

Índice General

1	Introducción	14
1.1	Antecedentes	14
1.2	Objetivos	15
1.3	Puntos desarrollados en la Tesis	17
2	Uniones mecánicas en materiales compuestos	19
2.1	Introducción	19
2.2	Fenomenología	20
2.2.1	Modos de fallo	21
2.2.1.1	Tensión	22
2.2.1.2	Aplastamiento	22
2.2.1.3	Cortante	23
2.2.2	Eficiencia de las uniones en materiales compuestos	24
2.3	Modelos	25
2.3.1	Aplicación directa de algún criterio de fractura	26
2.3.2	Modelos basados en la mecánica de la fractura	26
2.3.3	Modelos empíricos basados en la utilización de dos parámetros	26
2.3.4	Modelos de fractura progresiva	27
2.4	Tendencias actuales	27
2.4.1	Predicción de los estados de tensiones tridimensionales	27
2.4.2	Estudio de los distintos modos de fallo	28
2.4.3	Elaboración de modelos	28
3	Presentación de las juntas T-bolt	30
3.1	La unión pala-buje	30
3.1.1	Condiciones de diseño	30
3.1.2	Condiciones de carga	31
3.1.3	Soluciones adoptadas	33

3.1.4	Comparación de las distintas opciones	36
3.2	La junta T-bolt	37
3.2.1	Distribución de la carga	38
3.2.2	Laminado de la raíz de la pala	38
3.2.3	Bulón	40
3.2.4	Vástago roscado	40
3.2.5	Brida del buje	42
3.2.6	Pretensión	43
3.3	Estudio paramétrico	45
3.3.1	d/D	46
3.3.2	w/D	49
3.3.3	t/D	50
3.3.4	e/D	51
3.3.5	th/e	52
3.3.6	F_0/P	52
3.4	Especificación de objetivos	56
3.4.1	Análisis Numérico	56
3.4.2	Estudio experimental de rotura	57
3.4.3	Obtención de criterios de fallo	57
4	Análisis Numérico	58
4.1	Modelo de elementos finitos	58
4.1.1	Características generales	59
4.1.2	Mallado	60
4.1.3	Estimación de las propiedades del material	62
4.1.3.1	Propiedades de una lámina	63
4.1.3.2	Propiedades del laminado	63
4.1.3.3	Traspaso de los valores de tensión/deformación a cada lámina	69
4.1.3.4	Implantación del modelo	69
4.1.4	Contacto	69
4.1.4.1	Tipos de contacto considerados	70
4.1.4.2	Desplazamiento de los cuerpos	70
4.1.4.3	Detección del contacto	71
4.1.4.4	Implementación de restricciones	71
4.2	Verificación experimental	72

4.2.1	Repartición de cargas	73
4.2.1.1	Descripción de las probetas	73
4.2.1.2	Resultados	74
4.2.2	Deformaciones superficiales	75
4.2.2.1	Técnica utilizada	76
4.2.2.2	Características del ensayo	79
4.2.2.3	Resultados	80
4.3	Esfuerzos y deformaciones en una junta típica	83
4.3.1	Modelo analizado	83
4.3.2	Casos de carga	85
4.3.3	Contornos de iso-deformación e iso-esfuerzo	85
4.3.4	Evolución de la superficie de contacto	93
4.3.5	Comparación con juntas a solape	94
4.3.6	Esfuerzos a nivel de lámina	99
4.3.7	Influencia de la curvatura de la raíz de la pala	102
5	Estudio experimental de rotura de las juntas tipo T-bolt	107
5.1	Introducción	107
5.2	Descripción de los ensayos de uniones T-bolt	107
5.2.1	Materiales de las probetas	108
5.2.2	Probetas material A	109
5.2.3	Probetas material M	109
5.2.4	Utillaje	110
5.2.5	Parámetros característicos	112
5.2.5.1	Superficies resistentes	112
5.2.5.2	Excentricidades del agujero del vástago y del bulón	113
5.2.5.3	Esfuerzos medios y resistencia del laminado	114
5.2.5.4	Eficiencia	115
5.2.5.5	Desplazamiento relativo entre bulones	115
5.2.6	Tratamiento de la señal sonora	116
5.2.6.1	Introducción	116
5.2.6.2	Método de conteo de eventos	116
5.3	Ensayos de material	118
5.3.1	Caracterización del laminado tipo M	118
5.3.1.1	Tracción	119

