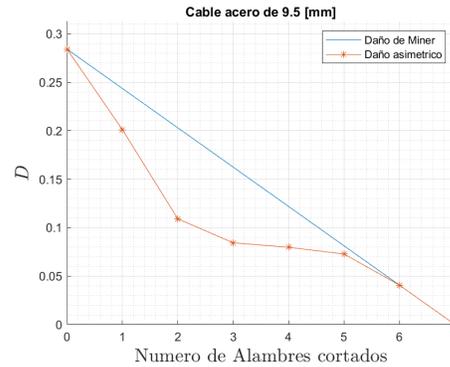
(a) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de aluminio de 14.3 [mm].



(b) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de aluminio de 10.1 [mm].



(c) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de acero de 12.7 [mm].



(d) Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados para el cable de acero de 9.5 [mm].

Figura 6.18: Capacidad de acumulación de daño en función del número de alambres cortados, con el **MDEL**.

Se usan dos métricas, el daño inicial simétrico de Miner y los resultados obtenidos del modelo de Beltrán, el cual permite determinar el efecto de la asimetría en la capacidad de acumulación de daño. De la Figura 6.18 se puede determinar que cuando se tiene uno o dos alambres cortados la capacidad de acumular daño desciende con mayor tasa, y con dos a cinco alambres inicialmente cortados se obtiene que la capacidad de acumulación de daño desciende a una menor tasa y para seis alambres cortados se vuelve a tener una caída en la acumulación de daño.

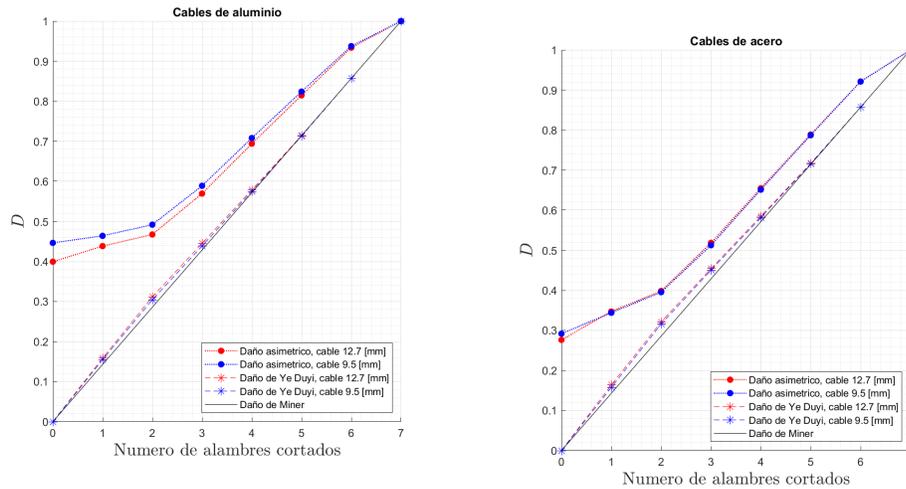
A pesar de que las mayores disminuciones en la capacidad de acumular daño sean con uno o dos alambres cortados, estas no son justificación suficiente para determinar una condición de remplazo de un cable. Lo que sí es concluyente es que, con dos a cinco alambres cortados inicialmente, la capacidad de acumular daño descienda con una menor tasa. Por lo cual, esto permite concluir que independiente a si se tienen dos o cinco alambres cortados, la acumulación de daño del cable es similar.

Dado lo anterior, se puede establecer que un cable con dos o más alambres inicialmente cortados está en un estado de inestabilidad de acumulación de daño, lo cual es un criterio suficiente para establecer el remplazo de un cable. Considerando además los criterios de remplazo de las normas "OSHA 1926.1413"[12] e "ISO 4309:2010"[10], las cuales también establecen un criterio de remplazo para dos alambres cortados, se puede determinar que un cable debe ser remplazado con dos alambres

cortados.

A diferencia de las leyes de capacidad de acumulación de daño obtenidas del caso original, Figura 6.14, los cuatro cables poseen un comportamiento similar, y el cambio en la variación de acumular daño de los cables sucede cuando se tienen dos alambres cortados. Que de dos a cinco alambres cortados la acumulación de daño descienda a una menor tasa se debe a la ductilidad extrapolada, que permite que más cables acumulen daño antes que uno alcance el D_C .

En la Figura 6.19 se muestra la evolución del daño de los cables, a diferencia de los gráficos de acumulación del daño, estos consideran que los alambres inicialmente cortados como daño. Las leyes de daño de Miner y de Ye Yudi muestran el daño inicial simétrico y asimétrico respectivamente y la ley de daño asimétrico muestra el daño total final de los cables.



(a) Evolución del daño de los cables de aluminio.

(b) Evolución del daño de los cables de acero.

Figura 6.19: Evolución del daño de los cables, con el **MDEL**.

Considerando las leyes de daño de Miner y de Ye Dui se puede notar el efecto de la asimetría en el daño inicial de los cables. Las leyes de daño de Ye Dui son similares para los cables del mismo material y el comportamiento de esta es el mismo independiente del material, por lo cual son analizadas de forma paralela. En primer lugar, se pueden notar tres tramos en la ley de daño de Ye Dui, el primero de uno a dos alambres cortados, donde el daño inicial asimétrico incrementa de forma lineal con respecto a la ley de Miner, el segundo de dos a cinco alambres cortados donde el daño inicial converge al daño simétrico de Miner y el tercero para cinco a seis alambres cortados, donde el daño inicial asimétrico de Ye Dui es igual al daño simétrico de Miner.

Considerando las leyes de daño asimétrico de los cables de aluminio, Figura 6.19a. Con uno o dos alambres cortados el daño crítico de los cables crece a una menor tasa que el daño inicial y de dos a seis alambres cortados el daño crítico incrementa con la misma tasa que el daño inicial. De esto se puede concluir que el efecto de la asimetría posee un mayor efecto para uno o dos alambres cortados y de tres a seis alambres el efecto de la asimetría es incipiente, por lo cual la capacidad de acumular daño no varía, la cual es la misma conclusión a la cual se llegó del análisis de la Figura 6.18.

Para los cables de acero, Figura 6.19b, las leyes de daño asimétrico muestran el mismo comportamiento que los cables de aluminio, y a diferencia de lo obtenido en el caso base, las leyes de daño de Ye Duyi presentan un comportamiento más estable, manteniéndose menores al daño asimétrico. Lo anterior se puede deber a que en el caso base el daño se encontraba subestimado, por la ductilidad truncada.

En la Figura 6.20 se muestra el análisis de los resultados obtenidos utilizando el método de Ye Duyi, donde se obtiene que el análisis realizado de acuerdo a la Figura 2.22 entrega los mismos resultados que la ecuación de Ye Duyi, Ecuación 2.64, reafirmando la interpretación propuesta del modelo en la Sección 2.8.2.

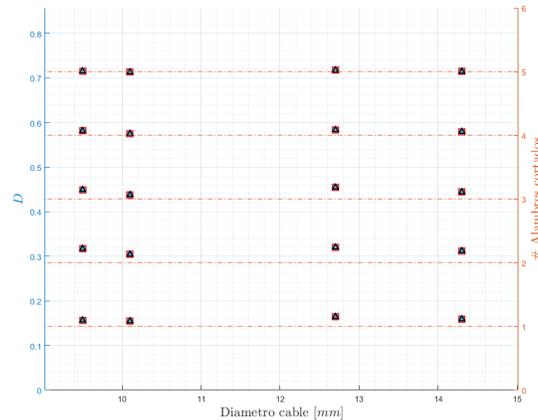


Figura 6.20: Análisis del daño estimado por energía de Ye Duyi, para los cuatro alambres.

Del análisis del daño por energía de Ye Duyi se puede determinar que el daño determinado por Ye Duyi corresponde a, una métrica del daño que permite estimar el daño adicional que reciben los cables por efecto de la asimetría, con respecto al cable sin daño inicial. Como se muestra en la Figura 6.20, el daño estimado por Ye Duyi converge a el daño simétrico a medida que se tienen más alambres cortados. A diferencia del caso inicial, utilizando el **MDEL** la convergencia del daño estimado por Ye Duyi converge más rápido a el daño simétrico, lo cual reafirma el supuesto de que la ley ingenieril experimental subestimo la ductilidad y daño de los cables.

Que la acumulación de daño disminuya de forma incipiente para los casos de dos a cinco alambres cortados permite determinar que el efecto de la asimetría es dominante en dichos casos y, producto de esta solo uno de los alambres acumula la mayor parte del daño total del cable. Como se puede determinar de las leyes de evolución del daño, Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24, es el núcleo del cable el cual acumula este daño, y sería el alambre que falla primero. De los resultados expuestos, se tiene que el criterio de cambio de un cable es cuando este posee dos alambres cortados, debido a que con dos o más alambres cortados la acumulación de daño alcanza disminuye a una tasa menor, lo cual se asocia a una inestabilidad en la capacidad de acumulación de daño de los cables.

Capítulo 7

Conclusiones: de los resultados obtenidos del procedimiento numérico

Se logró obtener las leyes reales de los alambres utilizando el **MHS**, siguiendo el procedimiento establecido por Kweon et al. (2020)[1]. Los mejores resultados se obtuvieron de los materiales que presentaban una mayor ductilidad, aunque, el factor que tomo mayor importancia fue la deformación plástica acumulada posterior a el esfuerzo último.

Que los aceros hayan presentado una menor ductilidad podría deberse a que los ensayos de tracción realizado, Sección 2.2, no capturan completamente la ductilidad de éstos, por lo cual la realización de un post procesamiento de las leyes de ingeniería experimentales utilizando el **MDEL** o, la realización de ensayos con equipamiento adecuado para capturar la ductilidad (Sección 2.2.7) podrían evitar este problema.

El procedimiento iterativo propuesto para determinar los parámetros del **MDGTN** permitió incorporar el daño a las leyes sin daño propuestas, obteniéndose mejores resultados para el ajuste de los materiales más dúctiles, los aluminios, lo cual se condice con lo obtenido del ajuste del **MHS**.

De los ajustes de los parámetros constitutivos y del material del **MDGTN** se pudo determinar dos conjuntos de parámetros del **MDGTN** que son solución, los cuales permiten caracterizar la evolución de la porosidad en el material. Esto se condice con lo establecido por Springmann y Kuna (2005)[40]. Los parámetros del **MDGTN** ajustados por los parámetros constitutivos no capturan daño por coalescencia, por lo cual q_1 y q_2 deben ser fijados en torno a $q_1 = 1.5$ y $q_2 = 1$ como propone Tvergaard y Needleman (1984)[34]. Considerando que el ajuste de los parámetros del material permite capturar daño por coalescencia, los parámetros q_1 y q_2 pueden ser fijados de acuerdo con lo establecido por Faleskog et al. (1998)[36].

Del **MEF**, con el **MDGTN** incorporado se determinó la evolución del daño utilizando el **MDGTN** y el **RVE**, ambos métodos capturaron un comportamiento exponencial, aunque el **MDGTN** capturó daño previo a ϵ_u^{ing} , el cual se puede considerar como daño incipiente al representar un porcentaje menor del D_C . Que la acumulación de daño no incipiente inicie posterior al ϵ_u^{ing} se condice con lo establecido por Lemaitre y Desmorat (2005)[18].

El método del **RVE** mostró ser menos sensible a la malla del **MEF**, a diferencia del **MDGTN** que captura más daño a medida que la malla es más fina. El método del **RVE** mostró ser más estable y con un costo computacional menor con respecto al **MDGTN**.

El **MDB** permite capturar la evolución del daño exponencial del **MDGTN** determinado con el método del **RVE**, caracterizando la evolución de la microestructura del alambre en función de los parámetros obtenidos. La ley del **MDB** posee menos parámetros que el **MDGTN**, pero aun así logra capturar el mismo comportamiento de la evolución del daño.

La fuerza última alcanzada por los cables disminuye de forma lineal con respecto al número de alambres cortados, esto porque el efecto de la asimetría no es latente previo a que se alcance dicha fuerza. En cambio, la deformación de fractura varía en función del número de alambres cortados, donde en el caso de dos alambres cortados se alcanza el mínimo ϵ_f .

La incorporación de las leyes de daño ingenieriles a los alambres de los cables permitió determinar la evolución del daño del cable, de forma desacoplada. La capacidad de acumulación de daño de los cables se ve disminuida por la cantidad de alambres cortados. En particular para uno o dos alambres colindantes superficiales cortados la tasa con que disminuye es mayor a la que establece la ley de Miner para el caso simétrico. Para dos a cinco alambres cortados la capacidad de acumular daño del cable se mantiene constante, debido a que se alcanza el valor de asimetría crítico a el cual la mayor parte del daño del cable es acumulado por un solo alambre, y por lo que se está en un estado de inestabilidad de acumulación de daño.

El daño de los cables determinados a partir de la energía, como propone Ye Dui, permite determinar el daño inicial de los cables considerando el efecto de la asimetría, y muestra que uno a dos alambres cortados la asimetría de los cables posee un efecto creciente en el daño inicial, y de dos a cinco el daño inicial asimétrico decrece hasta igualarse con el daño inicial simétrico de Miner. Y, permite corroborar que la asimetría generada por los alambres cortados determina la evolución de daño en los cables.

Que la acumulación de daño de los cables se mantenga constante de dos a cinco alambres cortados permite determinar que, un cable con dos alambres cortados está en un estado de inestabilidad de daño, ya que el esfuerzo-deformación del cable se concentra en un solo alambre. Por consiguiente, un cable de un metal dúctil de 1×7 debe ser remplazado cuando este posee más de dos alambres cortados.

El **MDEL** propone que el ensayo de tracción no captura toda la ductilidad del alambre, ni todo el daño que se acumula en ésta, por este motivo las leyes ingenieriles de los alambres determinadas con este modelo presentan mayor ductilidad y daño. Las leyes ingenieriles de los cables determinadas con el **MDEL** se ajustan a lo establecido por el fabricante.

Sin considerar que el daño que acumulan los cables con el **MDEL** es mayor, el comportamiento de acumulación de daño es similar al caso base. Por lo cual se llega a que el criterio de recambio de los cables de metales dúctiles de 1×7 es cuando se tienen dos alambres cortados, dado que con dos o más alambres la capacidad de acumular daño disminuye a una menor tasa.

De las leyes de evolución del daño obtenidas del **MDEL** en comparación con el caso base se obtiene que, los cables compuestos por alambres de mayor ductilidad poseen una mayor capacidad de acumular daño, dado que una mayor cantidad de alambres alcanzan a acumular daño previo a que el núcleo alcance el daño crítico.

El **MHS** permitió determinar las leyes reales de los alambres, la cual incorpora la evolución del daño de los alambres de forma implícita, y, utilizando el **MDGTN** se logró desacoplar la ley de daño ingenieril de los alambres. Las leyes de daño de los alambres permitieron determinar la evolución del daño del daño de los alambres del cable, y por consiguiente la ley de daño de los cables.

7.1. Trabajo futuro

Se propone el método establecido por Liao et al. (2019)[41], el cual es un modelo de deformación crítica modificada por el esfuerzo, donde la ley real es determinada por un proceso iterativo como el utilizado por Kweon et al. (2020)[1], pero la ley de potencia utilizada es la de Voce, Ecuación 2.17, la cual posee menos parámetros lo cual simplificaría el proceso iterativo para determinar la ley real.

La realización de ensayos dúctiles, como los mostrados en la Sección 2.2.7, junto con ensayos de tracción regulares permitiría verificar que el **MDEL** es una buena aproximación. Esto porque el costo asociado la realización de ensayos dúctiles es mayor en tiempo e inversión que un ensayo tradicional.

Determinar la ley de esfuerzos reales de forma experimental, realizando un seguimiento de la estricción de la probeta, para así poder verificar que modelo de potencia permite capturar de mejor forma su comportamiento.

Se propone realizar el mismo procedimiento para determinar las leyes de evolución de daño para otras geometrías de cables y otros materiales dúctiles, y, considerando el corte de los alambres asimétricos de forma aleatoria.

Se propone realizar el ensayo experimental de los cables, para determinar la evolución de daño para uno o más alambres inicialmente cortados, y realizar simulaciones con un **MEF** utilizando una ley real como la obtenida del **MHS**.

Modelar el efecto de la reducción de área en la capa externa de los cables, debido a la corrosión, utilizando el **MDGTN** y con la ley real determinada del **MHS**, para determinar la evolución del daño por dicho efecto.

Realizar simulaciones de los cables en un **MEF** utilizando la ley real de los alambres, obtenidas de un modelo elastoplástico de potencia y comparar los resultados obtenidos con la simulación del **MEF** utilizando la ley real sin daño y el **MDGTN**.

Bibliografía

- [1] H. Kweon, J. Kim, O. Song y D. Oh. Determination of true stress-strain curve of type 304 and 316 stainless steels using a typical tensile test and finite element analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2):647–656, 2021.
- [2] Vuong Nguyen Van Do. The behavior of ductile damage model on steel structure failure. *Procedia Engineering*, 142:26–33, 2016.
- [3] J. Archut, Vinyas, e Y. Upadhyaya. Estimation of Damage Value of SAE4340 Steel and 5A02 Aluminium Alloy. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15(2):5211–5220, 2018.
- [4] F. Yang y M. Veljkovic. Damage Model Calibration for S275 and S690 Steels. *Ce/Papers*, 3(5-6):262–271, 2019.
- [5] F. Yang, M. Veljkovic y Y. Liu. Ductile damage model calibration for high-strength structural steels. *Construction and Building Materials*, 263:120632, 2020.
- [6] A. Wahid, N. Mouhib, A. Kartouni, H. Chakir y M. ELghorba. Energy method for experimental life prediction of central core strand constituting a steel wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 97(2018):61–71, marzo 2019.
- [7] J. Beltrán, E. Nuñez, F. Nuñez, I. Silva, T. Bravo y R. Moffat. Static response of asymmetrically damaged metallic strands: Experimental and numerical approach. *Construction and Building Materials*, 192:538–554, 2018.
- [8] R. Budynas y K. Nisbet. *SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 8^{va} edición, 2008.
- [9] K. Schrems y D. Maclaren. Failure analysis of a mine hoist rope. *Engineering Failure Analysis*, 4(1):25–38, marzo 1997.
- [10] ISO 4309:2010(E). *Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard*, volumen 2010. ISO, 4^{ta} edición, 2010.
- [11] Juan Beltrán. *Computational modeling of synthetic-fiber ropes*. Tesis de PhD, University of Texas en Austin, 2006.
- [12] Administration Occupational Safety and Health. OSHA 1926.1413: Wire rope inspection, 2021. Revisado el 14 de julio del 2021 en <https://www.osha.gov/>.
- [13] Luis Ortiz. *Resistencia de Materiales*. McGraw-Hill, 3^{ra} edición, 2007.
- [14] ASTM. ASTM E8/E8M: Standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *Annual Book of ASTM Standards 4*, 2010.

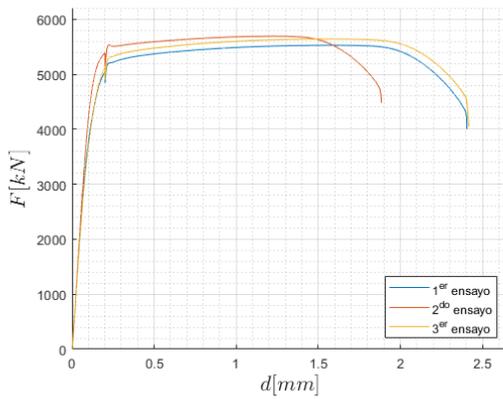
- [15] ASTM. A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. *ASTM International*, pages 1–50, 2014.
- [16] P. Bridgman. *Studies in large plastic flow and fracture*. HARVARD UNIVERSITY, Cambridge, 1964.
- [17] H. Ho, K. Chung, X. Liu, M. Xiao y D. Nethercot. Modelling tensile tests on high strength S690 steel materials undergoing large deformations. *Engineering Structures*, 192(noviembre 2018):305–322, 2019.
- [18] J. Lemaitre y D. Rodrigue. *Engineering Damage Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [19] P. Patwardhan, R. Nalavde y D. Kujawski. An Estimation of Ramberg-Osgood Constants for Materials with and without Luder’s Strain Using Yield and Ultimate Strengths. *Procedia Structural Integrity*, 17:750–757, 2019.
- [20] J. Hockett y O. Sherby. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 23(2):87–98, 1975.
- [21] Norman Dowling. *Mechanical Behavior of Materials*. PEARSON, 4^{ta} edición, noviembre 2013.
- [22] Jean Lemaitre. *A Course on Damage Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [23] F. Scheyvaerts, T. Pardoen y P. Onck. A new model for void coalescence by internal necking. *International Journal of Damage Mechanics*, 19(1):95–126, 2010.
- [24] S. Gatea, H. Ou, B. Lu y G. McCartney. Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model. *Engineering Fracture Mechanics*, 186:59–79, 2017.
- [25] A. Weck, D. S. Wilkinson, E. Maire y H. Toda. Visualization by X-ray tomography of void growth and coalescence leading to fracture in model materials. *Acta Materialia*, 56(12):2919–2928, 2008.
- [26] Ye Duyi y W. Zhenlin. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. *International Journal of Fatigue*, 23(8):679–687, 2001.
- [27] A. Benallal, R. Billardon y J. Lemaitre. Continuum damage mechanics and local approach to fracture: Numerical procedures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 92(2):141–155, noviembre 1991.
- [28] N. Benseddiq y A. Imad. A ductile fracture analysis using a local damage model. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(4):219–227, 2008.
- [29] F. McClintock. A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Holes. *Journal of Applied Mechanics*, 35(2):363–371, junio 1968.
- [30] P. Thomason. Ductile fracture and the stability of incompressible plasticity in the presence of microvoids. *Acta Metallurgica*, 29(5):763–777, mayo 1981.
- [31] J. Rice y D. Tracey. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(3):201–217, junio 1969.
- [32] A. Gurson. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield

- Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99(1):2–15, enero 1977.
- [33] G. Rousselier. Ductile fracture models and their potential in local approach of fracture. *Nuclear Engineering and Design*, 105(1):97–111, 1987.
- [34] V. Tvergaard y A. Needleman. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 32(1):157–169, 1984.
- [35] M. Brünig, O. Chyra, D. Albrecht, L. Driemeier y M. Alves. A ductile damage criterion at various stress triaxialities. *International Journal of Plasticity*, 24(10):1731–1755, 2008.
- [36] J. Faleskog, X. Gao, y C. Fong Shih. Cell model for nonlinear fracture analysis - I. Micromechanics calibration. *International Journal of Fracture*, 89(4):355–373, 1998.
- [37] N. Bonora. A nonlinear CDM model for ductile failure. *Engineering Fracture Mechanics*, 58(1-2):11–28, septiembre 1997.
- [38] ANSYS Release 20.2 Reference. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, ansysinfo@ansys.com, <http://www.ansys.com>, 2020.
- [39] M. Achouri, G. Germain, P. Dal Santo y D. Saidane. Experimental characterization and numerical modeling of micromechanical damage under different stress states. *Materials and Design*, 50:207–222, 2013.
- [40] M. Springmann y M. Kuna. Identification of material parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical techniques. *Computational Materials Science*, 33(4):501–509, 2005.
- [41] F. Liao, M. Wang, L. Tu, J. Wang y L. Lu. Micromechanical fracture model parameter influencing factor study of structural steels and welding materials. *Construction and Building Materials*, 215:898–917, 2019.
- [42] Group Simutech. Performing EKILL Element Death in Ansys Workbench Mechanical Model. Recuperado el 04 de enero del 2021 de <https://forum.ansys.com/discussion/1373/i-want-to-see-the-failure>.

