

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción: cables dúctiles inicialmente dañados</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Antecedentes: sobre el daño dúctil y sus modelos</b>	<b>3</b>
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 <b>MDGTN</b> [34][24][40] . . . . .	22
2.5.4	Parámetros del <b>MDGTN</b> . . . . .	23
2.5.4.1	Parámetros constitutivos . . . . .	23
2.5.4.2	Parámetros del material . . . . .	23
2.5.5	Daño en el <b>MDGTN</b> [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
<b>3</b>	<b>Datos experimentales: ensayos de tracción</b>	<b>31</b>
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
<b>4</b>	<b>Procedimiento numérico: estimación de la evolución del daño dúctil</b>	<b>35</b>
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 <b>MHS</b>	39
4.2.1	Ley real sin daño	40
4.3	Modelo de daño del <b>MDGTN</b>	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 <b>MDB</b>	43
4.5	Ley ingenieril de los cables	44
4.6	Ley de daño ingenieril de los cables	44
<b>5</b>	<b>Resultados: leyes de daño dúctil en cables dañados</b>	<b>45</b>
5.1	Modelo del <b>MHS</b>	45
5.1.1	Parámetros del <b>MHS</b>	45
5.1.2	Ley real del <b>MHS</b>	45
5.1.3	Ley ingenieril <b>MEF</b>	46
5.1.4	Ley real sin daño	47
5.2	Modelo de daño del <b>MDGTN</b>	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 <b>MDB</b>	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
<b>6</b>	<b>Discusiones: modelos elastoplasticos, de daño y la evolución del daño en cables de metales dúctiles</b>	<b>71</b>
6.1	Modelo del <b>MHS</b> . . . . .	71
6.1.1	Parámetros del <b>MHS</b> . . . . .	71
6.1.2	Ley real del <b>MHS</b> . . . . .	71
6.1.3	Ley ingenieril del <b>MHS</b> . . . . .	75
6.2	Modelo de daño del <b>MDGTN</b> . . . . .	76
6.3	Ley de daño ingenieril de los alambres . . . . .	77
6.3.1	Ley de daño <b>MDB</b> . . . . .	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 <b>MDEL</b> . . . . .	86
6.7	Ley ingenieril de los cables con el <b>MDEL</b> . . . . .	87
6.8	Ley de daño ingenieril de los cables con el <b>MDEL</b> . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Conclusiones: de los resultados obtenidos del procedimiento numérico</b>	<b>93</b>
7.1	Trabajo futuro . . . . .	95
	<b>Bibliografía</b>	<b>96</b>
	<b>Anexo A Datos experimentales</b>	<b>99</b>
A.1	Ley esfuerzo-deformación ingenieril . . . . .	99
A.2	Propiedades mecánicas . . . . .	100
A.2.1	Reducción de área . . . . .	101
A.3	Alambres ensayados . . . . .	101
	<b>Anexo B Configuración MEF</b>	<b>104</b>
B.1	Análisis de sensibilidad de la geometría . . . . .	104
B.1.1	Análisis de sensibilidad a <b>A</b> . . . . .	104
B.1.2	Análisis de sensibilidad a <b>G</b> . . . . .	105
B.2	Análisis de sensibilidad del mallado . . . . .	106
	<b>Anexo C Ajuste ley real</b>	<b>109</b>
C.1	Primera iteración . . . . .	109
C.2	Segunda iteración . . . . .	111
C.3	Tercera iteración . . . . .	113
C.4	Cuarta iteración . . . . .	115
	<b>Anexo D Códigos ANSYS</b>	<b>117</b>
D.1	Eliminación de elementos . . . . .	117
	<b>Anexo E Análisis de sensibilidad del MDGTN</b>	<b>119</b>
E.1	Análisis de sensibilidad del modelo del <b>MDGTN</b> . . . . .	119
E.1.1	Parámetros constitutivos . . . . .	119
E.1.2	Parámetros del material . . . . .	120

E.1.3	Tamaño de los elementos . . . . .	121
<b>Anexo F Ajuste MDB</b>		<b>123</b>
F.1	Ajuste de $\alpha$ . . . . .	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
<b>Anexo G Evolución del daño en cables</b>		<b>131</b>
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
<b>Anexo H Evolución del daño en cables con el MDEL</b>		<b>144</b>
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