



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica

Comportamiento eléctrico de los compuestos de carbono (CFRP).

Implicaciones para el modelado y fabricación de palas de
aerogenerador con elementos estructurales que incorporan
compuestos de CFRP.

Tesis doctoral realizada por:

David Romero Durán

Dirigida por:

Joan Montanyà Puig

Oscar van der Velde

Universitat Politècnica de Catalunya

Terrassa, junio 2022

Resumen

Los materiales compuestos con refuerzo de fibras de carbono (CFRP) se han introducido de manera muy significativa en todos los ámbitos de la industria y el sector de la energía eólica no ha sido una excepción. Este sector, por las dimensiones que están tomando las turbinas eólicas actuales y por el entorno de funcionamiento donde se suelen encontrar, se enfrenta a un gran reto y es el de proteger estas estructuras frente a las descargas atmosféricas. Las palas de los aerogeneradores (WTB) son los elementos más expuestos a estos fenómenos y, dadas las dimensiones actuales y lo que se espera que sigan creciendo, cada vez es más habitual que incorporen materiales compuestos de CFRP. El comportamiento eléctrico de este tipo de materiales y ver cómo integrarlos en el sistema de protección contra el rayo (LPS) todavía tienen muchos aspectos por resolver.

Esta tesis presenta un amplio estudio experimental a través del cual se desea aportar conocimiento en esta dirección, en la de entender mejor el comportamiento de este tipo de materiales tanto para su posterior modelado como para su integración en el LPS de una WTB. Así que en los capítulos centrales (Capítulos 4 y 5) de esta tesis se van a mostrar un gran número de ensayos y unos procedimientos muy detallados que permitirán, posteriormente, ser reproducidos y comparados.

La primera parte de la experimentación se orienta hacia la determinación y caracterización del material, dado su comportamiento anisotrópico. Todos los ensayos y resultados aquí mostrados permiten conocer las dificultades en la caracterización este tipo de materiales desde el punto de vista eléctrico y se propone un procedimiento que, dados los resultados obtenidos, se entiende que permite alcanzar una información de mejor calidad. A su vez, dada la dependencia que muestran todos estos ensayos de las conexiones eléctricas con este tipo de materiales, también se realiza un estudio detallado sobre el efecto de las conexiones.

La segunda parte experimental de este trabajo se orienta hacia el estudio de las conexiones superficiales sobre los materiales compuestos con el fin de equipotencializarlos e integrarlos con el LPS. En este caso, se tienen en cuenta la dependencia del tamaño de las probetas y el tipo de corriente inyectada, ya que no sólo se trabaja en corriente continua, sino que también se inyectan impulsos de corriente tipo rayo. De esta forma se puede extraer conclusiones más amplias del comportamiento de este tipo de conexiones con los materiales compuestos de CFRP.

Esta tesis se completa con una introducción y motivación para el desarrollo de la misma (Capítulo 1), sigue con una revisión detallada de la estructura de las WTB, de los materiales compuestos utilizados para su fabricación, un repaso de la normativa de protección y de las técnicas de modelado (Capítulo 2). El Capítulo 3 se dedica a la revisión de los materiales utilizados, de las técnicas aplicadas para la preparación del material para los ensayos y de los métodos de medida para obtener las características del material.

Después de todo el estudio experimental y de su análisis, se muestran algunas aportaciones y trabajos realizados en torno a esta tesis (Capítulo 6) y se finaliza con las conclusiones y propuestas de trabajos futuros (Capítulo 7).

Abstract

Carbon fiber reinforced composites (CFRP) have been introduced in a very significant way in all areas of industry and the wind energy sector has been no exception. Due to the size of today's wind turbines and the operating environment in which they are usually found, this sector is facing a major challenge: protecting these structures against atmospheric discharges. Wind turbine blades (WTB) are the most exposed elements to these phenomena and, given the current dimensions and the expected further growth, it is increasingly common for them to incorporate CFRP composite materials. The electrical behavior of these materials and how to integrate them into the lightning protection system (LPS) still have many issues to be solved.

This thesis presents an extensive experimental study through which we wish to provide knowledge in this direction, in order to better understand the behavior of this type of materials both for their subsequent modeling and for their integration in the LPS of a WTB. Thus, in the central chapters (Chapters 4 and 5) of this thesis, a large number of tests and very detailed procedures will be shown, which will allow, later on, to be reproduced and compared.

The first part of the experimentation is oriented towards the determination and characterization of the material, given its anisotropic behavior. All the tests and results shown here allow to know the difficulties in the characterization of this type of materials from the electrical point of view and a procedure is proposed which, given the results obtained, is understood to allow to reach a better quality information. At the same time, given the dependence that all these tests show on the electrical connections with this type of materials, a detailed study on the effect of the connections is also carried out.

The second experimental part of this work is oriented towards the study of surface connections on composite materials in order to bond them and integrate them with the LPS. In this case, the dependence of the size of the specimens and the type of current injected are taken into account, since not only direct current is used, but also lightning current pulses are injected. In this way, more comprehensive conclusions can be drawn about the behavior of this type of connections with CFRP composite materials.