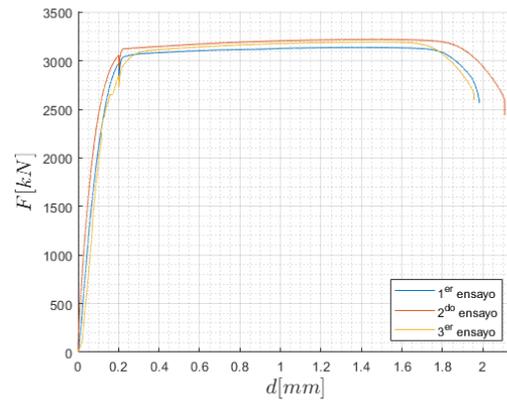
Anexo A

Datos experimentales

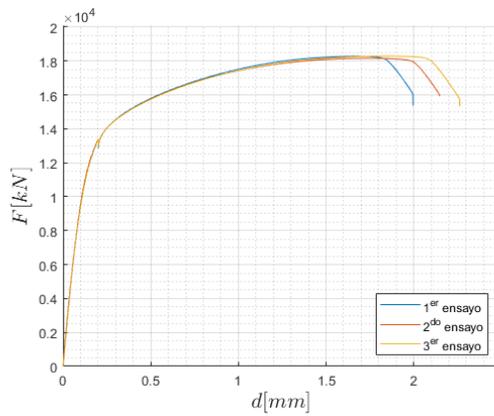
A.1. Ley esfuerzo-deformación ingenieril



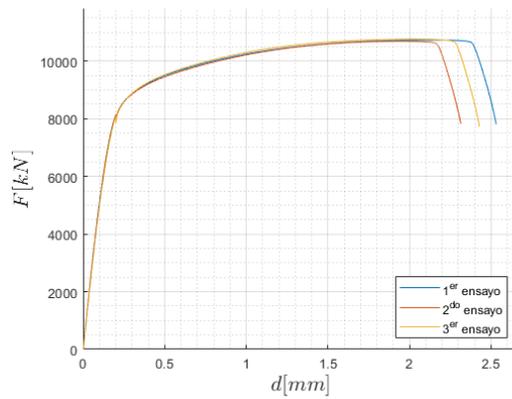
(a) Curva carga versus desplazamiento experimental del cable de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Curva carga versus desplazamiento experimental del cable de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(c) Curva carga versus desplazamiento experimental del cable acero de 4.2 [mm] de diámetro.



(d) Curva carga versus desplazamiento experimental del cable de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura A.1: Curvas de carga versus desplazamiento experimental.

A.2. Propiedades mecánicas

Tabla A.1: Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, último y de fractura obtenido experimentalmente para el ensayo del alambre de aluminio de diámetro 4.7 [mm/mm].

	E [GPa]	ϵ_y^{ing} [mm/mm]	σ_y^{ing} [MPa]	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	σ_u^{ing} [MPa]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	σ_f^{ing} [MPa]
Ensayo 1	64.886	0.0062	269.563	0.0634	318.634	0.0962	230.616
Ensayo 2	68.354	0.0064	299.676	0.0494	328.089	0.0754	258.195
Ensayo 3	60.549	0.0066	279.139	0.0626	325.176	0.0967	233.179
Promedio	64.596	0.0064	282.793	0.0585	323.966	0.0894	240.663
Desviación estándar	3.911	0.0002	15.385	0.0079	4.842	0.0122	15.237

Tabla A.2: Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, último y de fractura obtenido experimentalmente para el ensayo del alambre de aluminio de diámetro 3.5 [mm/mm].

	E [GPa]	ϵ_y^{ing} [mm/mm]	σ_y^{ing} [MPa]	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	σ_u^{ing} [MPa]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	σ_f^{ing} [MPa]
Ensayo 1	64.272	0.0065	290.839	0.0542	326.156	0.0792	266.637
Ensayo 2	71.942	0.0062	301.129	0.0578	334.764	0.0843	253.599
Ensayo 3	52.205	0.0075	288.806	0.058	332.037	0.0782	270.055
Promedio	62.806	0.0067	293.591	0.0567	330.986	0.0806	263.431
Desviación estándar	9.950	0.0007	6.606	0.0021	4.399	0.0033	8.684

Tabla A.3: Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, último y de fractura obtenido experimentalmente para el ensayo del alambre de aluminio de diámetro 4.2 [mm/mm].

	E [GPa]	ϵ_y^{ing} [mm/mm]	σ_y^{ing} [MPa]	ϵ_u^{ing} [mm/mm]	σ_u^{ing} [MPa]	ϵ_f^{ing} [mm/mm]	σ_f^{ing} [MPa]
Ensayo 1	195.610	0.0066	895.494	0.0673	1319.000	0.0798	1109.500
Ensayo 2	195.010	0.0067	907.429	0.0698	1310.600	0.0858	1149.100
Ensayo 3	196.920	0.0065	893.682	0.0736	1319.600	0.0905	1106.400
Promedio	195.847	0.0066	898.868	0.0702	1316.400	0.0854	1121.667
Desviación estándar	0.977	0.0001	7.469	0.0032	5.032	0.0054	23.808

Tabla A.4: Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, último y de fractura obtenido experimentalmente para el ensayo del alambre de aluminio de diámetro 2.95 [mm/mm].

	E	ϵ_y^{ing}	σ_y^{ing}	ϵ_u^{ing}	σ_u^{ing}	ϵ_f^{ing}	σ_f^{ing}
	[GPa]	[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]
Ensayo 1	202.950	0.0078	1182.600	0.0851	1570.000	0.1012	1142.800
Ensayo 2	203.800	0.0078	1180.000	0.0768	1564.000	0.0925	1145.000
Ensayo 3	192.980	0.008	1181.800	0.0811	1574.700	0.0971	1131.900
Promedio	199.910	0.0079	1181.467	0.0810	1569.567	0.0969	1139.900
Desviación estándar	6.017	0.0001	1.332	0.0042	5.363	0.0044	7.015

A.2.1. Reducción de área

Tabla A.5: Estimación de la reducción de área, para los dos metales estudiados.

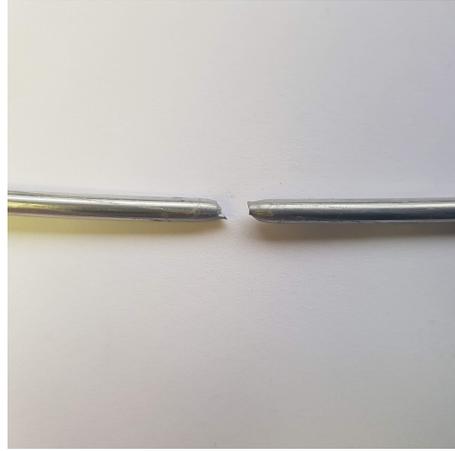
	d_0	d_{f_1}	d_{f_2}	d_{f_3}	d_{f_4}	d_{f_5}	d_{f_6}	\bar{d}_f	z
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
Acero	2.95	2.15	2.20	2.25	2.20	2.20	2.15	2.19	0.448
Aluminio	3.50	2.65	2.20	2.45	2.35	2.20	2.45	2.38	0.536

A.3. Alambres ensayados

Los alambres ensayados mostrados en las figuras no corresponden a los que fueron ensayados para obtener las leyes de ingeniería, pero pertenecen al mismo cable.



(a) Alambre de aluminio de 3.5 [mm] 1.



(b) Alambre de aluminio de 3.5 [mm] 2.



(c) Alambre de aluminio de 3.5 [mm] 3.



(d) Alambre de aluminio de 3.5 [mm] 4.



(e) Alambre de aluminio de 3.5 [mm] 5.

Figura A.2: Alambres de aluminio de 3.5 [mm].



(a) Alambre de acero de 2.95 [mm] 1.



(b) Alambre de acero de 2.95 [mm] 2.



(c) Alambre de acero de 2.95 [mm] 3.



(d) Alambre de acero de 2.95 [mm] 4.



(e) Alambre de aluminio de 2.95 [mm] 5.

Figura A.3: Alambres de acero de 2.95 [mm].

Anexo B

Configuración MEF

B.1. Análisis de sensibilidad de la geometría

B.1.1. Análisis de sensibilidad a **A**

Para el análisis de sensibilidad de **A** se utilizó la misma configuración que para el análisis de sensibilidad al largo de los elementos, y las dimensiones de las probetas se modificaron, utilizándose las que se muestran en la Tabla B.1. Se utilizó **G** de 25 [mm] constante, para analizar únicamente el efecto de **A** en la ley de ingeniera resultante de la simulación.

Tabla B.1: Dimensiones probeta en el análisis de sensibilidad de **A**.

	[mm]
A	25 - 55
D	4.7
G	25
R	4

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura B.1, donde se puede extraer que, para valores de **A** mayores a 25 [mm], las leyes obtenidas convergen, por lo que el valor de **A** a utilizar debe ser mayor 25 [mm].

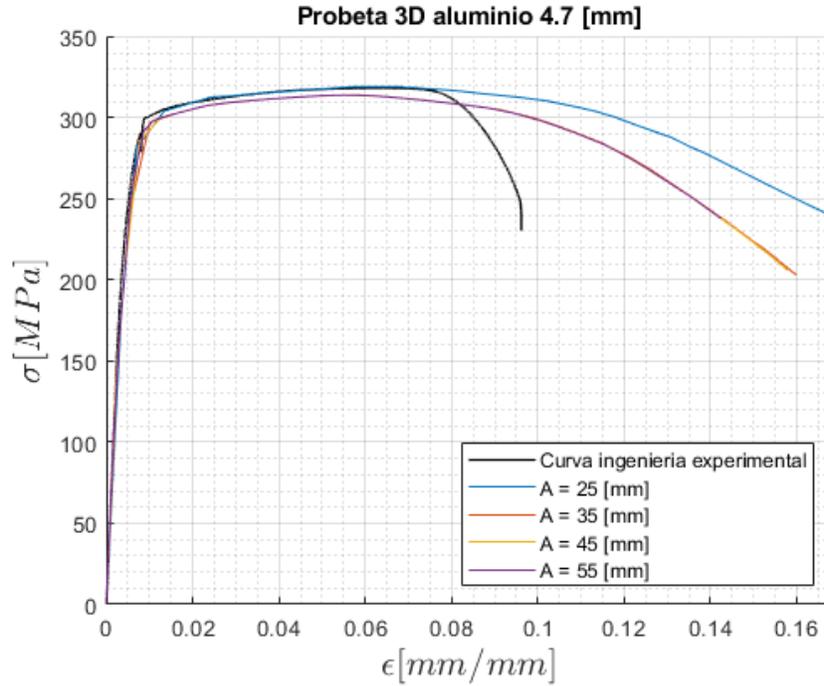


Figura B.1: Análisis de sensibilidad al largo **A**.

B.1.2. Análisis de sensibilidad a **G**

Para el análisis de sensibilidad de **G** se utilizó la misma configuración que para el análisis de sensibilidad al largo de los elementos, y las dimensiones de las probetas se modificaron, utilizándose las que se muestran en la Tabla B.2. Se utilizó **A** de 60 [mm] constante, ya este valor asegura la convergencia de la sensibilidad de **A** y para analizar únicamente el efecto de **G**.

Tabla B.2: Dimensiones probeta en el análisis de sensibilidad de **G**.

	[mm]
A	60
D	4.7
G	25-50
R	4

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura B.2, donde se puede observar que a medida que aumenta el valor de **G** la pendiente de reblandecimiento del **MEF** aumenta, aproximándose más a la obtenida experimentalmente. De la Figura B.3, se determina que para **G** mayores a 50 [mm] hay convergencia de las leyes de ingeniería del **MEF**.

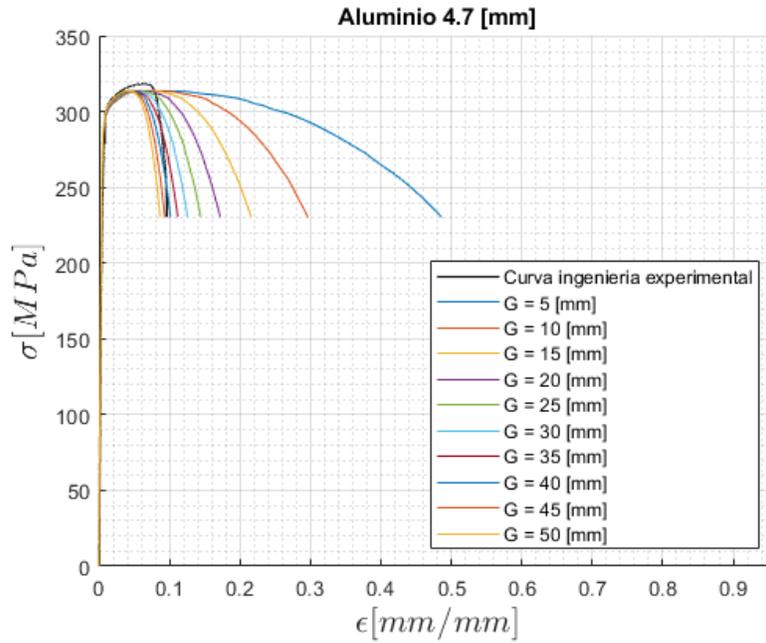


Figura B.2: Análisis de sensibilidad al largo G .

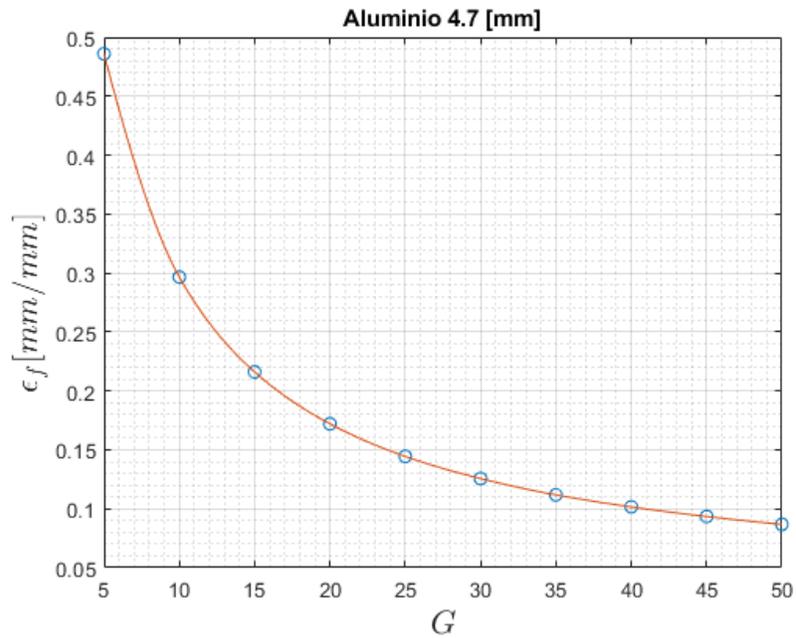
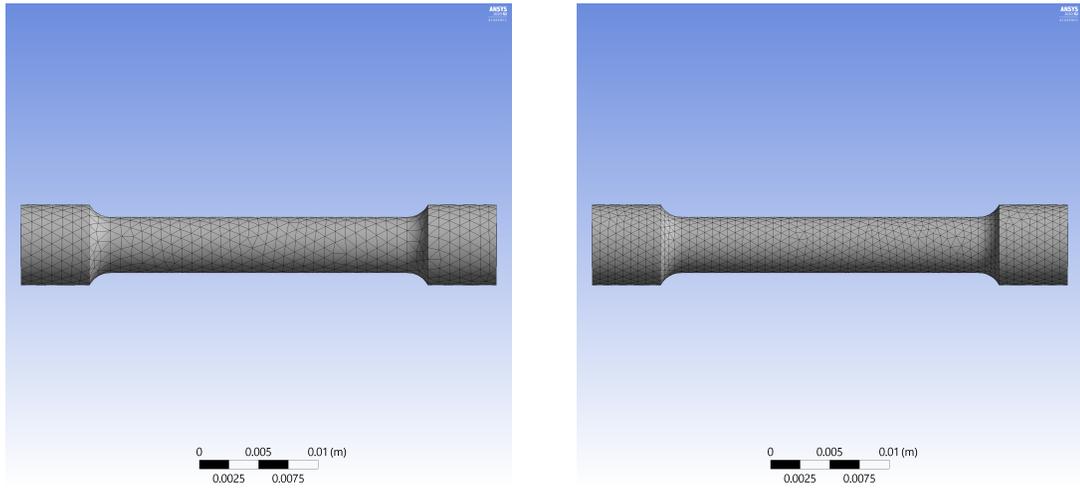


Figura B.3: Largo G versus la deformación ingenieril a la fractura.

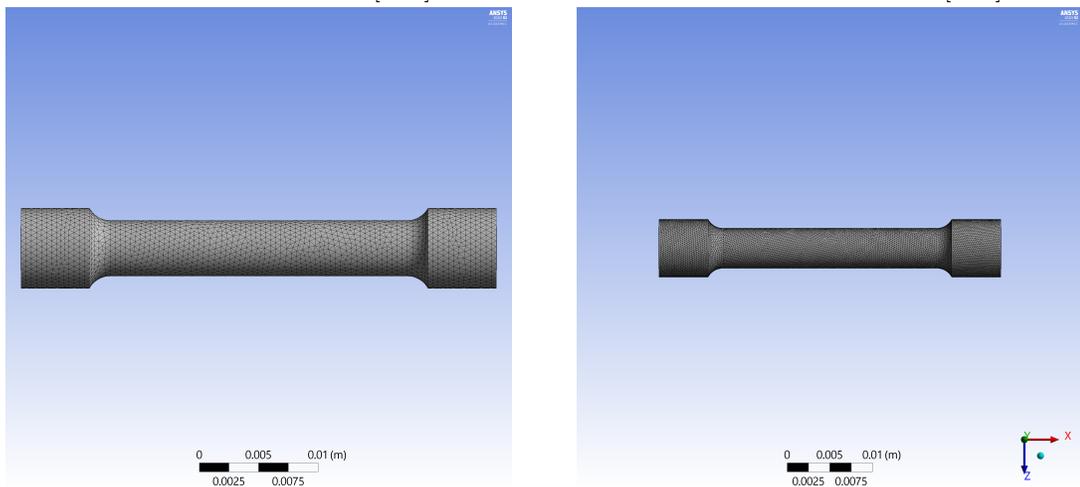
B.2. Análisis de sensibilidad del mallado

Utilizando la probeta de aluminio 4.7 [mm] de diámetro, con las dimensiones establecidas por la norma "ASTM E 8M"[14] (Tabla 3.2), se realizó un análisis de sensibilidad al tamaño de los elementos utilizando tamaños de 1 [mm], 0.75 [mm], 0.50 [mm] y 0.25 [mm]. En las Figuras B.4a, B.4b, B.4c y B.4d se muestra las mallas obtenidas utilizando el software **ANSYS Mechanical 2020 R2**[38]. En

la Tabla B.3 se muestra el número de elementos y nodos obtenidos para cada uno de los tamaños de elementos, donde se puede ver que el número de elementos y nodos crece de forma exponencialmente a medida que disminuye el tamaño de los elementos.



(a) Mallado de la probeta de aluminio de 4.7 [mm], (b) Mallado de la probeta de aluminio de 4.7 [mm], con un tamaño de elemento de 1.00 [mm]. con un tamaño de elemento de 0.75 [mm].



(c) Mallado de la probeta de aluminio de 4.7 [mm], (d) Mallado de la probeta de aluminio de 4.7 [mm], con un tamaño de elemento de 0.50 [mm]. con un tamaño de elemento de 0.25 [mm].

Figura B.4: Mallado en ANSYS Mechanical 2020 R2 de la probeta de aluminio de 4.7 [mm]

Tabla B.3: Numero de nodos y elementos para los distintos largos de los elementos, para el alambre de aluminio de 4.7 [mm].

	Largo de los elementos [mm]			
	1.00	0.75	0.50	0.25
Número de elementos	10,703	21,288	54,419	266,267
Numero de nodos	6,555	13,404	35,074	177,345

De la Figura B.5 se puede concluir que la diferencia entre las leyes de ingeniera obtenidas es muy pequeña, con los valores de esfuerzo variando en un 5 % para una deformación de 0.16[mm/mm], y,

para deformaciones en torno a $0.0962[mm/mm]$ ¹ la variación de esfuerzo es despreciable.

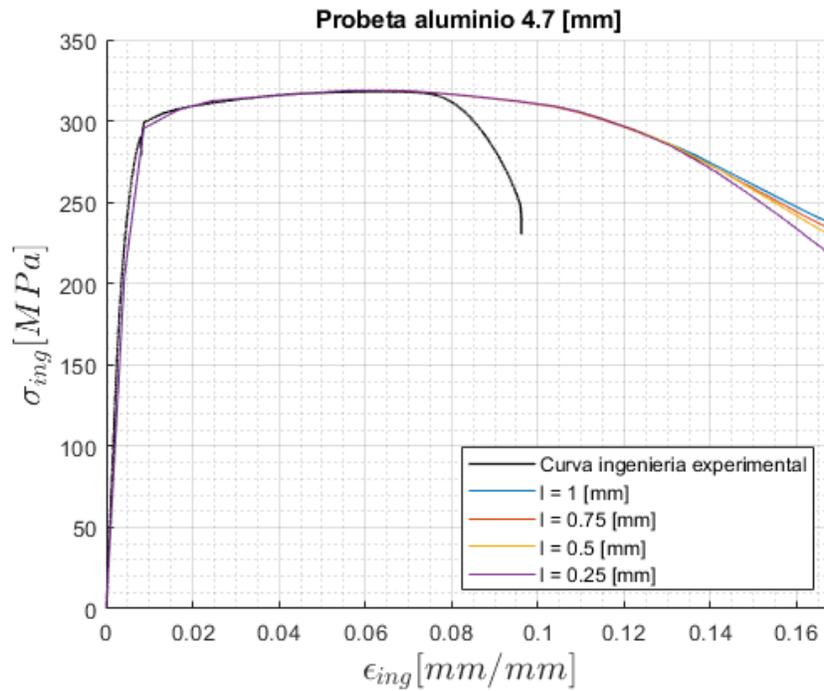


Figura B.5: Análisis de sensibilidad de la probeta de aluminio con 4.7 [mm] de diámetro.