5.3.1.2	Tensión neta (con agujero libre)	119
5.3.1.3	Tensión neta (con agujero cargado)	120
5.3.1.4	Compresión local	120
5.3.2	Propiedades de lámina (material M)	121
5.4	Resultados	121
5.4.1	Propiedades laminado	121
5.4.1.1	Tracción	121
5.4.1.2	Tensión neta (agujero libre)	121
5.4.1.3	Tensión neta (agujero cargado)	122
5.4.1.4	Compresión local	123
5.4.2	Probetas AB	123
5.4.2.1	Comprobaciones geométricas	124
5.4.2.2	Valores de resistencia	124
5.4.2.3	Curvas esfuerzo - alargamiento	126
5.4.2.4	Emisión sonora	127
5.4.2.5	Inspección visual	128
5.4.3	Probetas AN	129
5.4.3.1	Comprobaciones geométricas	131
5.4.3.2	Valores de resistencia	131
5.4.3.3	Curvas esfuerzo - alargamiento	132
5.4.3.4	Emisión sonora	133
5.4.3.5	Inspección visual	134
5.4.4	Probetas MB	136
5.4.4.1	Comprobaciones geométricas	137
5.4.4.2	Valores de resistencia	137
5.4.4.3	Curvas esfuerzo-alargamiento	138
5.4.4.4	Emisión sonora	139
5.4.4.5	Inspección visual de los especímenes fallados	140
5.4.5	Probetas MN	143
5.4.5.1	Comprobaciones geométricas	143
5.4.5.2	Valores de resistencia	144
5.4.5.3	Curvas esfuerzo - alargamiento	144
5.4.5.4	Emisión sonora	145
5.4.5.5	Inspección visual	146

6	Consideraciones sobre la predicción del fallo	148
6.1	Introducción	148
6.2	Predicción del fallo	148
6.2.1	Tensión neta	148
6.2.1.1	Relación con las curvas de emisión sonora	152
6.2.2	Compresión local	154
7	Conclusiones	160
7.1	Conclusiones	160
7.1.1	Principales resultados obtenidos	160
7.1.1.1	Introducción	160
7.1.1.2	Análisis numérico	160
7.1.1.3	Análisis experimental	162
7.1.1.4	Predicción del fallo	164
7.2	Consideraciones de diseño y líneas de investigación futuras	165
7.2.1	El diseño de la T-bolt	165
7.2.2	Líneas de investigación futuras	166
7.3	Conclusiones finales	167
	Bibliografía	168

Índice de Figuras

1.1	T-bolt	15
2.1	Laminado con carga de pivote	20
2.2	Modos de fractura	21
2.3	Planos de fallo	21
2.4	Rotura por aplastamiento	23
2.5	Compresión lateral	23
2.6	Estados límite en juntas de materiales compuestos	24
3.1	Sistemas de coordenadas	31
3.2	Bridas	35
3.3	Soluciones sin brida	35
3.4	Parámetros geométricos	37
3.5	Distribución de esfuerzos en la raíz	38
3.6	Mecanizado del laminado de la raíz	39
3.7	Bulón	40
3.8	Flexión del bulón	41
3.9	Vástago	41
3.10	Diagramas de sólido libre del laminado	43
3.11	<i>Rigging diagram</i>	45
3.12	C_b y C_n versus d/D	47
3.13	Área resistente en compresión local	48
3.14	Curvas eficiencia – D/w	50
3.15	Influencia de t	51
3.16	Variaciones de la carga de fatiga y de apertura respecto a th/e	53
3.17	Efecto de la pretensión sobre la carga del vástago	54
3.18	Efecto de la pretensión sobre la resistencia a fatiga del vástago	55
4.1	Pieza modelada y planos de simetría	60

4.2	Esquema del modelo completo	61
4.3	Mallado radial	61
4.4	Modelos de verificación	67
4.5	Tolerancia de contacto	71
4.6	Transformación de los grados de libertad	72
4.7	Restricciones en un contacto deformable–deformable	72
4.8	Carga sobre el vástago	74
4.9	Comparación de los resultados teóricos y experimentales	75
4.10	Esquema polariscopio circular de campo oscuro	77
4.11	Esquema del polariscopio de reflexión	78
4.12	Modelo de elementos finitos	79
4.13	Órdenes de franja enteros	80
4.14	Franjas fotoelásticas, probeta tipo MN	81
4.15	Franjas fotoelásticas, probeta tipo MB	82
4.16	Comparación fotoelasticidad - FEM, probeta MB	84
4.17	Comparación fotoelasticidad - FEM, probeta MN	84
4.18	Junta estándar, componente X	86
4.19	Junta estándar, componente Y	87
4.20	Junta estándar, componente XY	88
4.21	Junta estándar, componente Z	89
4.22	Junta estándar, componente YZ	90
4.23	Junta estándar, componente ZX	91
4.24	Evolución de la superficie de contacto	94
4.25	Modelo de junta a solape doble	96
4.26	Comparación con juntas a solape, caso de carga 3, deformación X	96
4.27	Comparación con juntas a solape, caso de carga 3, deformación Y	97
4.28	Comparación con juntas a solape, caso de carga 3, deformación cortante XY	97
4.29	Comparación con juntas a solape, caso de carga 3, esfuerzo radial	98
4.30	Comparación con juntas a solape, caso de carga 3, esfuerzo tangencial	98
4.31	Arco esfuerzos a nivel de lámina	99
4.32	Esfuerzos en una lámina a 0°	100
4.33	Esfuerzos en una lámina a 90°	100
4.34	Esfuerzos en una lámina a +45°	101
4.35	Esfuerzos en una lámina a -45°	101
4.36	Modelo con curvatura	103