This document is completed with an introduction and motivation for the development of the thesis (Chapter 1), followed by a detailed review of the structure of WTBs, the composite materials used for their fabrication, a review of the protection standard and modeling techniques (Chapter 2). Chapter 3 is devoted to a review of the materials used, the techniques applied to prepare the material for testing and the measurement methods used to obtain the material characteristics.

After all the experimental study and its analysis, some contributions and works carried out in relation to this thesis are shown (Chapter 6) and the document ends with the conclusions and proposals for future works (Chapter 7).

Agradecimientos

A lo largo del desarrollo de este trabajo son muchas las personas que de una manera u otra me han alentado para no desistir en el empeño de llevarlo a su fin. Familiares, amig@s y compañer@s de trabajo, tod@s ell@s han puesto su granito de arena y a tod@s les quiero dar mi más sentido agradecimiento. Pido disculpas por no nombrarl@s a tod@s, aunque de manera individual sí les he hecho llegar este agradecimiento. Evidentemente hay personas que debo destacar porque así lo siento.

Alicia, gracias por tu paciencia, comprensión y amor durante todos estos años juntos y en especial en estos últimos, por haber sido algo difíciles. Sin ti esto no hubiera sido posible.

A mis directores de tesis, Joan y Oscar, que a través de su conocimiento me han hecho ver aspectos de la investigación difíciles para mí, pero necesarios para llevar a cabo este trabajo.

A todos los miembros de grupo de investigación Lightning Research Group de la UPC, a los que están y a los que han estado. También a l@s estudiantes de Grado, Máster y Erasmus que a través de sus trabajos finales de estudios han colaborado con el grupo. Tod@s ell@s han hecho que nuestro grupo de investigación sea lo que es hoy, “especial”, y con los que espero seguir creciendo y compartiendo experiencias.

Por último, a la “Akampada”, espacio compartido por grandes personas y mejores amigos con los que no he parado de crecer como persona y disfrutar de la vida.

A tod@s GRACIAS!!

“Haz algo y olvídate del resultado”

Ángeles Giménez Vicente

Listado de acrónimos

CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CFRP UD	CFRP Uni-Directional
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
LPS	Lightning Protection System
WTB	Wind Turbine Blade
FEM	Finite Element Method
FDTD	Finite-Difference Time-Domain method
SEM	Scanning Electron Microscope
PAN	Peroxiacetilnitrato
IEC	International Electrotechnical Commission

Índice General

Resumen.....	i
Abstract	iii
Agradecimientos.....	v
Listado de acrónimos	vii
Índice General	ix
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tablas.....	xx
1 Introducción.....	1
1.1 Evolución de los aerogeneradores y la necesidad de la protección contra el rayo.....	2
1.2 Motivación y objetivos de la tesis.....	3
1.3 Organización de esta tesis	3
1.4 Bibliografía	5
2 Estructura de las palas de aerogenerador (WTB) y su protección contra el rayo	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Estructuras de las palas de los aerogeneradores.....	8
2.3 Descripción del material compuesto con carbono (CFRP)	11
2.4 Características eléctricas del CFRP	15
2.5 Protección contra el rayo en aerogeneradores. UNE-EN IEC 61400-24	17
2.6 Técnicas para el modelado de una WTB	18
2.6.1 Modelado en baja frecuencia	19
2.6.2 Modelado con FEM.....	21
2.6.3 Modelado con FDTD	21
2.7 Comentarios finales.....	22
2.8 Bibliografía	23
3 Estudio de la resistividad eléctrica de los compuestos de carbono unidireccional (CFRP UD)	27
3.1 Introducción.....	27
3.2 Descripción del CFRP utilizado.....	28
3.3 Proceso de preparación de las probetas	29
3.4 Obtención de la resistividad eléctrica del CFRP	33

3.4.1	Consideraciones sobre los materiales compuestos de CFRP	33
3.5	Revisión de los métodos de medida	39
3.5.1	Métodos por inyección de corriente	39
3.5.2	Otros métodos	42
3.6	Bibliografía	45
4	Análisis experimental de la resistividad eléctrica de materiales compuestos de CFRP UD	49
4.1	Introducción.....	49
4.2	Ensayos para determinar la dependencia de los contactos eléctricos en los ensayos	50
4.2.1	Objetivos del ensayo	51
4.2.2	Descripción del ensayo y resultados	51
4.2.3	Análisis de los resultados y comentarios.....	53
4.3	Ensayos para determinar la dependencia de la resistividad del material con la corriente.....	54
4.3.1	Objetivo del ensayo.....	54
4.3.2	Descripción del ensayo y resultados	54
4.3.3	Ensayo con corriente elevada	63
4.3.4	Análisis de los resultados y comentarios	65
4.4	Obtención de las resistividades del material por mediante el método de los 2 puntos	67
4.4.1	Objetivos y metodología seguida en los ensayos	67
4.4.2	Resultados de ρ_x	68
4.4.3	Resultados de ρ_y	69
4.4.4	Resultados de ρ_z	71
4.4.5	Comentarios de los resultados	72
4.5	Obtención de la resistividad mediante el método de los 4 puntos.....	73
4.5.1	Objetivos de los ensayos	73
4.5.2	Metodología de los ensayos.....	74
4.5.3	Ensayo 1	76
4.5.4	Ensayo 2	78
4.5.5	Ensayos 3.....	82
4.6	Evaluación de la resistividad del material en función del tamaño de la probeta.....	91
4.6.1	Objetivos del ensayo.....	91
4.6.2	Metodología de los ensayos.....	92
4.6.3	Ensayos 4.....	93
4.7	Discusión final de los resultados obtenidos	100