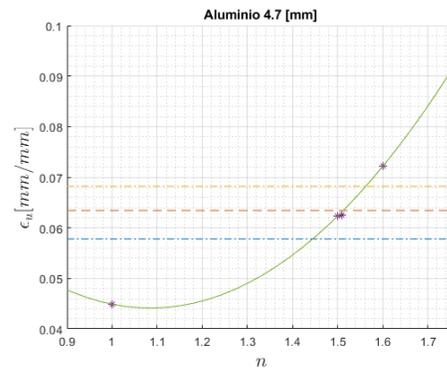
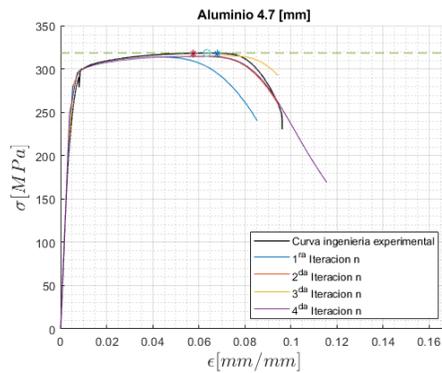
Luego, dado que la ley ingenieril obtenida es de interés solo hasta ϵ_f^{ing} , cualquier tamaño de elemento permitiría modelar el ensayo de tracción, pero, dado que un número muy grande de elementos y nodos conlleva un mayor costo computacional, se selecciona un tamaño de elemento de 0.5[mm], ya que es un valor más conservador, y, no presenta un costo tan alto como la malla con elementos de 0.25[mm], como se muestra en la Tabla B.3.

¹ Valor máximo obtenido de ϵ_f^{ing} para el aluminio de 4.7 [mm], como se muestra en la Tabla A.1.

Anexo C

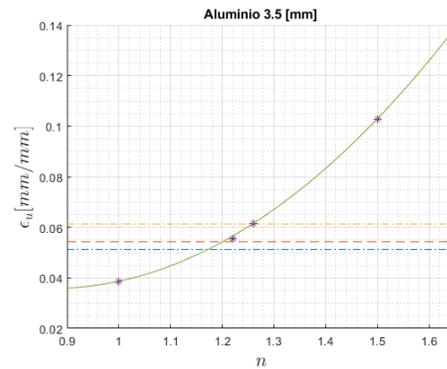
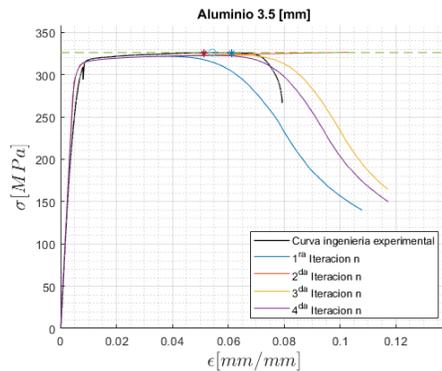
Ajuste ley real

C.1. Primera iteración



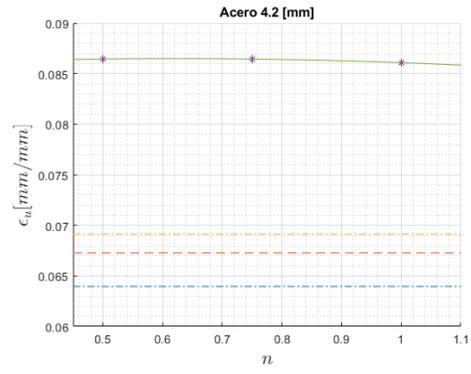
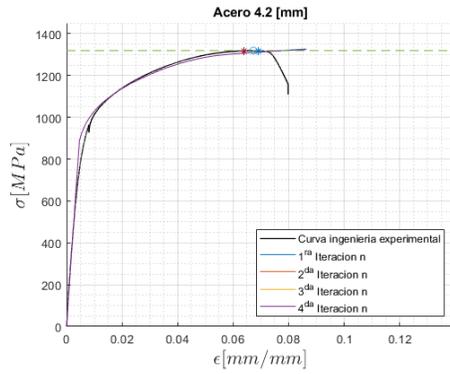
(a) 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 4.7 [mm].

Figura C.1: 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



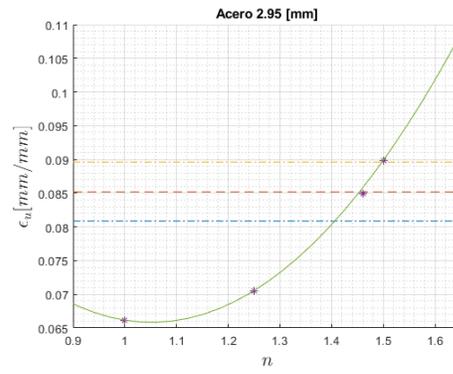
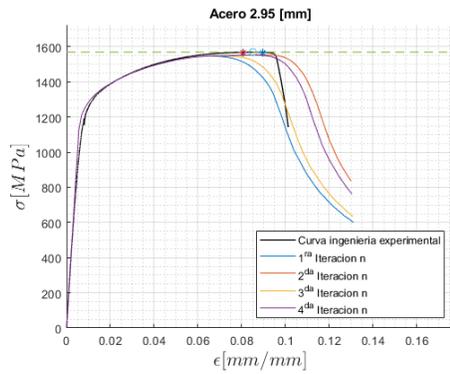
(a) 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 3.5 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 3.5 [mm].

Figura C.2: 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(a) 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 4.2 [mm].

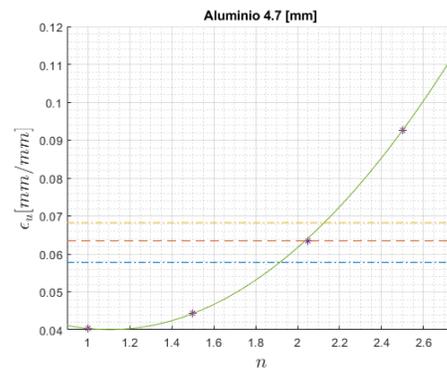
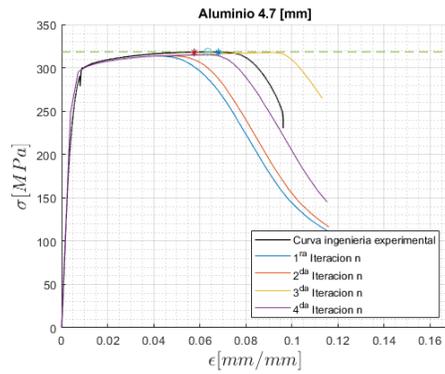
Figura C.3: 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



(a) 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 2.95 [mm].

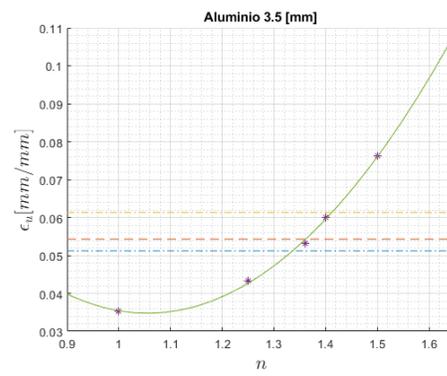
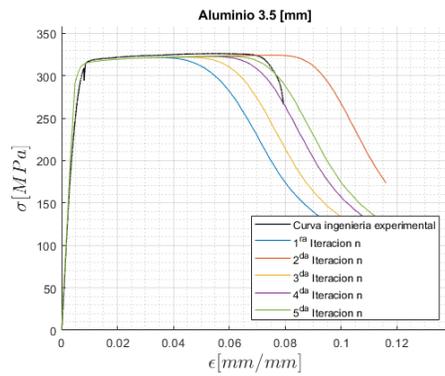
Figura C.4: 1^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

C.2. Segunda iteración



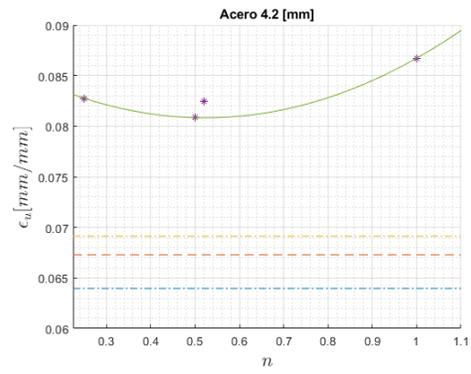
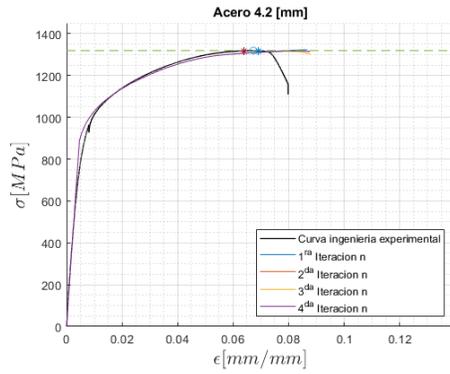
(a) 2^{da} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 4.7 [mm].

Figura C.5: 2^{da} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



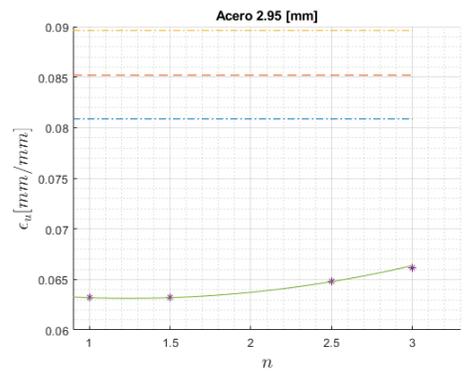
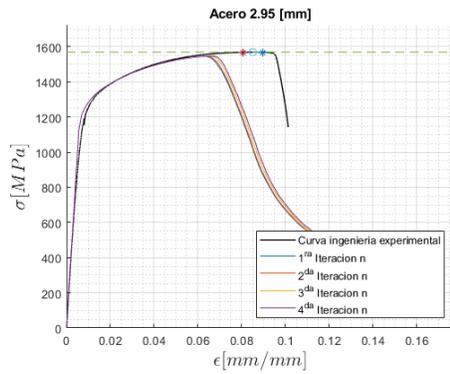
(a) 2^{da} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 3.5 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 3.5 [mm].

Figura C.6: 2^{da} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(a) 2^{da} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 4.2 [mm].

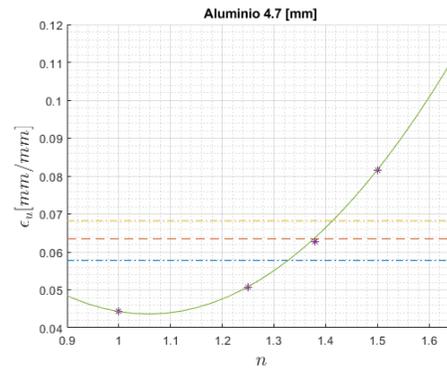
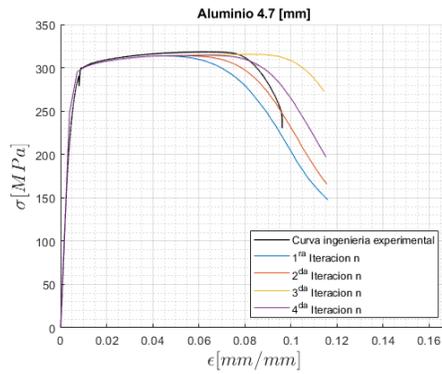
Figura C.7: 2^{da} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



(a) 2^{da} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 2.95 [mm].

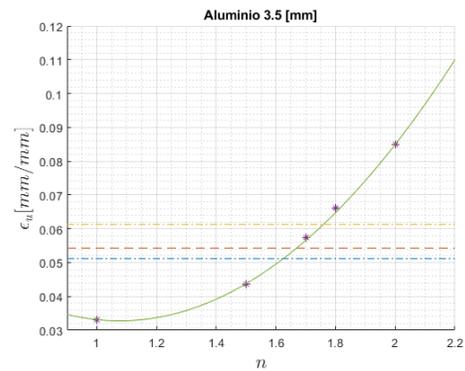
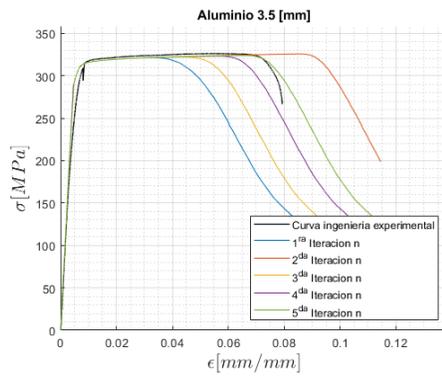
Figura C.8: 2^{da} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

C.3. Tercera iteración



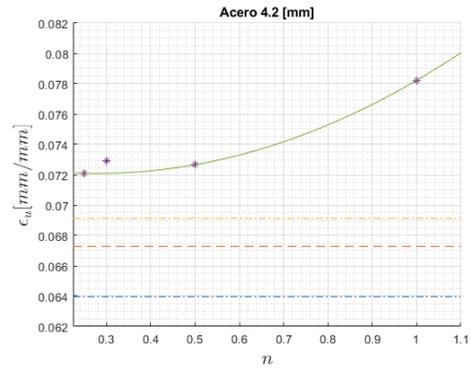
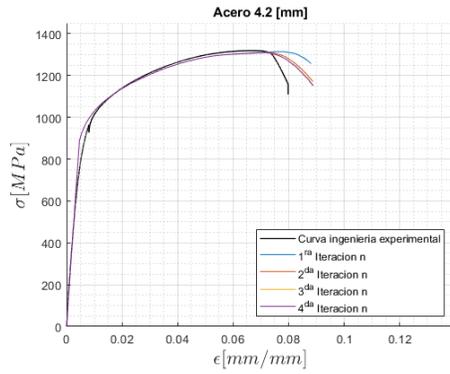
(a) 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 4.7 [mm].

Figura C.9: 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



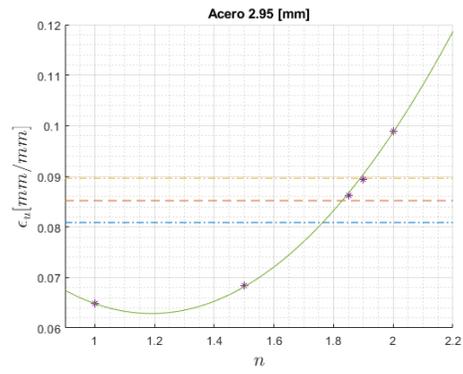
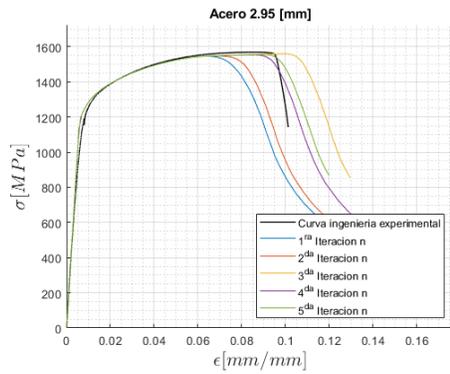
(a) 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 3.5 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 3.5 [mm].

Figura C.10: 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



(a) 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 4.2 [mm].

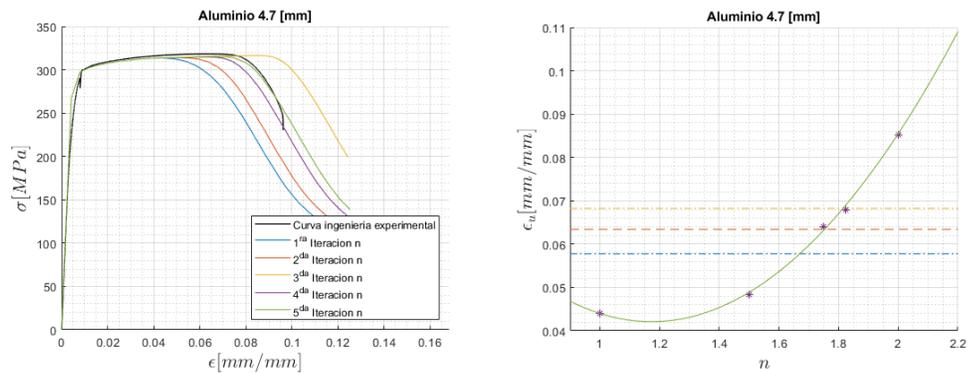
Figura C.11: 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



(a) 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 2.95 [mm].

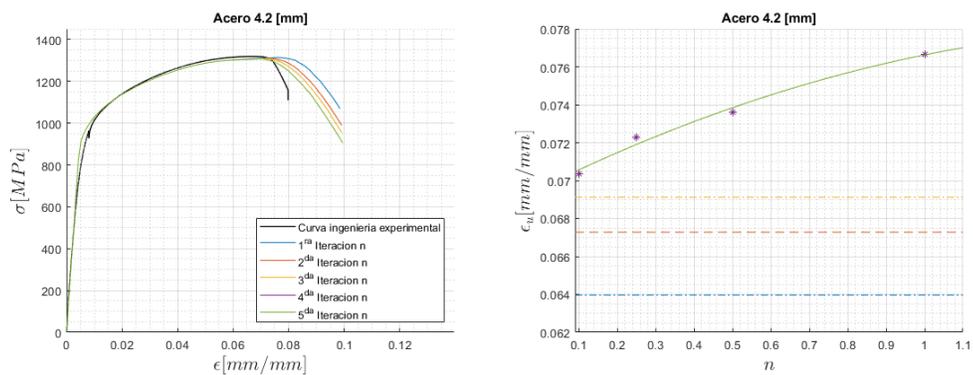
Figura C.12: 3^{ra} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

C.4. Cuarta iteración



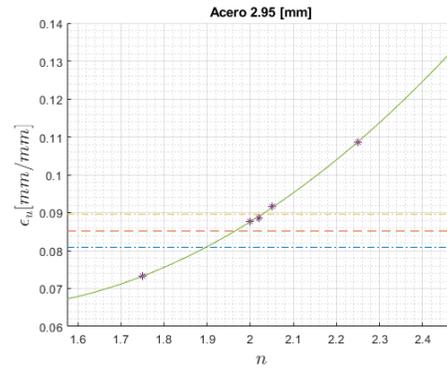
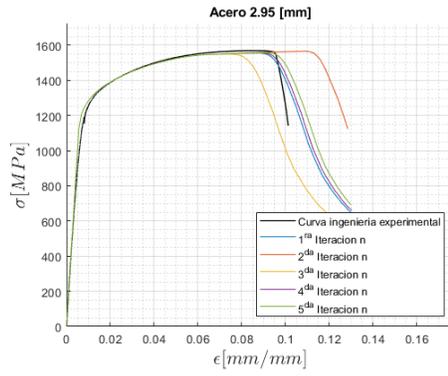
(a) 4^{ta} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de aluminio de 4.7 [mm].

Figura C.13: 4^{ta} iteración de la ley real del alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(a) 4^{ta} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 4.2 [mm].

Figura C.14: 4^{ta} iteración de la ley real del alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



(a) 4^{ta} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm]. (b) Ajuste del valor de n del alambre de acero de 2.95 [mm].

Figura C.15: 4^{ta} iteración de la ley real del alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Anexo D

Códigos ANSYS

D.1. Eliminación de elementos

Código D.1: Código que elimina elementos que hayan superado un valor de deformación establecida[42].

```
1  ! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
2  ! These commands may supersede command settings set by Workbench.
3
4  ! Active UNIT system in Workbench when this object was created: U.S. Customary (in, lbm, lbf, s,
   ↪ V, A)
5  ! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit
   ↪ system.
6  !     See Solving Units in the help system for more information.
7
8  !Failure strain
9  fail_strain=arg1
10 !total number of steps for solve, strain is checked only after each step
11 steps=arg2
12
13 !Find out the final solution time set in Analysis Settings
14 *get,TIME_END,common,,stepcm,,real,2
15 timeinc=TIME_END/steps
16 time,timeinc
17 solve
18
19 *do,ICOUNT,1,steps-1
20
21 !After the solve, go post process strain
22 /post1
23 set,last
24
25 !Limited to Named Selection "killelem"
26 cmsel,s,killelem
27 etable,MYPLAS,eppl,eqv
28 esel,r,etab,MYPLAS,fail_strain,0.5
```

```

29 *get,ECOUNT,elem,,count
30
31 !Create component (Named Selection) of elements that are above failure strain
32 cm,MYELEM %ICOUNT %,elem
33 finish
34 allsel
35
36 !A restart opens the ANSYS restart database (*.rdb) which is written after the first
37 !solve command. Therefore, all the stuff above does not exist in the rdb.
38 !Therefore...
39 !Write out the components to a file so they can be read in for the restart solve
40 cmwrite,temp %ICOUNT %,cm
41 !Write out the parameters to a file so they can be read in for the restart solve
42 parsav
43
44 /solu
45 !Restart... wipes out all of our post processing data that we just obtained
46 antype,,rest
47
48 !Read in the parameters
49 parres,change
50
51 !Read in all components and kill the elements
52 *do,j,1,ICOUNT
53 /gopr
54 /input,temp %j %,cm
55 *GET, exists, COMP, MYELEM %j %, TYPE
56 *if,exists,ne,0,then
57 cmsel,s,MYELEM %j %
58 elist
59 ekill,all
60 *endif
61 *enddo
62
63
64 allsel,all
65 time,timeinc*ICOUNT+timeinc
66 solve
67 finish
68 *enddo

```

Anexo E

Análisis de sensibilidad del MDGTN

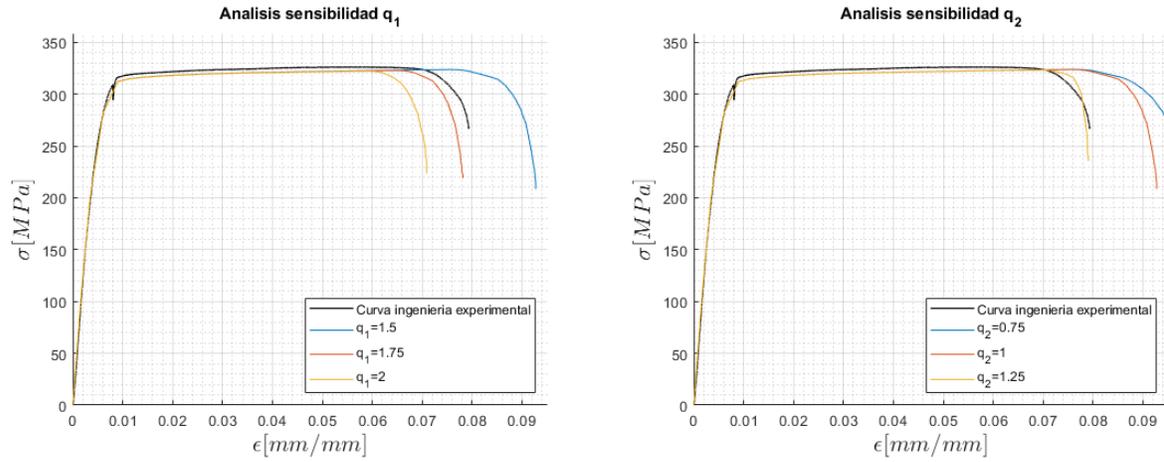
E.1. Análisis de sensibilidad del modelo del MDGTN

Para determinar los parámetros del modelo del MDGTN es necesario realizar una búsqueda iterativa de un conjunto de parámetros que permita obtener como resultado del MEF la ley de ingeniería experimental. Por lo cual, resulta útil determinar cuál es el efecto de los parámetros en la ley de ingeniería del MEF.