4.37	Comparación entre modelos plano y curvado, esfuerzo, componente X	103
4.38	Comparación entre modelos plano y curvado, esfuerzo, componente Y	104
4.39	Comparación entre modelos plano y curvado, esfuerzo cortante, componente XY	104
4.40	Junta estándar, laminado cilíndrico	105
5.1	Esquema de la probeta T-bolt	108
5.2	Definición superficie de apoyo	110
5.3	Soporte	111
5.4	Posición del micrófono	112
5.5	Áreas resistentes	113
5.6	Excentricidad del agujero del vástago	113
5.7	Excentricidad del agujero del bulón	114
5.8	Cargas máximas admisibles	115
5.9	Ejemplo de tratamiento de la señal	118
5.10	Probetas para el ensayo del laminado	120
5.11	Probeta tipo AB	124
5.12	Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas AB	126
5.13	Curvas de emisión, probetas AB	127
5.14	Fallo de las probetas tipo AB1 y AB	128
5.15	Desgarre de la probeta tipo AB1	128
5.16	Sección A-A'	129
5.17	Secciones de las probetas tipo AB	130
5.18	Probeta tipo AN	131
5.19	Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas AN	133
5.20	Emisión sonora, probetas AN2 y AN4	134
5.21	Rotura, probeta AN4	134
5.22	Rotura, probeta AN1	135
5.23	Sección B-B', probeta AN2 (unión con rotura)	135
5.24	Sección B-B', probeta AN2 (unión sin rotura)	136
5.25	Probeta tipo MB	136
5.26	Fallo del bulón a cortante	137
5.27	Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas MB	139
5.28	Emisión sonora, probeta MB2	140
5.29	Emisión sonora, probeta MB4	141
5.30	Fallo probeta MB	141

5.31	Sección A-A'	142
5.32	Partición del laminado	143
5.33	Probeta tipo MN	143
5.34	Curvas Esfuerzo-alargamiento, probetas MN	145
5.35	Emisión sonora, probetas MN1 y MN3	146
5.36	Fallo probeta MN2	146
5.37	Delaminaciones probeta MN2	147
6.1	Modelos de las probetas tipo C, N y MN	150
6.2	Tensión neta, probetas tipo C, N y MN	151
6.3	Distancia d_0	151
6.4	Tensión neta, probetas tipo N, MN y AN	152
6.5	Aplicación del método <i>Point Stress</i> a la probeta tipo AN	153
6.6	Inicio del fallo (probetas MN)	153
6.7	Inicio del fallo (probetas AN)	154
6.8	Distintas áreas resistentes	155
6.9	Modelos de las probetas tipo B y MB	155
6.10	Compresión local, probetas tipo B y MB	156
6.11	Compresión local, probetas tipo B y MB	157
6.12	Compresión local, probetas tipo B y AB	158
6.13	Compresión local, esfuerzo normalizado, probetas tipo B, MB y AB	159

Índice de Tablas

3.1	Categorías de turbina eólica según la IEC	33
3.2	Casos de carga según el GL	34
4.1	Propiedades de los constituyentes	63
4.2	Criterios de estimación de las propiedades elásticas	63
4.3	Propiedades de lámina	67
4.4	Propiedades estimadas del laminado	67
4.5	Propiedades del laminado según modelos de E.F.	68
4.6	Dimensiones de las probetas	73
4.7	Propiedades estimadas del laminado	73
4.8	Dimensiones de las probetas	79
4.9	Propiedades del laminado	80
4.10	Dimensiones T-Bolt estándar	83
4.11	Evolución de la carga del bulón	92
5.1	Medidas de las probetas del material A	109
5.2	Probetas tipo T-bolt, material M	110
5.3	Datos para la detección de eventos	118
5.4	Propiedades de lámina del material tipo M	121
5.5	Propiedades del laminado tipo M en dirección X	122
5.6	Tensión neta, agujero libre, material M	122
5.7	Tensión neta, agujero cargado, material M	123
5.8	Compresión local, material M	123
5.9	Comprobaciones geométricas, probetas tipo AB	125
5.10	Valores de resistencia, probeta AB1	125
5.11	Valores de resistencia, probetas AB	126
5.12	Comprobaciones geométricas, probetas tipo AN	131
5.13	Valores de resistencia, probetas AN	132

5.14	Comprobaciones geométricas, probetas tipo MB	137
5.15	Valores de resistencia, probetas MB	138
5.16	Comprobaciones geométricas, probetas tipo MN	144
5.17	Valores de resistencia, probetas MN	145
6.1	Valores de medios de resistencia en tensión neta	149
6.2	Valores de medios de resistencia en compresión local	154