Como se muestra en el capítulo 2.5, los parámetros del modelo del MDGTN se pueden agrupar en dos conjuntos, los constitutivos y los del material. Considerando que no existe un conjunto único de parámetros del MDGTN que entreguen una solución, es apropiado considerar el efecto de estos dos conjuntos por separado. Para realizar este análisis se utilizaron los parámetros del MDGTN mostrados en la Tabla 4.2.

E.1.1. Parámetros constitutivos

En las Figuras E.1a y E.1b, se muestra que los parámetros q_1 y q_2 poseen efectos distintos en las leyes de ingeniería obtenidas del MEF, en particular, el parámetro q_1 posee una incidencia directa en el inicio del reblandecimiento y q_2 posee mayor efecto en la pendiente de reblandecimiento.

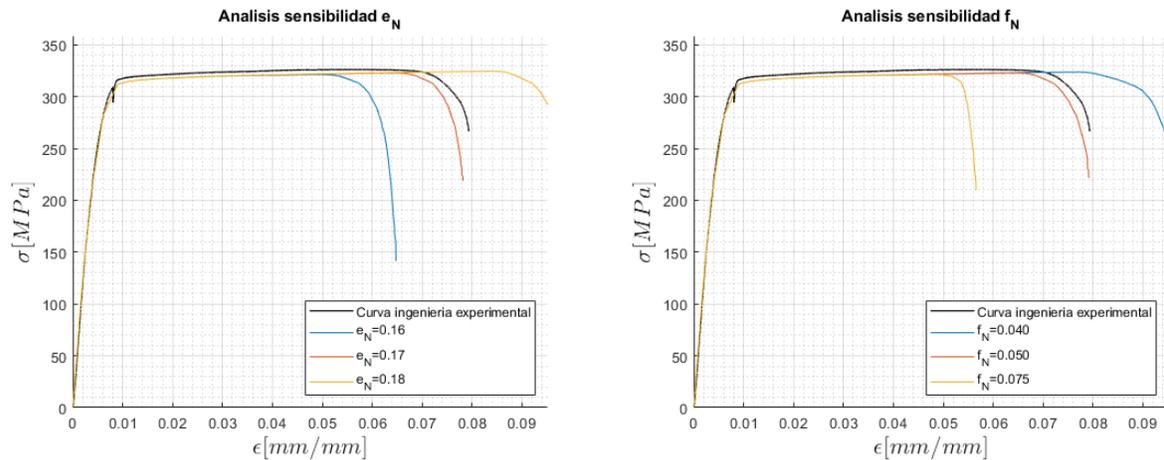


(a) Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN para el parámetro q_1 . (b) Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN para el parámetro q_2 .

Figura E.1: Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN en función de los parámetros constitutivos, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

E.1.2. Parámetros del material

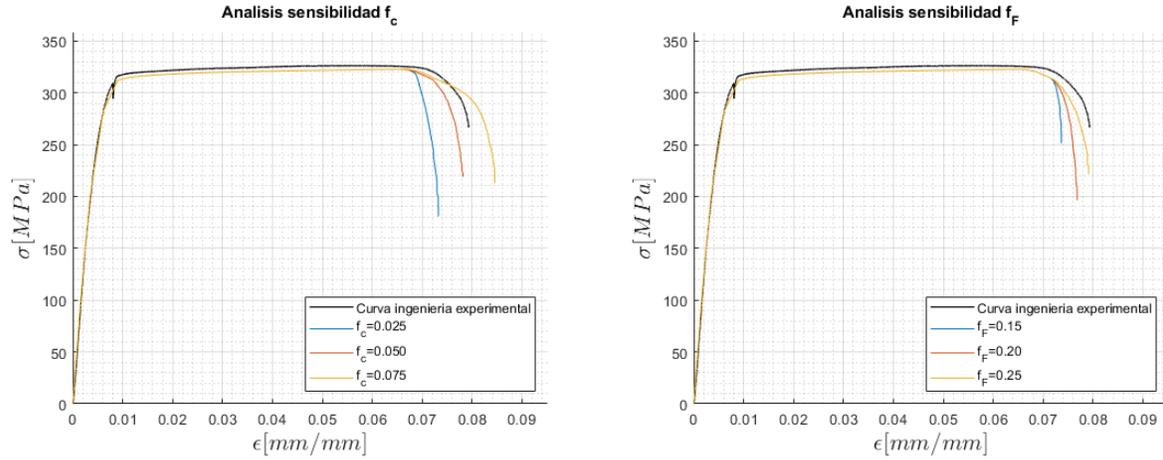
En las Figuras E.2a y E.2b se puede observar que e_N posee un efecto en el inicio del reblandecimiento y f_N posee un efecto en el inicio y en la pendiente de reblandecimiento. Ambos parámetros caracterizan la nucleación en la evolución de la porosidad en el modelo del MDGTN.



(a) Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN para el parámetro e_N . (b) Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN para el parámetro f_N .

Figura E.2: Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN en función de los parámetros del material que controlan la nucleación, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

En las Figuras E.3a y E.3b se muestra el efecto de los parámetros del material f_C y f_F , donde f_C posee un efecto en la pendiente de reblandecimiento, al igual que el parámetro f_F . Los parámetros f_C y f_F caracterizan la coalescencia de microporos del modelo.



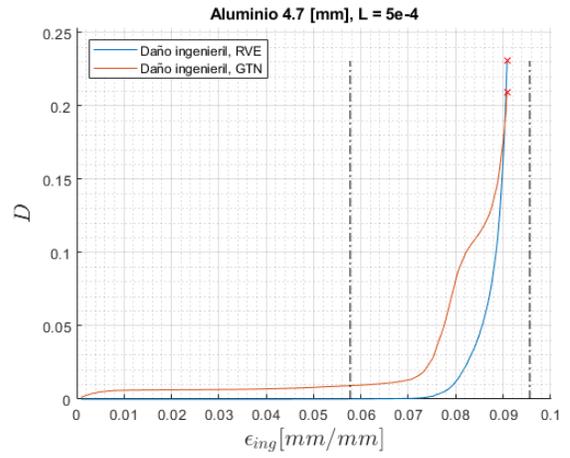
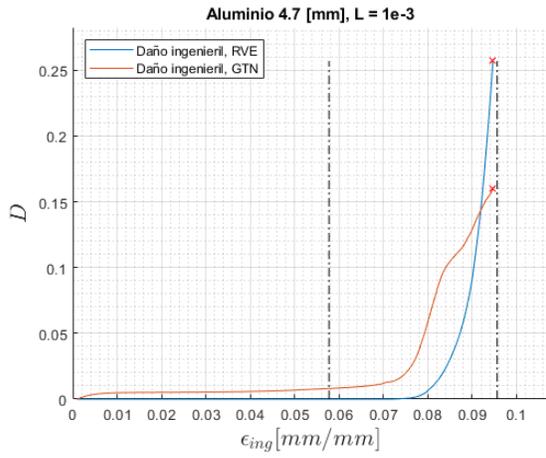
(a) Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del **MDGTN** para el parámetro f_c . (b) Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del **MDGTN** para el parámetro f_F .

Figura E.3: Análisis de sensibilidad de la ley de ingeniería con daño del modelo del **MDGTN** en función los parámetros del material que controlan la coalescencia, para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

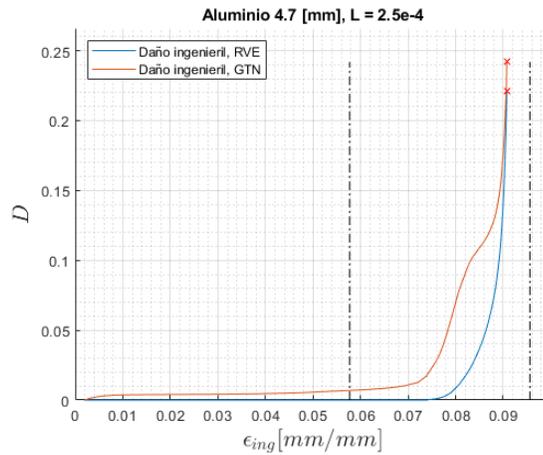
E.1.3. Tamaño de los elementos

Es necesario determinar el tamaño de los elementos que entregue un valor de daño estable para el **MEF** con los parámetros del **MDGTN**. En las Figuras E.4a, E.4b y E.4c, se muestra la evolución del daño obtenida para tres tamaños de elementos, en las cuales se grafican dos leyes de daño, una utilizando el método del **RVE** (Capítulo 2.4) y otra con la expresión de daño del modelo del **MDGTN** (Ecuación 2.53), ambas obtenidas del **MEF** con el modelo del **MDGTN**.

En las Figuras E.4a, E.4b y E.4c se puede notar que el daño estimado por el **RVE** se mantiene constante para los tamaños de elementos, y que el daño estimado por el modelo del **MDGTN** tiende al daño estimado por el **RVE** cuando se disminuye el tamaño de los elementos. Por lo cual se selecciona un tamaño de elementos de 0.5 [mm], que entrega una solución más estable para los dos métodos de estimación del daño.



(a) Daño del modelo del MDGTN, para elementos de 1 (b) Daño del modelo del MDGTN, para elementos de 0.5 [mm].



(c) Daño del modelo del MDGTN, para elementos de 0.25 [mm].

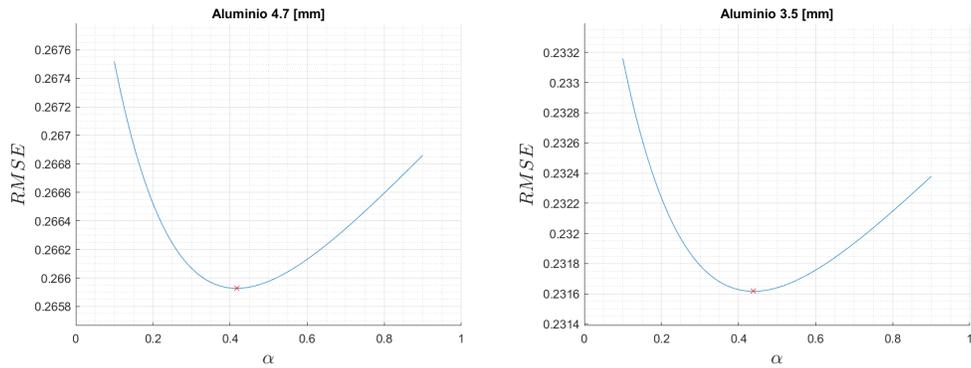
Figura E.4: Análisis de sensibilidad al tamaño del elemento de la ley de ingeniería con daño del modelo del MDGTN.

Anexo F

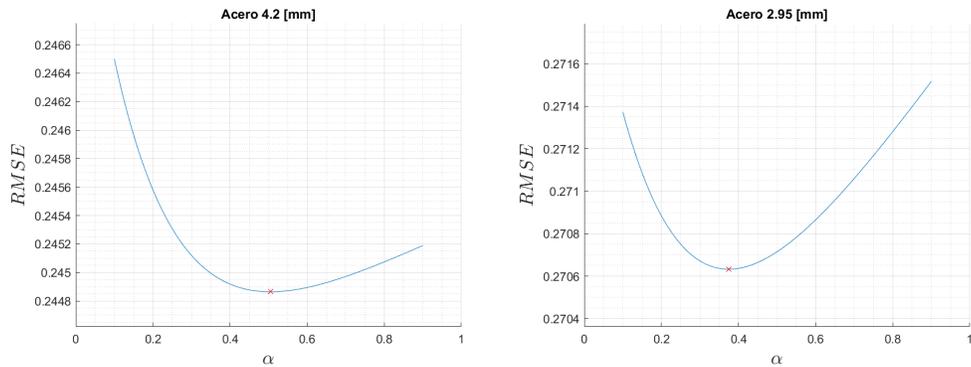
Ajuste MDB

F.1. Ajuste de α

F.1.1. Parámetros constitutivos

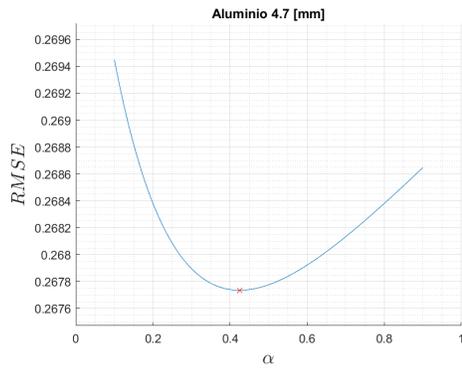


(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

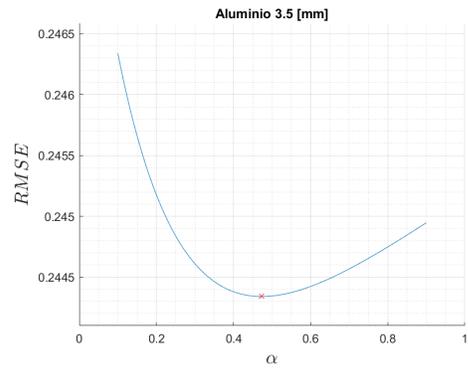


(c) Ajuste para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

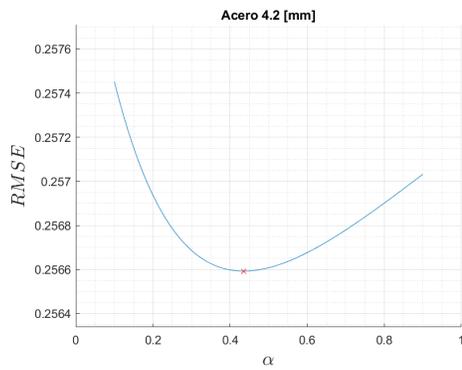
Figura F.1: Ajuste del parámetro α del **MDB** del ajuste de los parámetros constitutivos del **MDGTN**, con la ley sin daño superior.



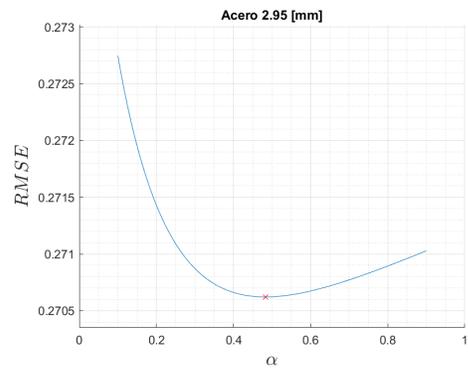
(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



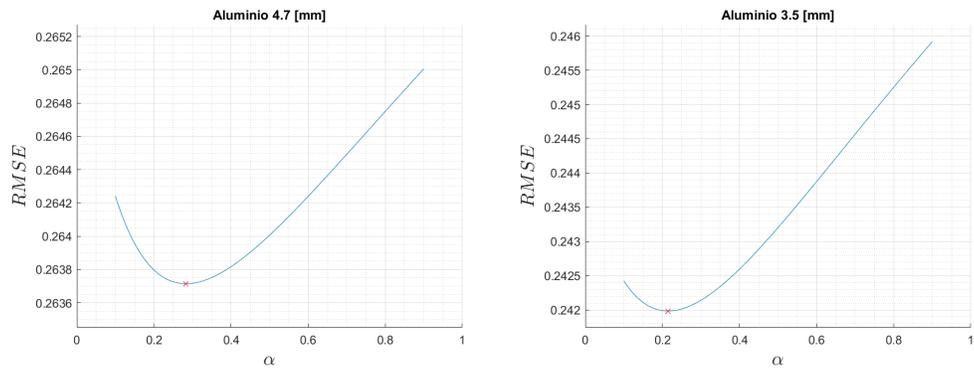
(c) Ajuste para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



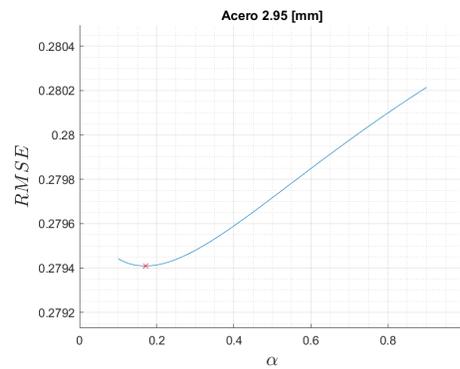
(d) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura F.2: Ajuste del parámetro α del **MDB** del ajuste de los parámetros constitutivos del **MDGTN**, con la ley sin daño inferior.

F.1.2. Parámetros del material

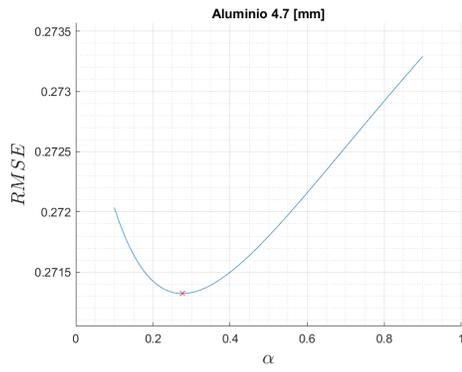


(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

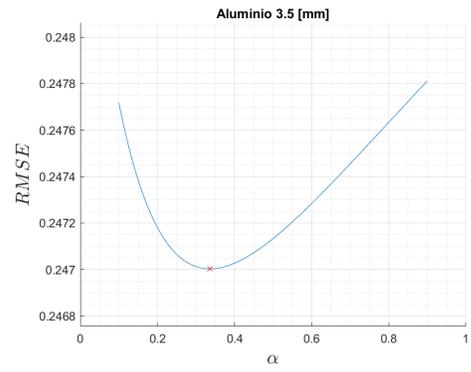


(c) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

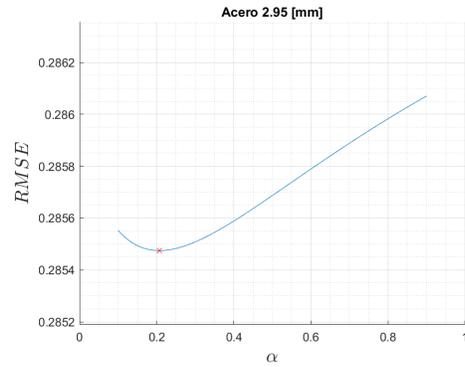
Figura F.3: Ajuste del parámetro α del **MDB** del ajuste de los parámetros del material del **MDGTN**, con la ley sin daño superior.



(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

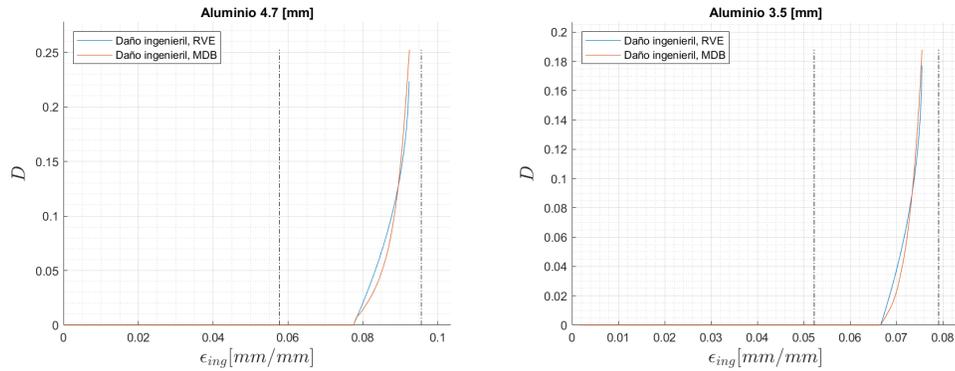


(c) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

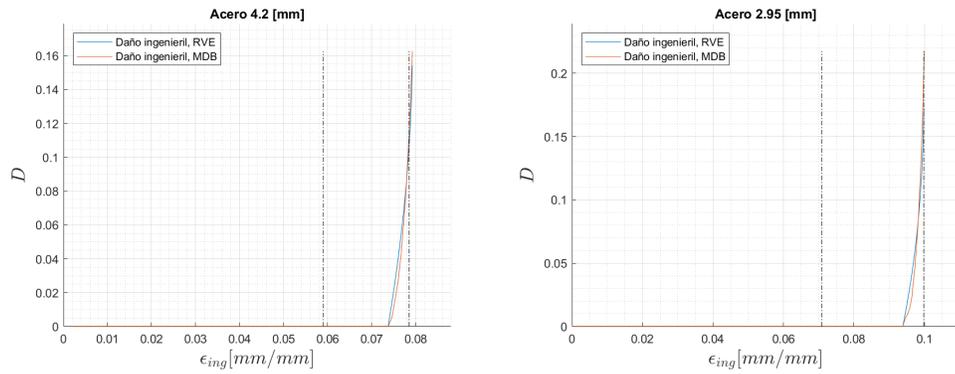
Figura F.4: Ajuste del parámetro α del **MDB** del ajuste de los parámetros del material del **MDGTN**, con la ley sin daño inferior.

F.2. Ajuste de la ley de daño ingenieril

F.2.1. Parámetros constitutivos

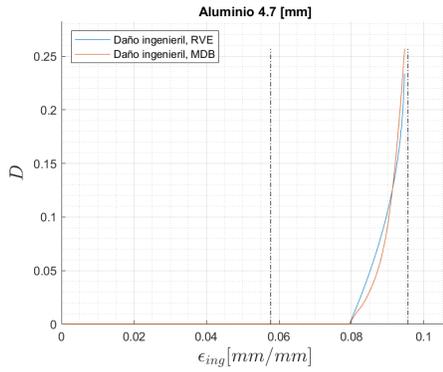


(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

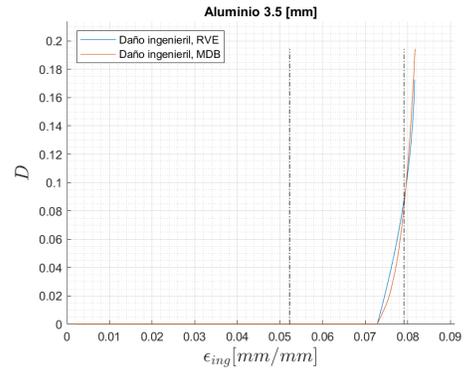


(c) Ajuste para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro. (d) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

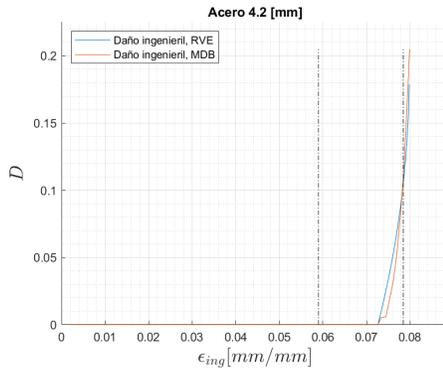
Figura F.5: Ley de daño ingenieril del modelo del MDGTN, ajustando los parámetros constitutivos, utilizando la ley sin daño superior y ajustada con la ley de daño de Bonora[37].



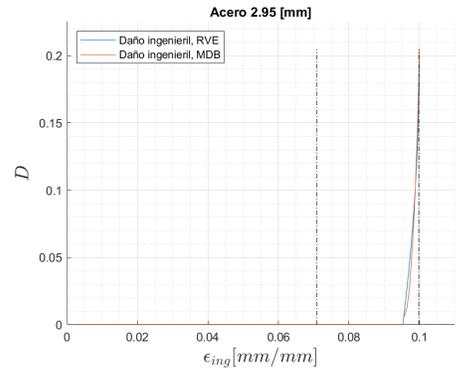
(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



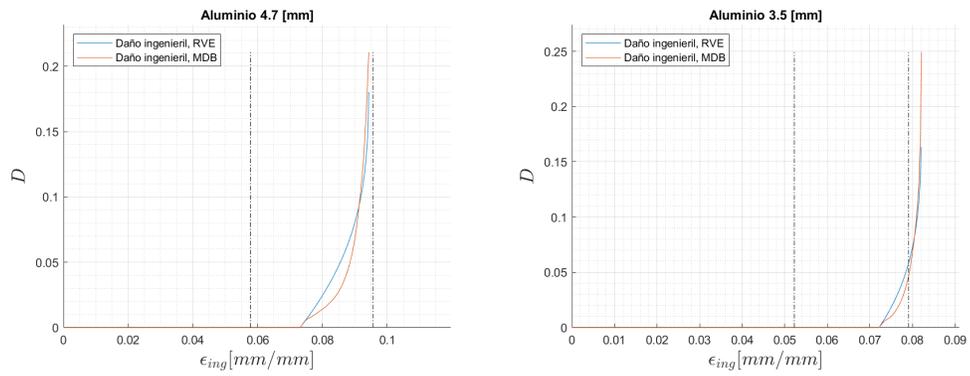
(c) Ajuste para el alambre de acero de 4.2 [mm] de diámetro.



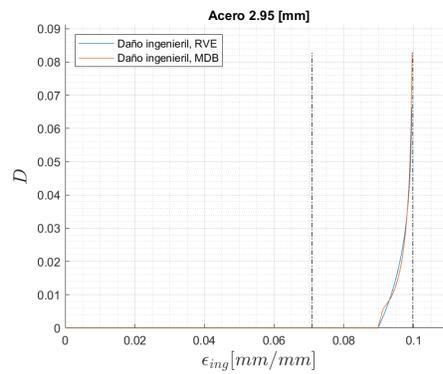
(d) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura F.6: Ley de daño ingenieril del modelo del **MDGTN**, ajustando los parámetros constitutivos, utilizando la ley sin daño inferior y ajustada con la ley de daño de Bonora[37].

F.2.2. Parámetros del material

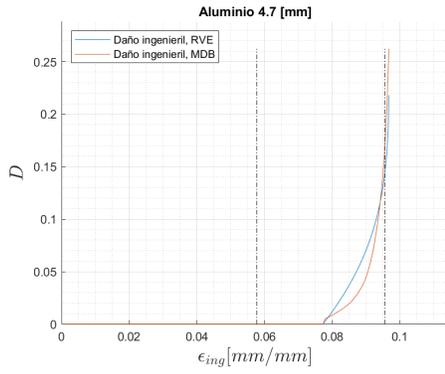


(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro. (b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.

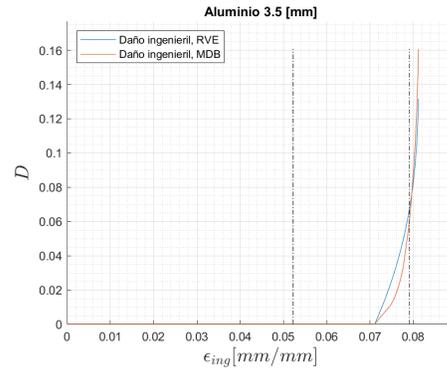


(c) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

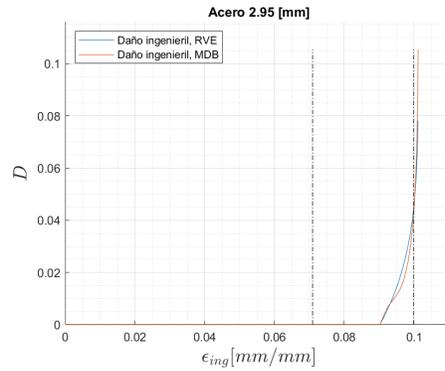
Figura F.7: Ley de daño ingenieril del modelo del **MDGTN**, ajustando los parámetros del material, utilizando la ley sin daño superior y ajustada con la ley de daño de Bonora[37].



(a) Ajuste para el alambre de aluminio de 4.7 [mm] de diámetro.



(b) Ajuste para el alambre de aluminio de 3.5 [mm] de diámetro.



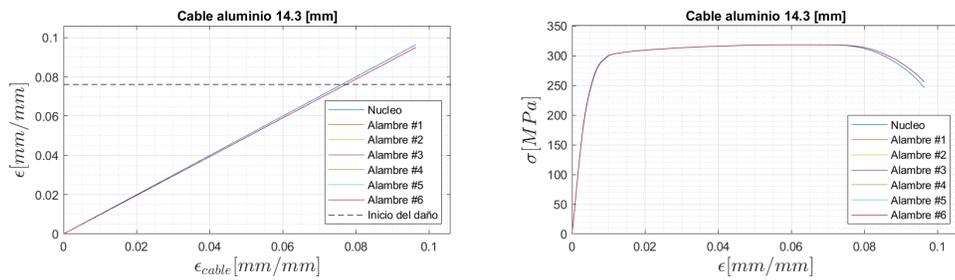
(c) Ajuste para el alambre de acero de 2.95 [mm] de diámetro.

Figura F.8: Ley de daño ingenieril del modelo del **MDGTN**, ajustando los parámetros del material, utilizando la ley sin daño inferior y ajustada con la ley de daño de Bonora[37].

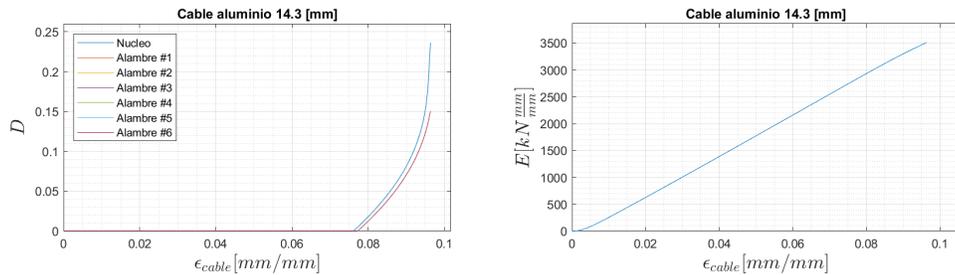
Anexo G

Evolución del daño en cables

G.1. Cable de aluminio de 14.3 [mm]

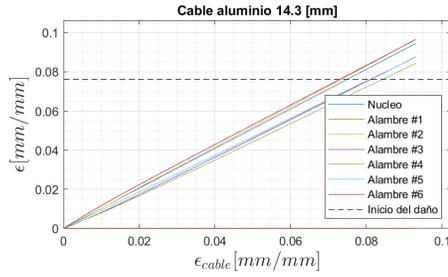


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

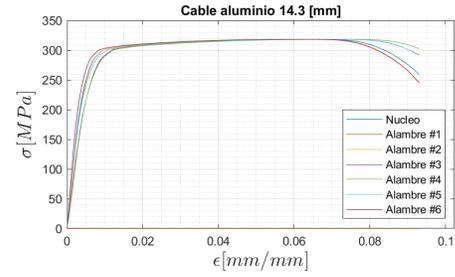


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

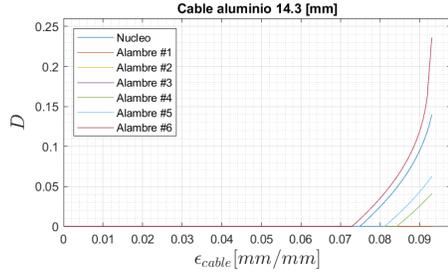
Figura G.1: Cable inicialmente sin daño.



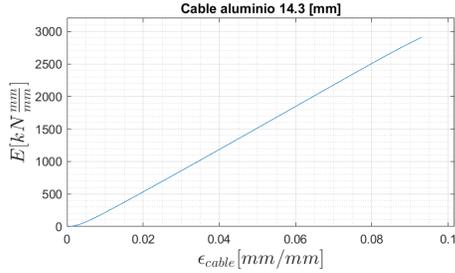
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

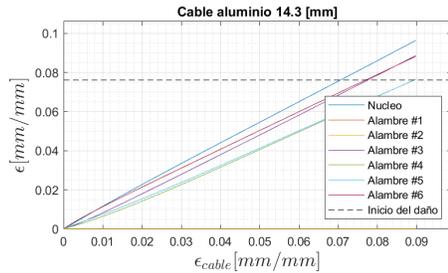


(c) Daño de los alambres versus la deformación

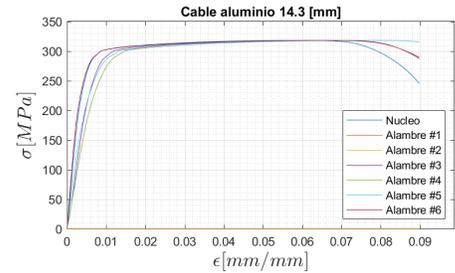


(d) Energía versus la deformación del cable de

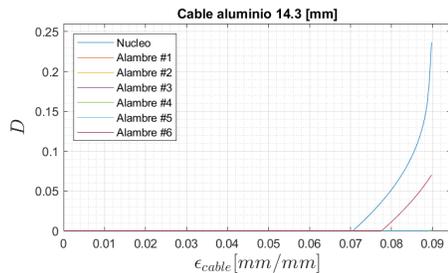
Figura G.2: Cable con un alambre cortado.



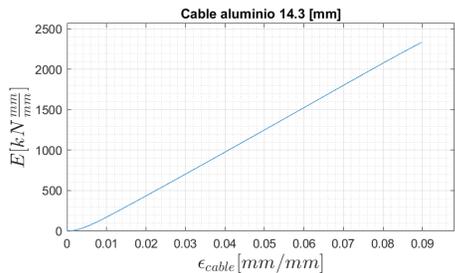
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

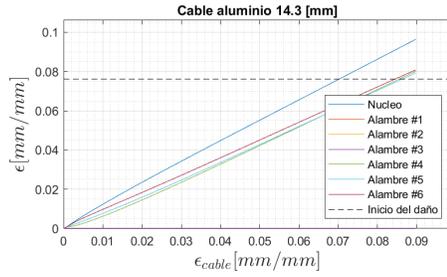


(c) Daño de los alambres versus la deformación

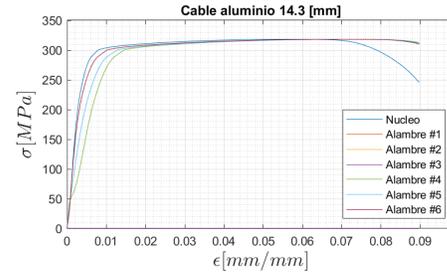


(d) Energía versus la deformación del cable de

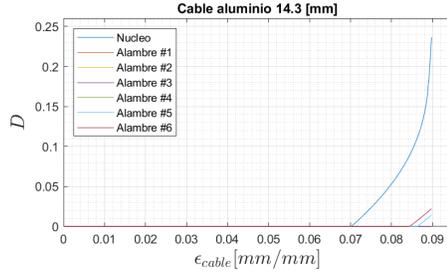
Figura G.3: Cable con dos alambres cortados.



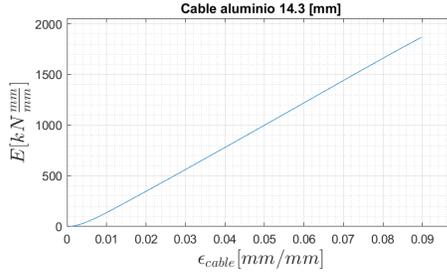
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

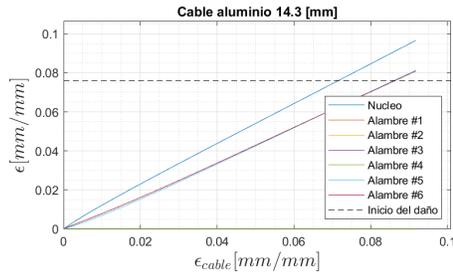


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

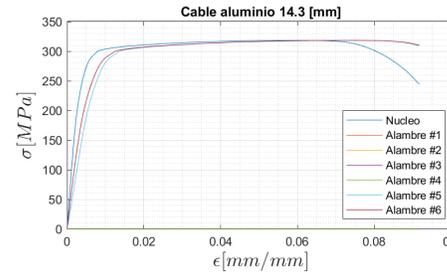


(d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

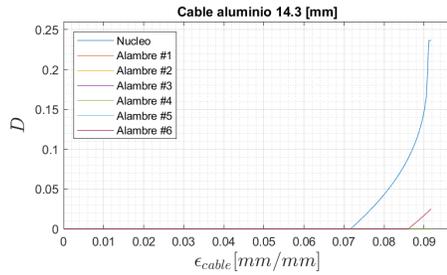
Figura G.4: Cable tres alambres cortados.



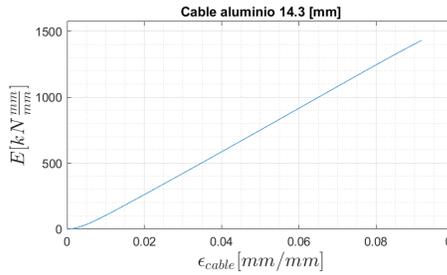
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

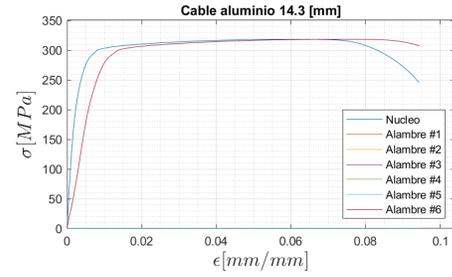
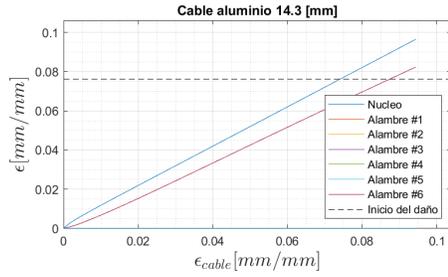


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

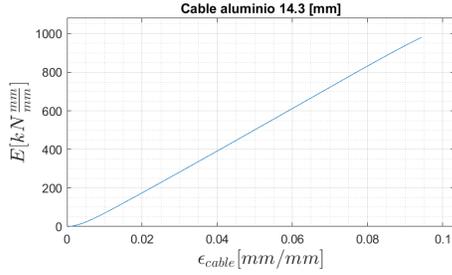
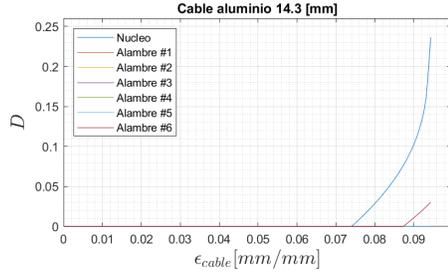


(d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

Figura G.5: Cable con cuatro alambres cortados.



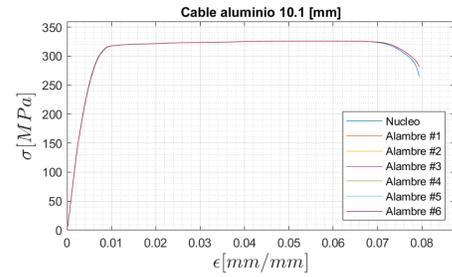
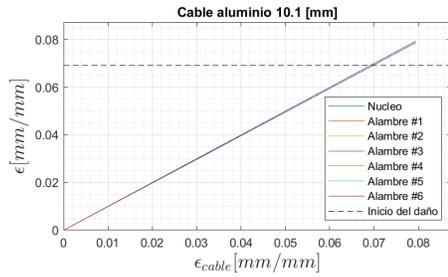
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].



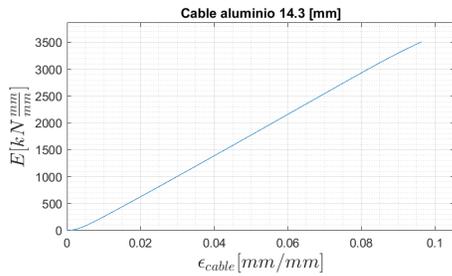
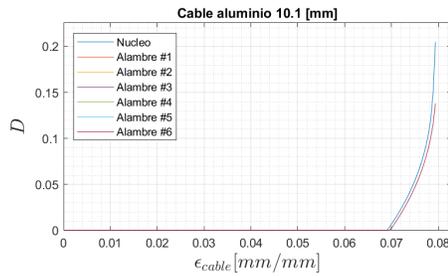
(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

Figura G.6: Cable con cinco alambres cortados.

G.2. Cable de aluminio de 10.1 [mm]

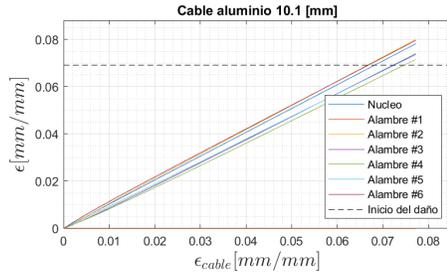


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

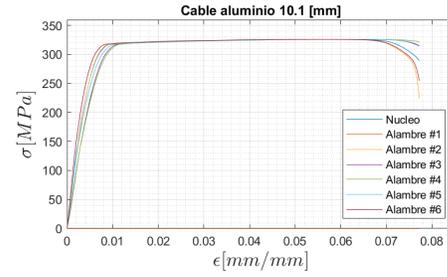


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

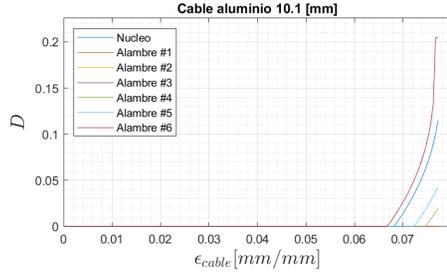
Figura G.7: Cable inicialmente sin daño.



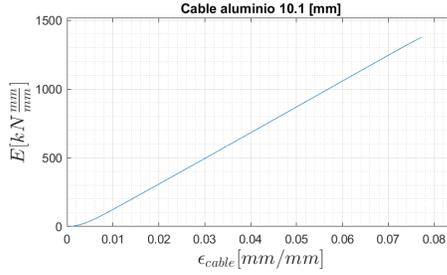
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

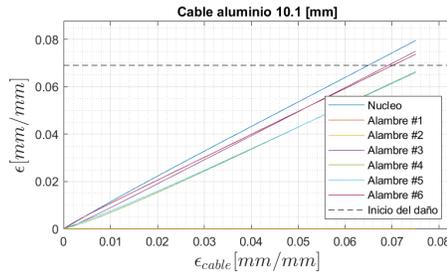


(c) Daño de los alambres versus la deformación

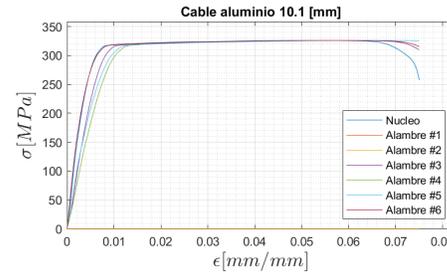


(d) Energía versus la deformación del cable de

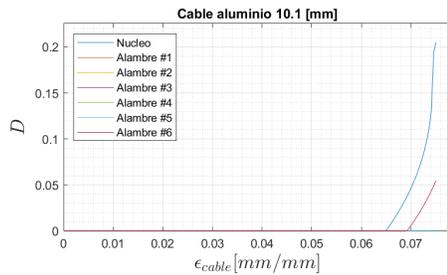
Figura G.8: Cable con un alambre cortado.



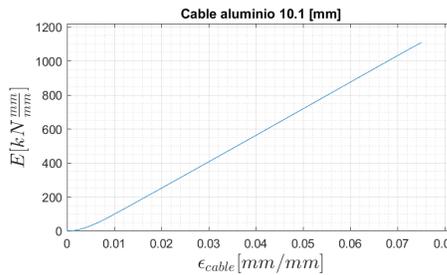
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

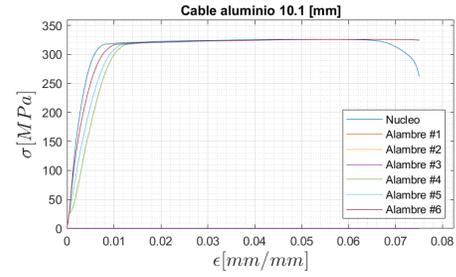
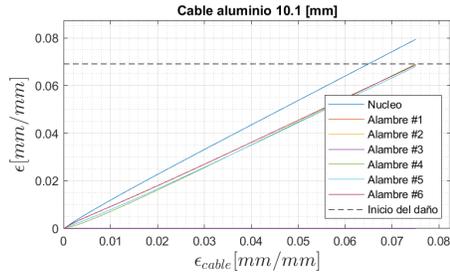


(c) Daño de los alambres versus la deformación

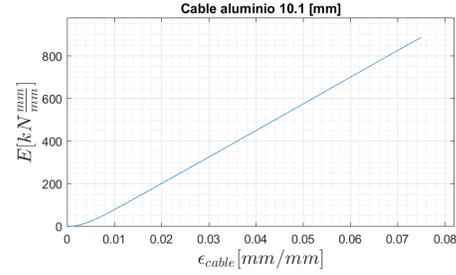
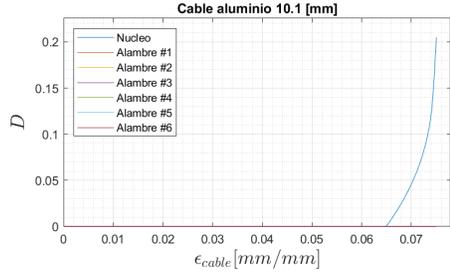


(d) Energía versus la deformación del cable de

Figura G.9: Cable con dos alambres cortados.

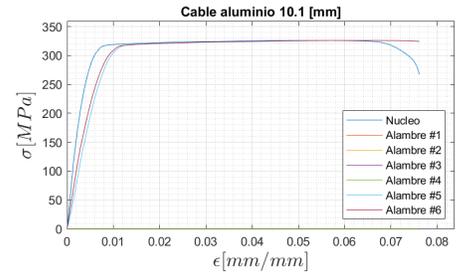
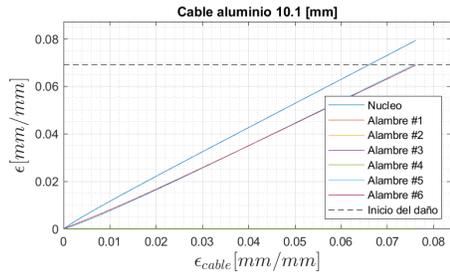


(a) Deformación de los alambres versus la de- (b) Esfuerzo de los alambres versus la de-
formación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. mación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

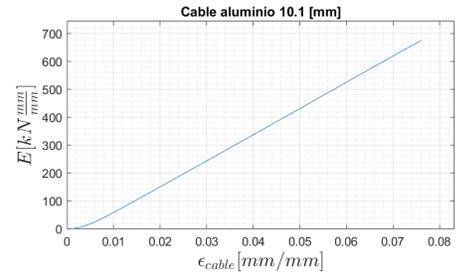
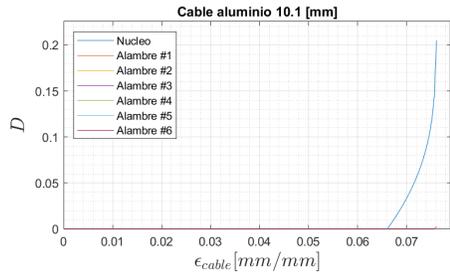


(c) Daño de los alambres versus la deformación (d) Energía versus la deformación del cable de
del cable de aluminio de 10.1 [mm]. aluminio de 10.1 [mm].

Figura G.10: Cable tres alambres cortados.

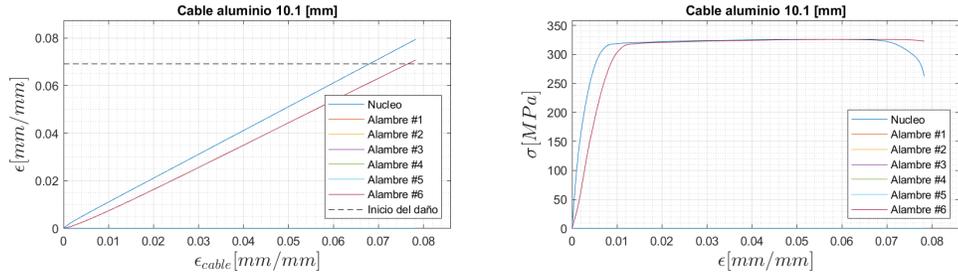


(a) Deformación de los alambres versus la de- (b) Esfuerzo de los alambres versus la de-
formación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. mación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

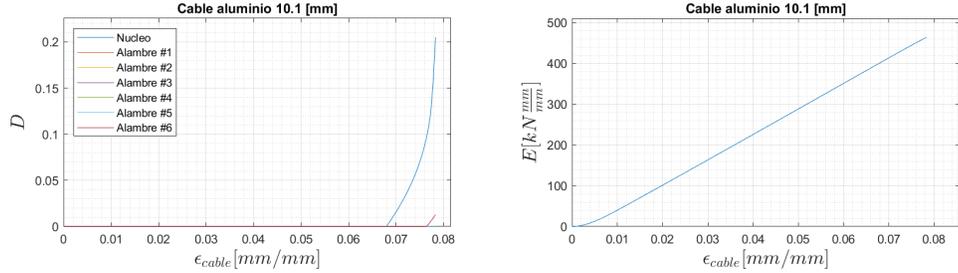


(c) Daño de los alambres versus la deformación (d) Energía versus la deformación del cable de
del cable de aluminio de 10.1 [mm]. aluminio de 10.1 [mm].

Figura G.11: Cable con cuatro alambres cortados.



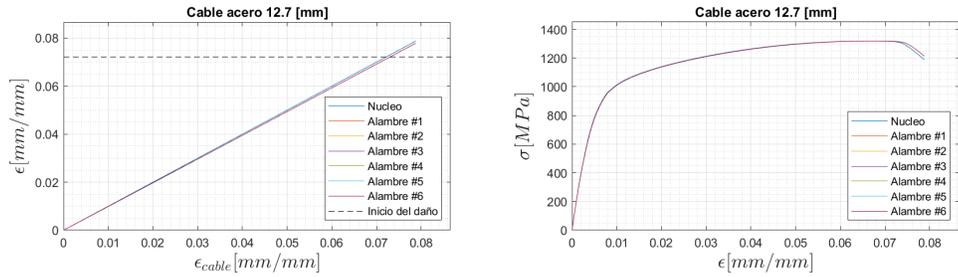
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].



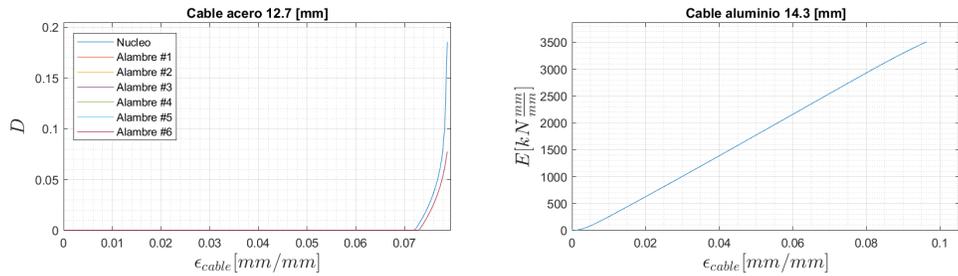
(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

Figura G.12: Cable con cinco alambres cortados.

G.3. Cable de acero de 12.7 [mm]

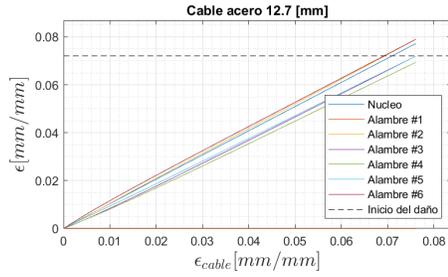


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

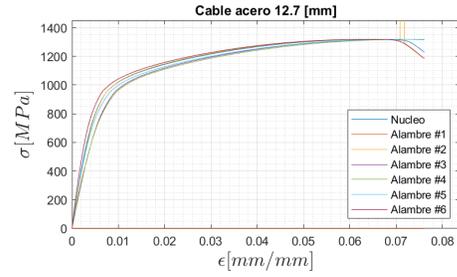


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

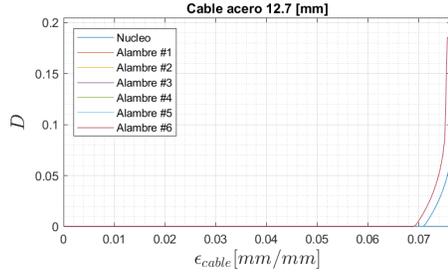
Figura G.13: Cable inicialmente sin daño.



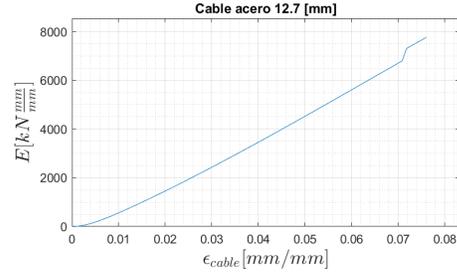
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

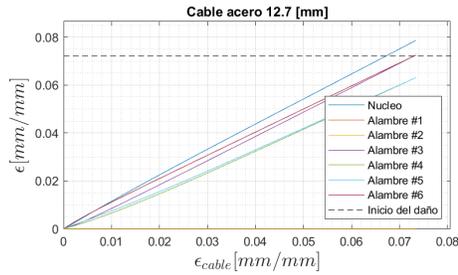


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

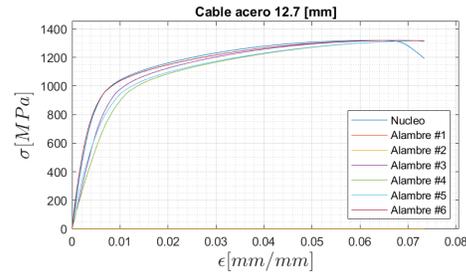


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

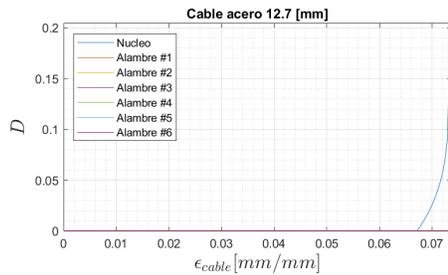
Figura G.14: Cable con un alambre cortado.



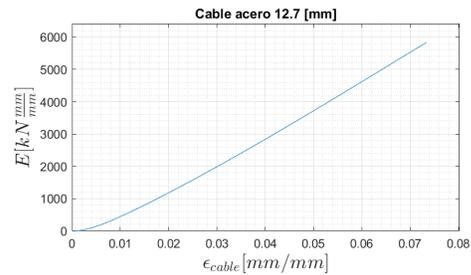
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

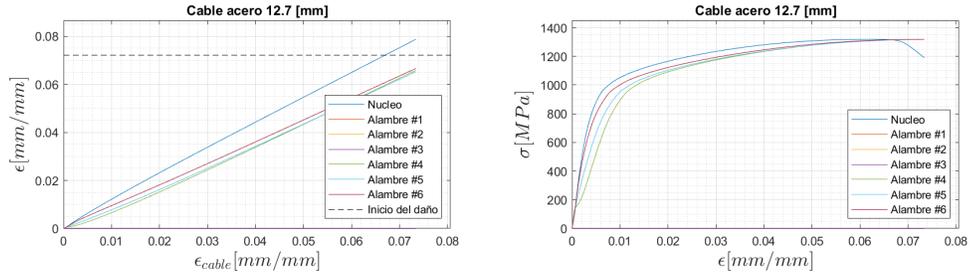


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

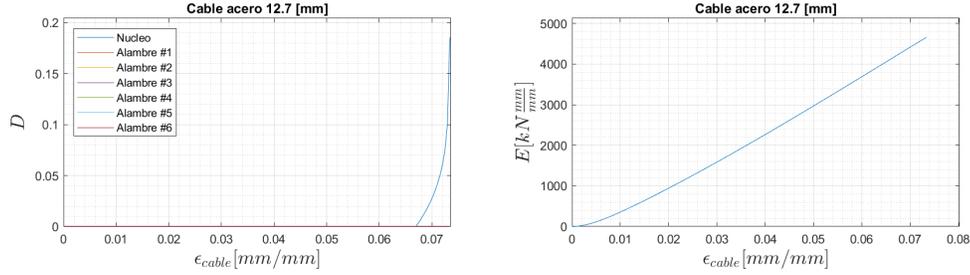


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

Figura G.15: Cable con dos alambres cortados.

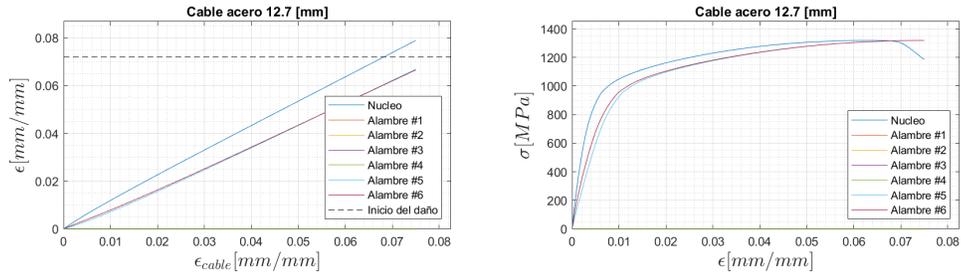


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

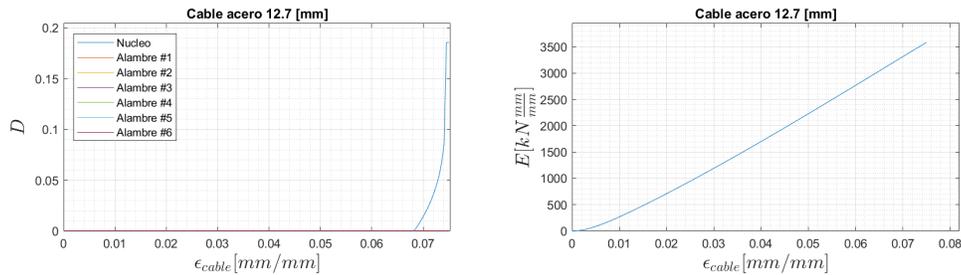


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

Figura G.16: Cable tres alambres cortados.

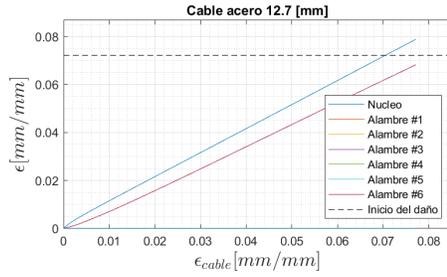


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

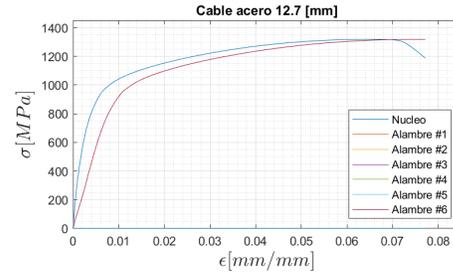


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

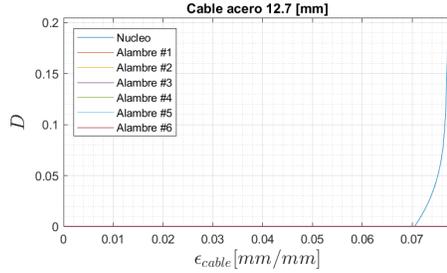
Figura G.17: Cable con cuatro alambres cortados.



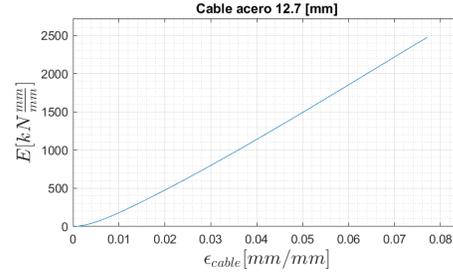
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



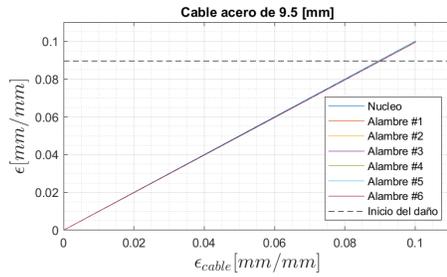
(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



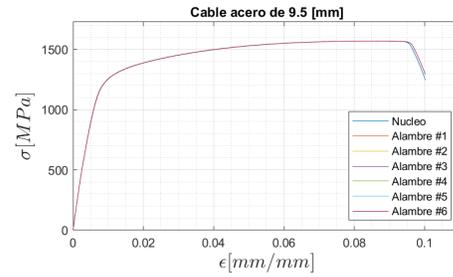
(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

Figura G.18: Cable con cinco alambres cortados.

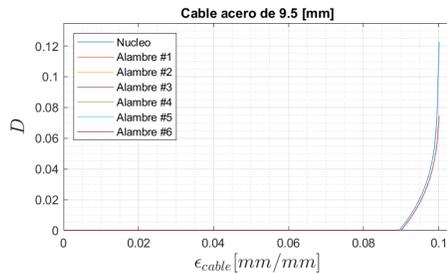
G.4. Cable de acero de 9.5 [mm]



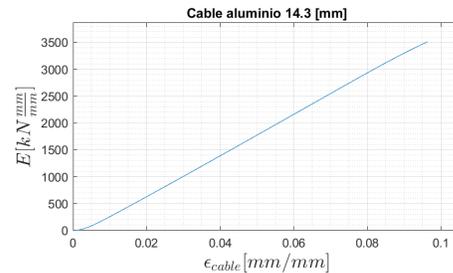
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

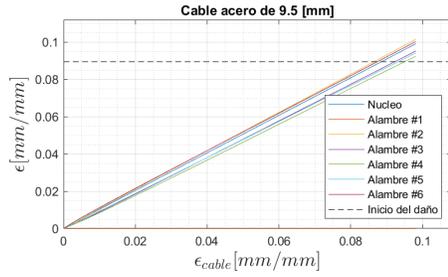


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

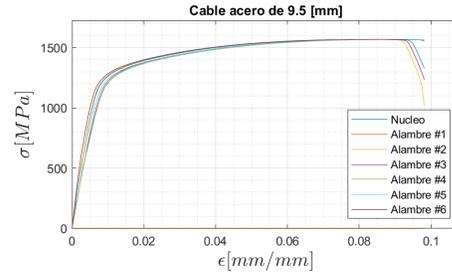


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

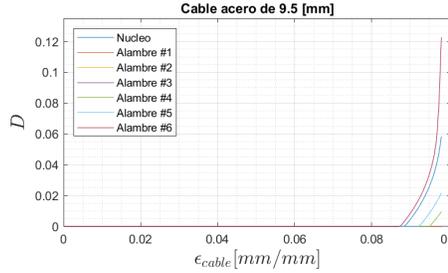
Figura G.19: Cable inicialmente sin daño.



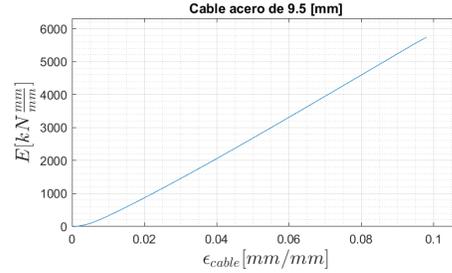
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

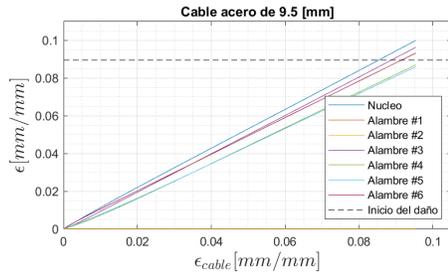


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

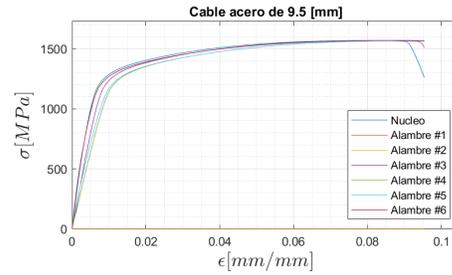


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

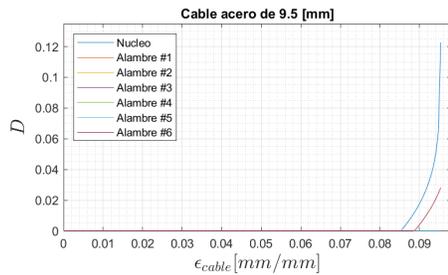
Figura G.20: Cable con un alambre cortado.



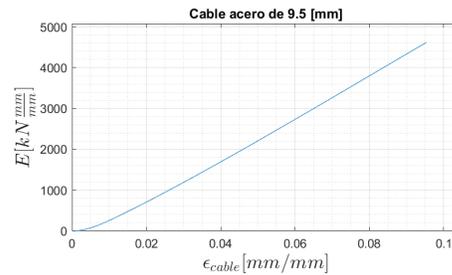
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

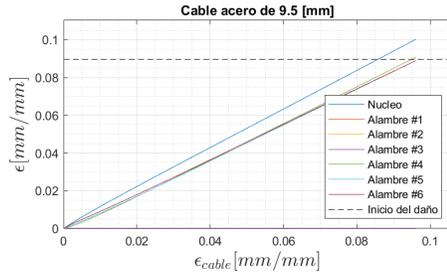


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

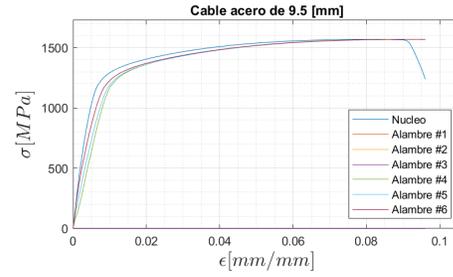


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

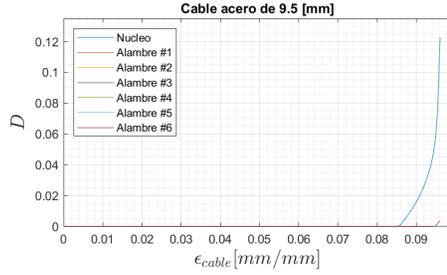
Figura G.21: Cable con dos alambres cortados.



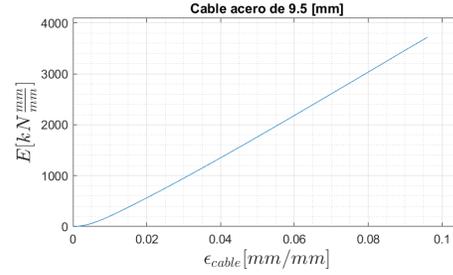
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

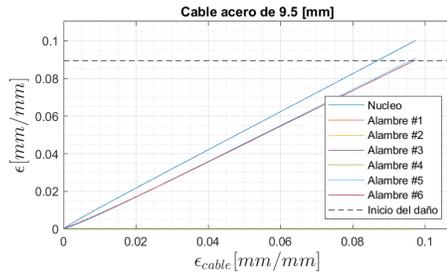


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

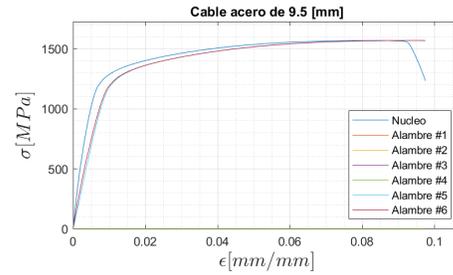


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

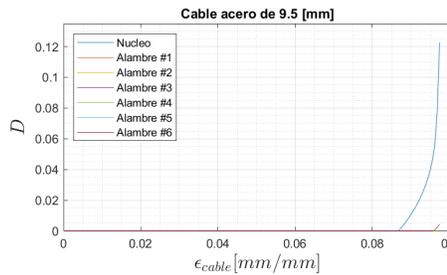
Figura G.22: Cable tres alambres cortados.



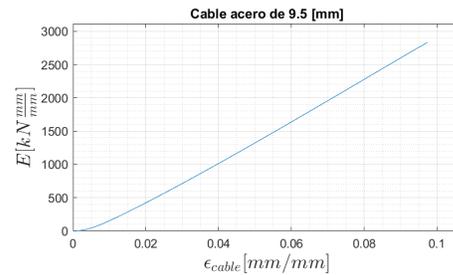
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

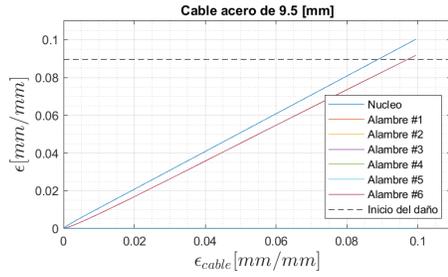


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

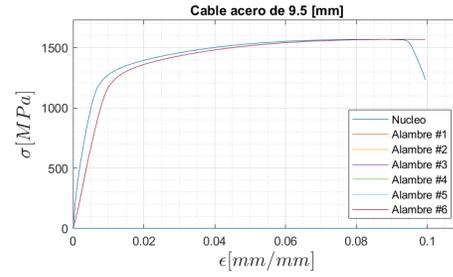


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

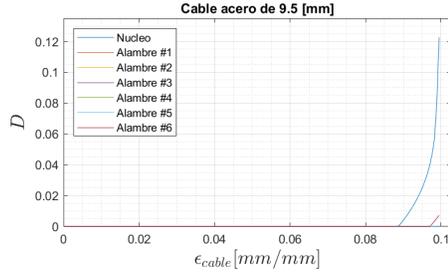
Figura G.23: Cable con cuatro alambres cortados.



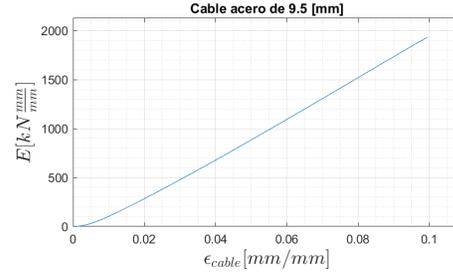
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



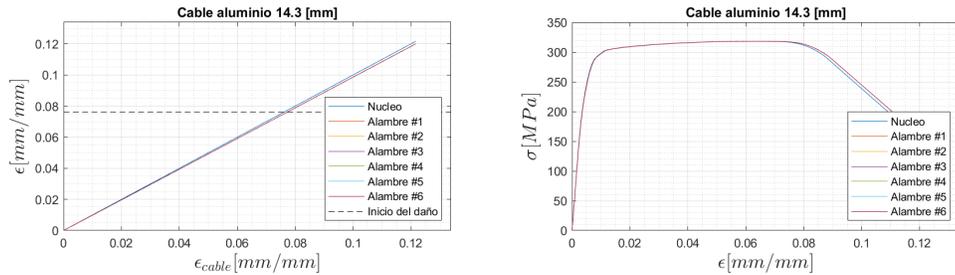
(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

Figura G.24: Cable con cinco alambres cortados.

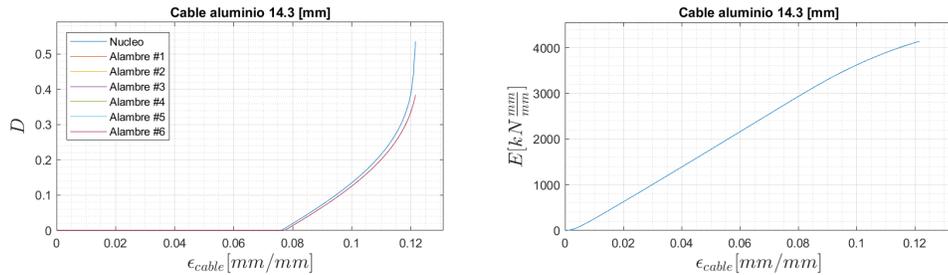
Anexo H

Evolución del daño en cables con el MDEL

H.1. Cable de aluminio de 14.3 [mm]

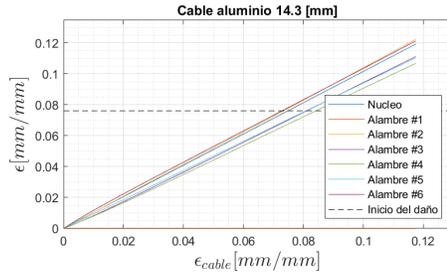


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

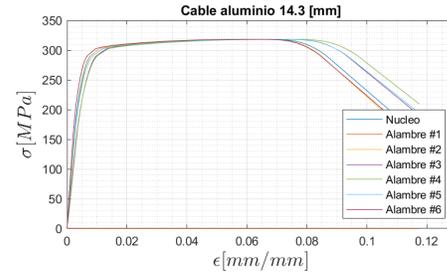


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

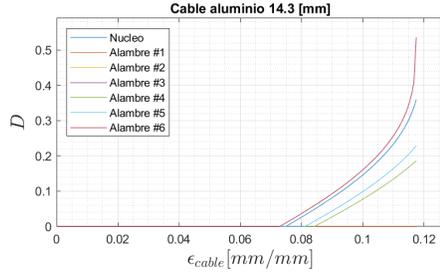
Figura H.1: Cable inicialmente sin daño.



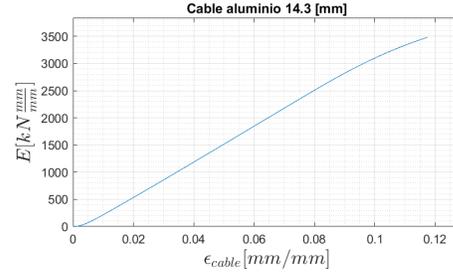
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

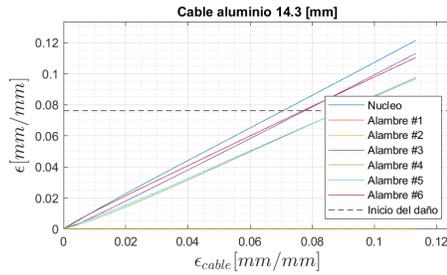


(c) Daño de los alambres versus la deformación

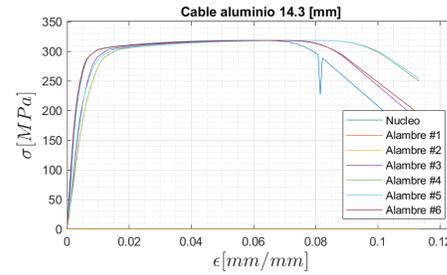


(d) Energía versus la deformación del cable de

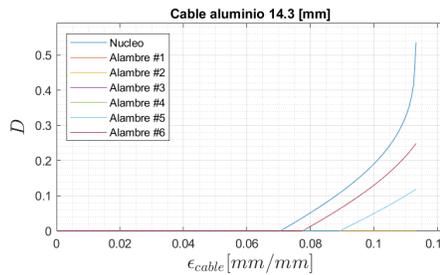
Figura H.2: Cable con un alambre cortado.



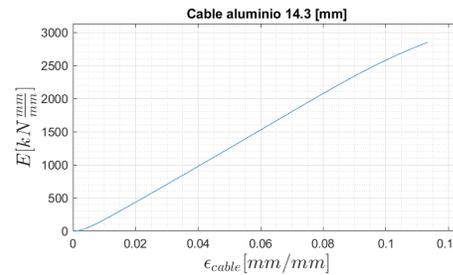
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

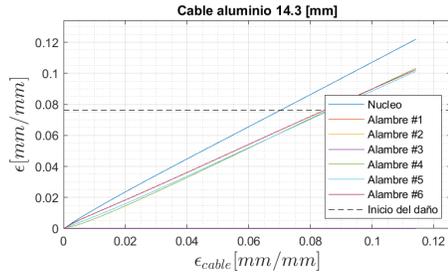


(c) Daño de los alambres versus la deformación

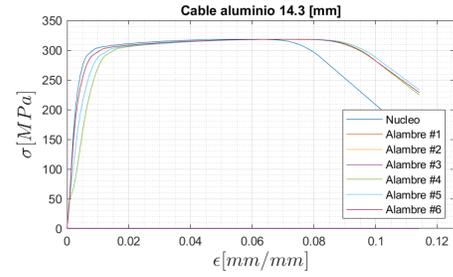


(d) Energía versus la deformación del cable de

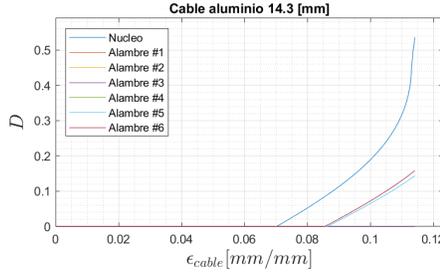
Figura H.3: Cable con dos alambres cortados.



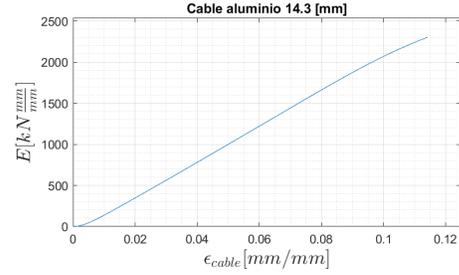
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

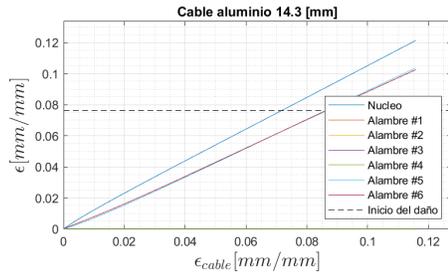


(c) Daño de los alambres versus la deformación

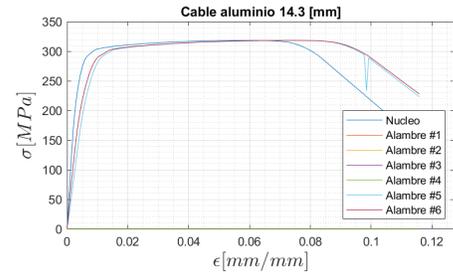


(d) Energía versus la deformación del cable de

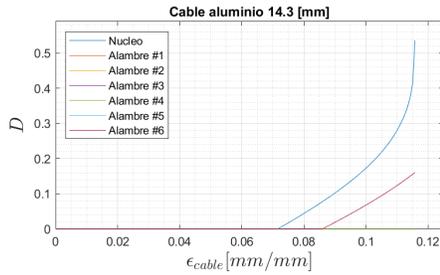
Figura H.4: Cable tres alambres cortados.



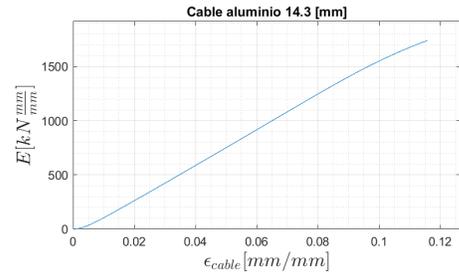
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

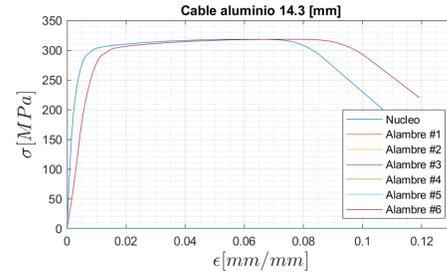
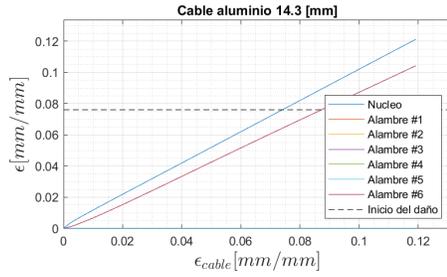


(c) Daño de los alambres versus la deformación

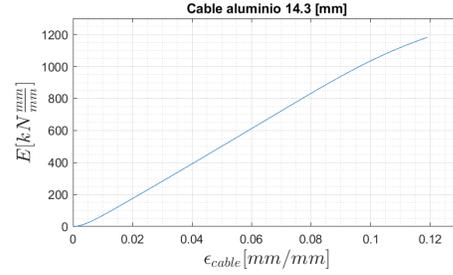
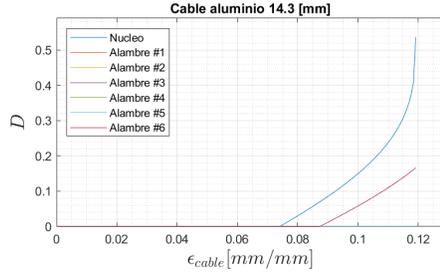


(d) Energía versus la deformación del cable de

Figura H.5: Cable con cuatro alambres cortados.



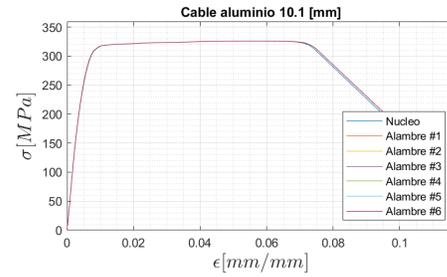
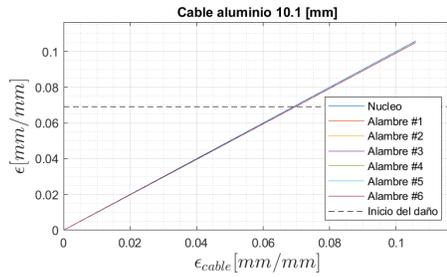
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].



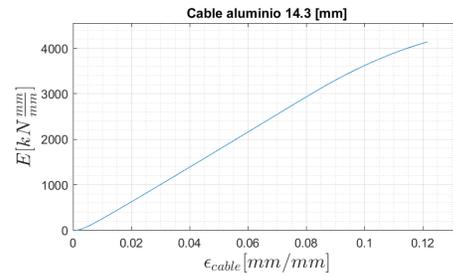
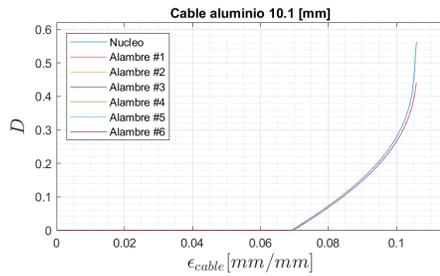
(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

Figura H.6: Cable con cinco alambres cortados.

H.2. Cable de aluminio de 10.1 [mm]

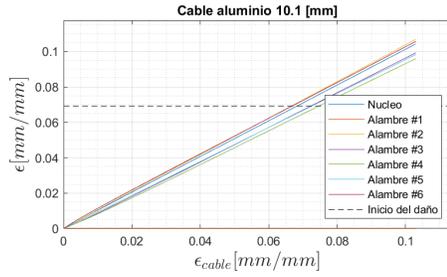


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

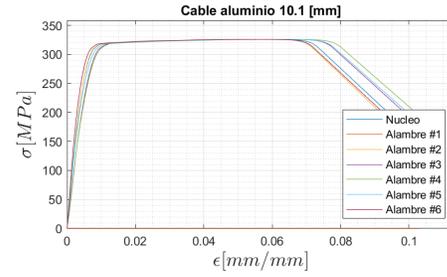


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

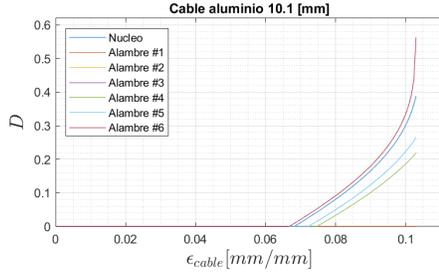
Figura H.7: Cable inicialmente sin daño.



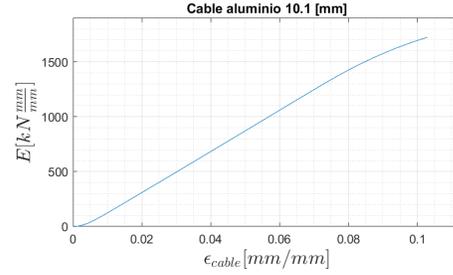
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

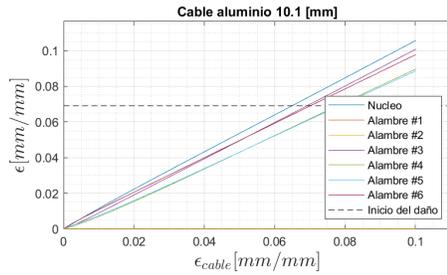


(c) Daño de los alambres versus la deforma-

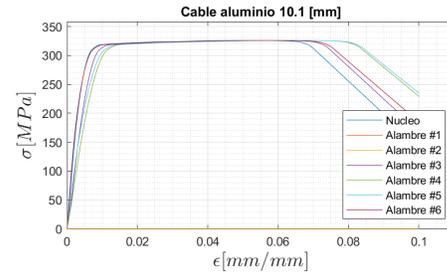


(d) Energía versus la deformación del cable de

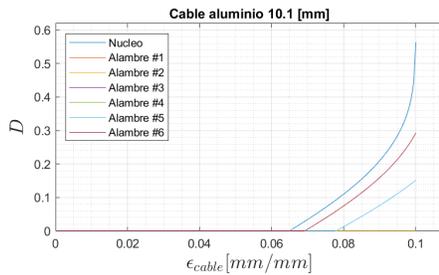
Figura H.8: Cable con un alambre cortado.



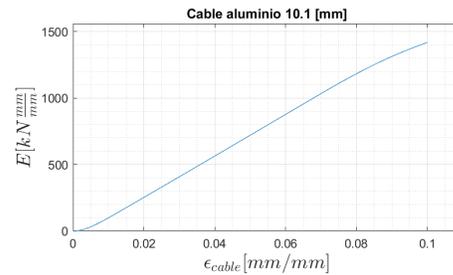
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

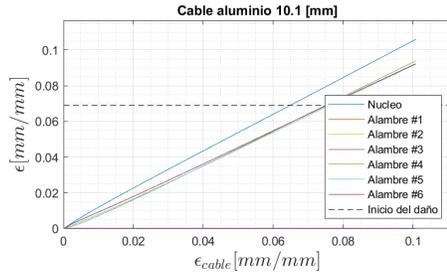


(c) Daño de los alambres versus la deforma-

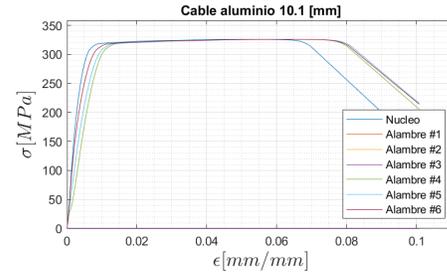


(d) Energía versus la deformación del cable de

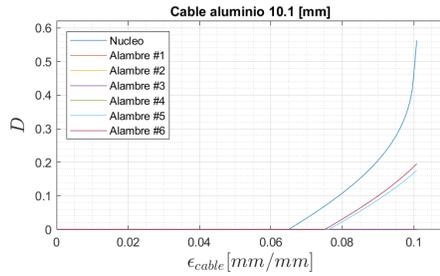
Figura H.9: Cable con dos alambres cortados.



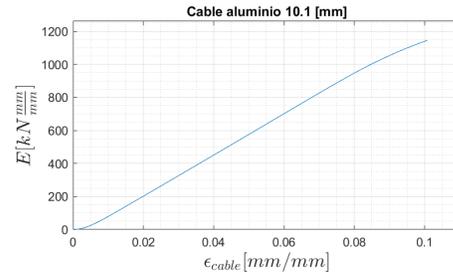
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

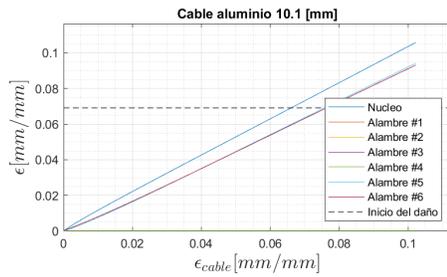


(c) Daño de los alambres versus la deformación

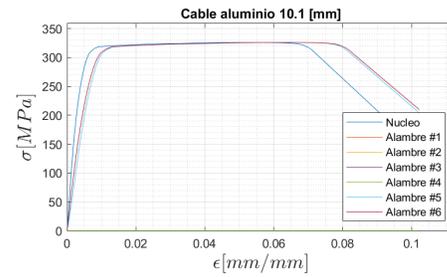


(d) Energía versus la deformación del cable de

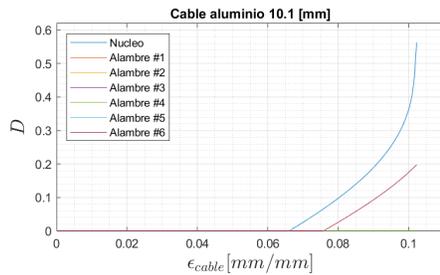
Figura H.10: Cable tres alambres cortados.



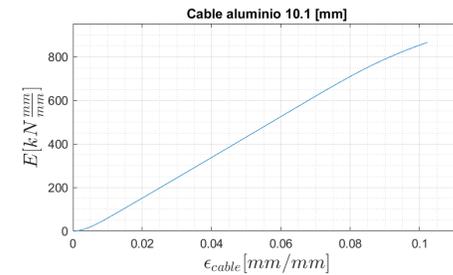
(a) Deformación de los alambres versus la de-



(b) Esfuerzo de los alambres versus la de-

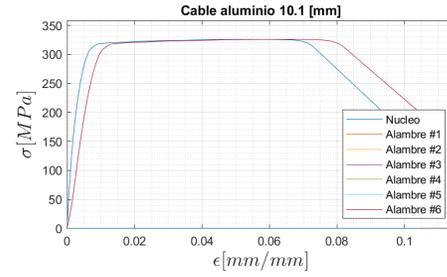
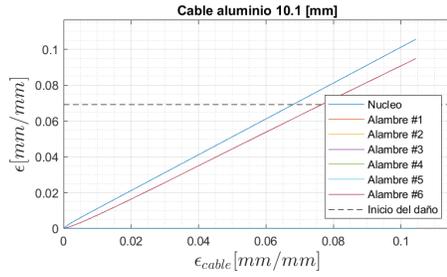


(c) Daño de los alambres versus la deformación

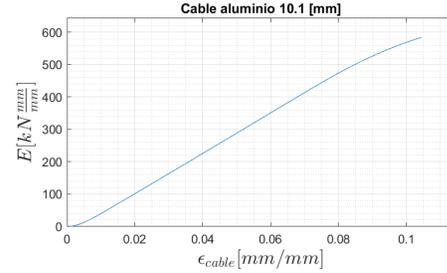
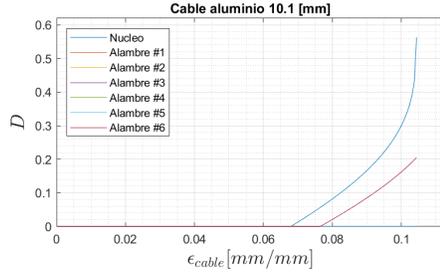


(d) Energía versus la deformación del cable de

Figura H.11: Cable con cuatro alambres cortados.



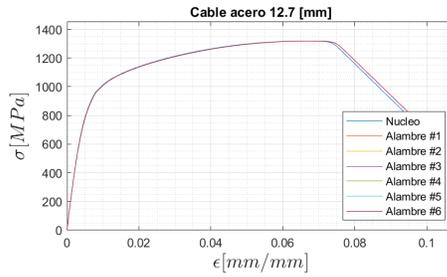
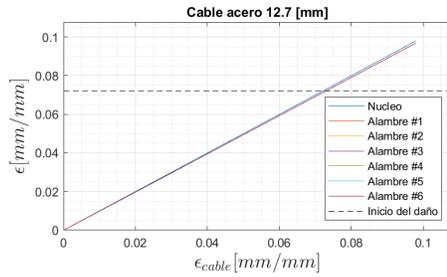
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].



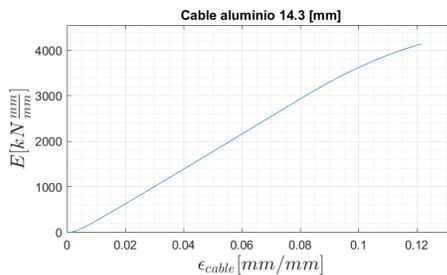
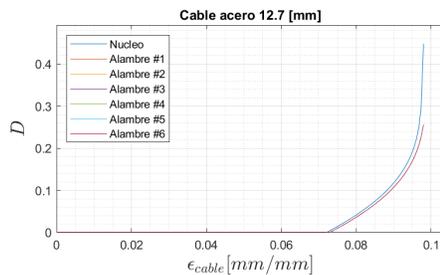
(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 10.1 [mm].

Figura H.12: Cable con cinco alambres cortados.

H.3. Cable de acero de 12.7 [mm]

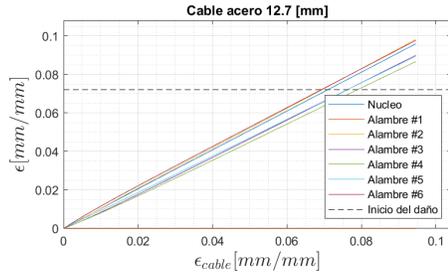


(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

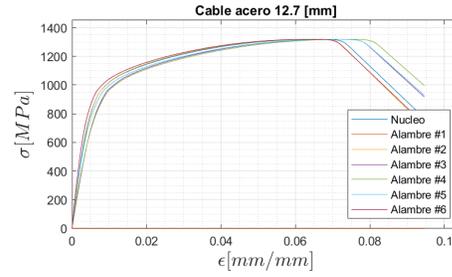


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm]. (d) Energía versus la deformación del cable de aluminio de 14.3 [mm].

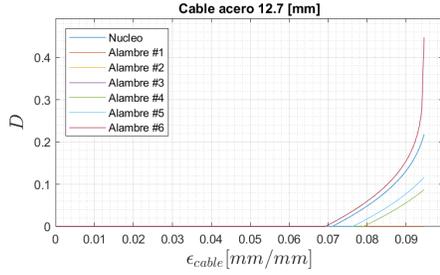
Figura H.13: Cable inicialmente sin daño.



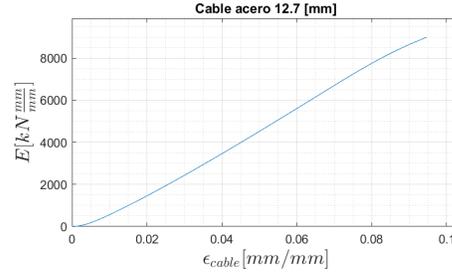
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

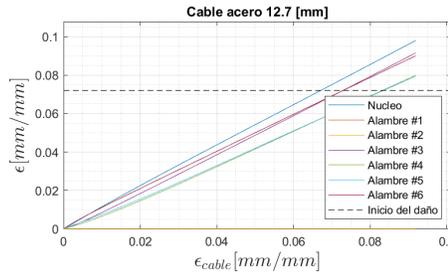


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

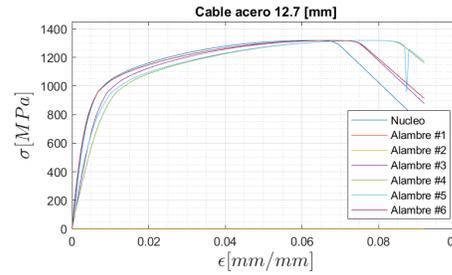


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

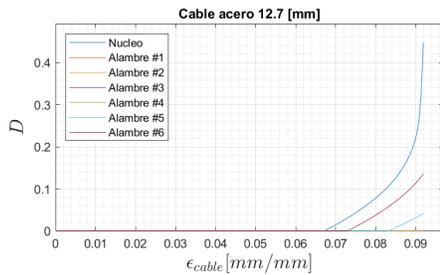
Figura H.14: Cable con un alambre cortado.



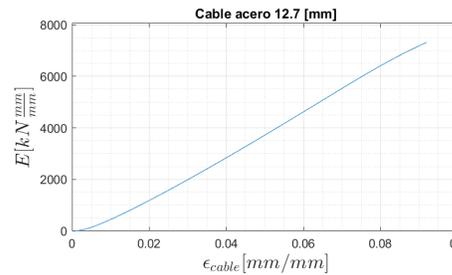
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

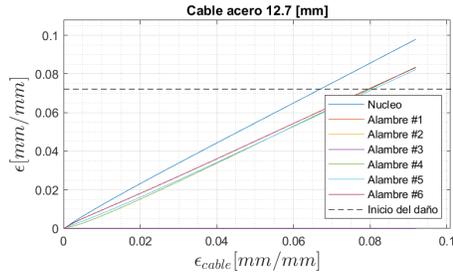


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

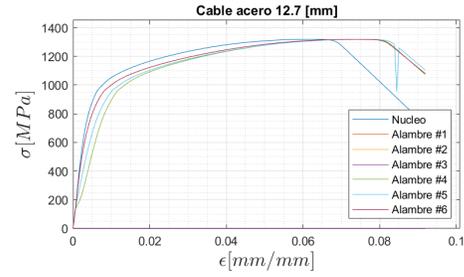


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

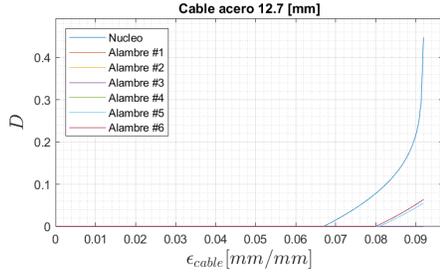
Figura H.15: Cable con dos alambres cortados.



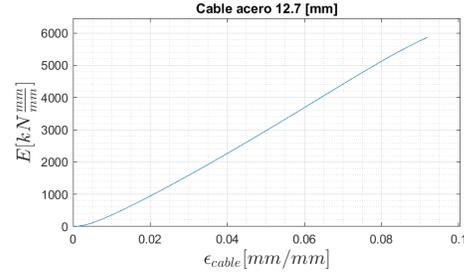
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

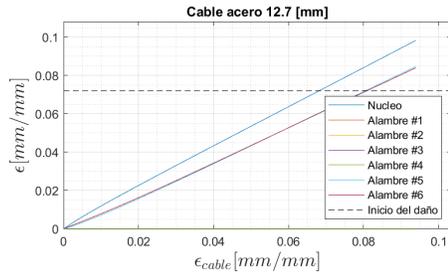


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

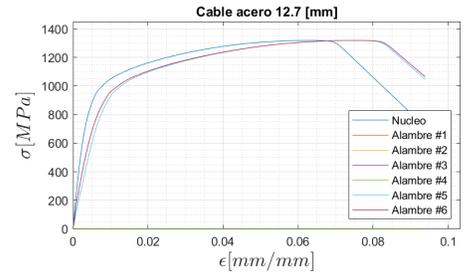


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

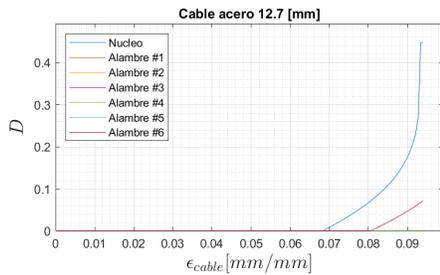
Figura H.16: Cable tres alambres cortados.



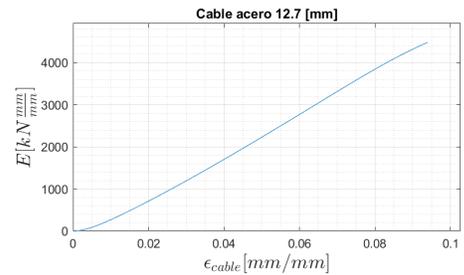
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

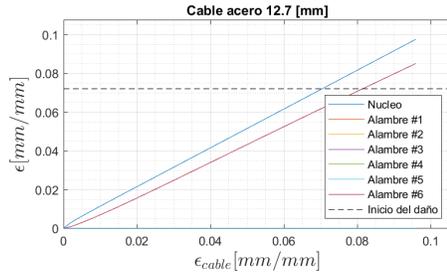


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

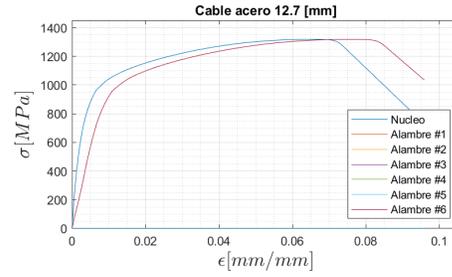


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

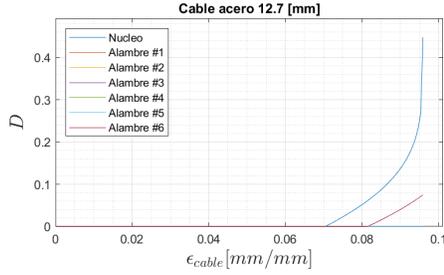
Figura H.17: Cable con cuatro alambres cortados.



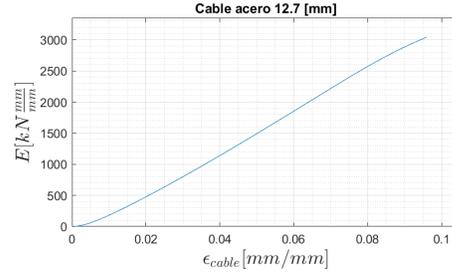
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



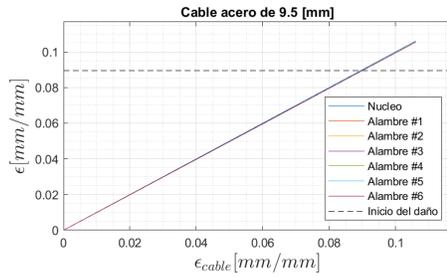
(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].



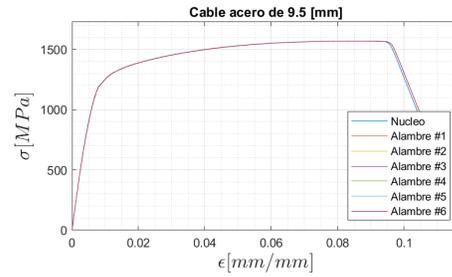
(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 12.7 [mm].

Figura H.18: Cable con cinco alambres cortados.

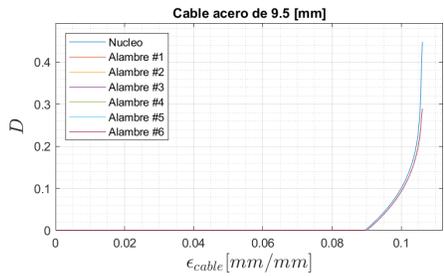
H.4. Cable de acero de 9.5 [mm]



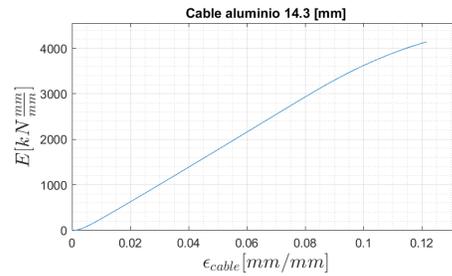
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

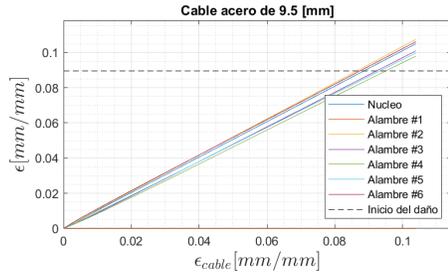


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

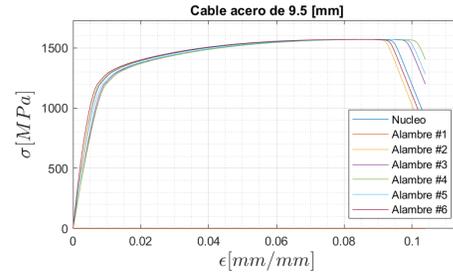


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

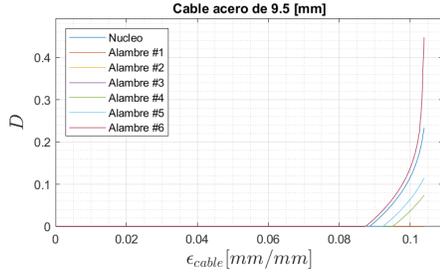
Figura H.19: Cable inicialmente sin daño.



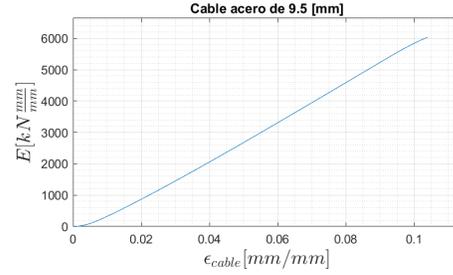
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

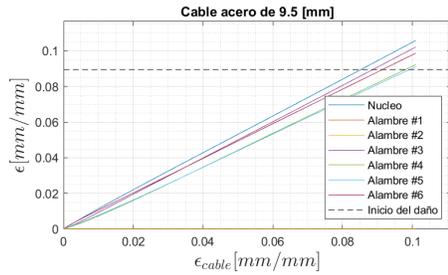


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

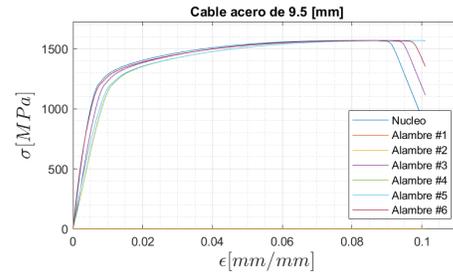


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

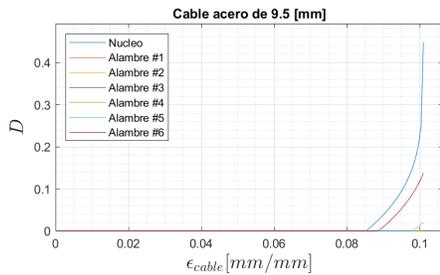
Figura H.20: Cable con un alambre cortado.



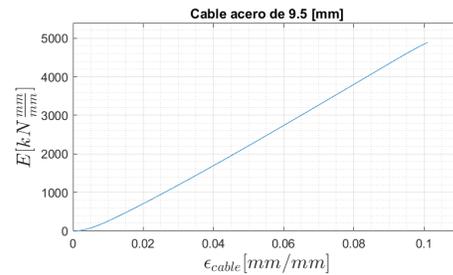
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

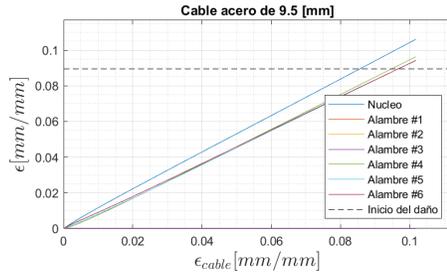


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

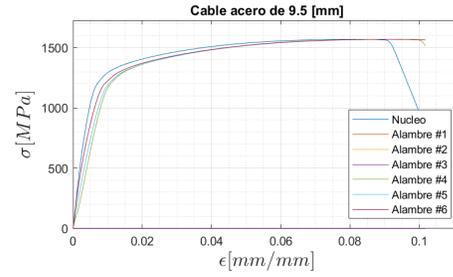


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

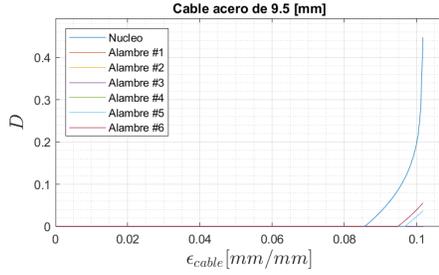
Figura H.21: Cable con dos alambres cortados.



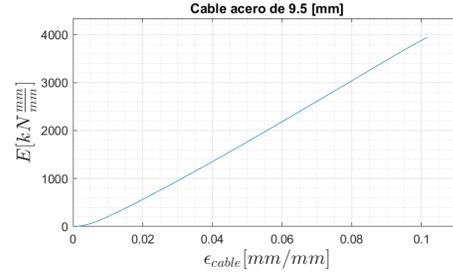
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

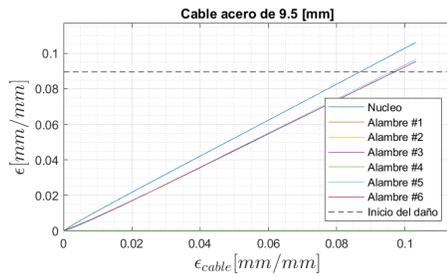


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

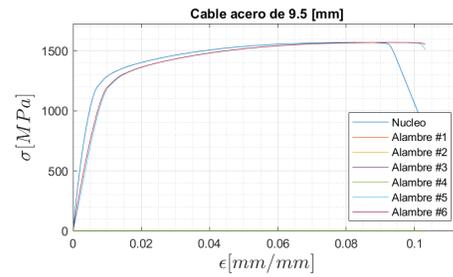


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

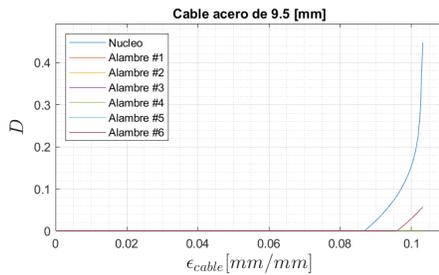
Figura H.22: Cable tres alambres cortados.



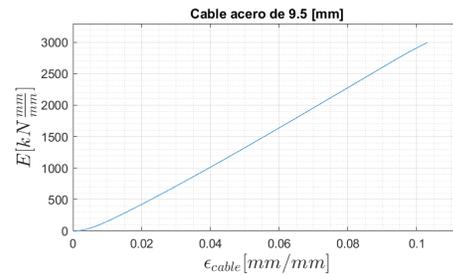
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

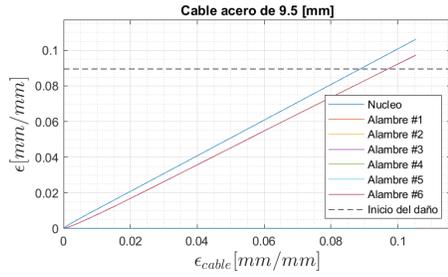


(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

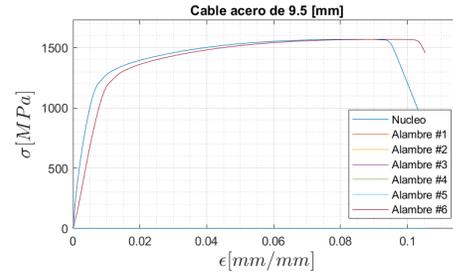


(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

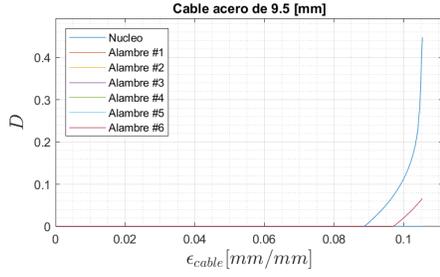
Figura H.23: Cable con cuatro alambres cortados.



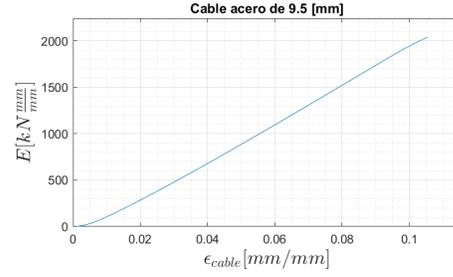
(a) Deformación de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(b) Esfuerzo de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(c) Daño de los alambres versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].



(d) Energía versus la deformación del cable de acero de 9.5 [mm].

Figura H.24: Cable con cinco alambres cortados.