4.8	Bibliografía	103
5	Estudio de los materiales compuestos de CFRP UD con conexiones superficiales	105
5.1	Introducción	105
5.2	Efectos sobre los compuestos de CFRP UD al inyectar la corriente de forma superficial	107
5.3	Ensayos superficiales	108
5.3.1	Ensayo S1	108
5.3.2	Ensayo S2	110
5.3.3	Ensayo S3	112
5.3.4	Ensayo S4	115
5.3.5	Ensayo S5	119
5.3.6	Ensayo S6	126
5.3.7	Ensayo S7	131
5.4	Discusión final de los resultados obtenidos.....	135
5.5	Bibliografía	137
6	Aportaciones y trabajos asociados al estudio experimental	141
6.1	Fast current impulse test for wind turbine blades [1]	142
6.1.1	Introducción.....	142
6.1.2	Características del ensayo con la WTB real	143
6.1.3	Resultados del ensayo	143
6.1.4	Conclusiones.....	145
6.2	Test and simulation of lightning current distribution on a wind turbine blade [2]	147
6.2.1	Introducción.....	147
6.2.2	Modelos planteados.....	147
6.2.3	Resultados del estudio.....	148
6.2.4	Conclusiones.....	151
6.3	LIGHTPRO. Technology for wind turbines design with atmospheric lightning protection 152	
6.3.1	Introducción.....	152
6.3.2	Diseño conceptual del generador de Marx.....	152
6.3.3	Resultados obtenidos.....	153
6.3.4	Conclusiones.....	154
6.4	Experimental determination of potential distribution on a CFRP laminate and thermal images of DC and impulse currents: evaluations of connections [10].....	155

6.4.1	Introducción.....	155
6.4.2	Características de los ensayos	155
6.4.3	Resultados del estudio	155
6.4.4	Conclusiones.....	158
6.5	Investigation of potential distribution on a CFRP coupon under impulse current. Test results and FDTD simulation [11].....	159
6.5.1	Introducción.....	159
6.5.2	Características del ensayo	159
6.5.3	Resultados del estudio	159
6.5.4	Conclusiones.....	161
6.6	Evaluation method and system form a lightning protection system of a wind turbine comprising a plurality of blades made of carbon fiber reinforced plastic or polymer [13]	162
6.6.1	Introducción.....	162
6.6.2	Problemática planteada.....	162
6.6.3	Marco normativo.....	162
6.6.4	Conocimiento adquirido	163
6.6.5	Descripción de la invención.....	163
6.6.6	Esquema del sistema motivo de la patente	165
6.6.7	Comentarios adicionales	165
6.7	Bibliografía	166
7	Conclusiones y trabajos futuros.....	167
7.1	Conclusiones	167
7.2	Trabajos futuros.....	169
	Anexos.....	173
A.1	Tablas de valores obtenidos del ensayo del apartado 4.2 de la memoria	173
A.2	Tablas de valores obtenidos del ensayo del apartado 4.3 de la memoria	175
A.3	Tablas de valores obtenidos de los ensayos por el método de los 2 puntos (apartado 4.4 de la memoria).....	184
A.4	Tablas de valores obtenidos de los ensayos por el método de los 4 puntos (apartado 4.5 de la memoria).....	188
A.5	Tablas de valores obtenidos de los ensayos por el método de los 4 puntos (apartado 4.6 de la memoria).....	204
A.6	Tablas de valores obtenidos de los ensayos superficiales (apartado 5.3 de la memoria)	210

Índice de figuras

Figura 1-1.- Evolución del tamaño de las aerogeneradores [4].	2
Figura 2-1.- Elementos básicos de una pala de aerogenerador (WTB). Adaptado de [37].	9
Figura 2-2.- Diferentes soluciones para la estructura de soporte de una pala de aerogenerador. Adaptadas de [38],[40].	9
Figura 2-3.- Evolución del espesor del spar cap de una pala de 88 m. Incluye la probabilidad de impactos de rayo a lo largo de la longitud de la WTB [40], [41].	10
Figura 2-4.- Representación de la estructura de un material compuesto [11].	11
Figura 2-5.- Carretes con un haz múltiple de fibras de carbono [44].	12
Figura 2-6.- Formato en el que se suelen suministrar las láminas de Prepreg de material compuesto [46].	13
Figura 2-7.- Formatos de perfiles de CFRP obtenidos por pultrusión [45].	14
Figura 2-8.- Probeta de carbono donde se está eliminando la peel ply para su posterior fase de pulido.	14
Figura 2-9.- Representación ideal de un laminado de CFRP UD.	15
Figura 2-10.- Representación de cómo se encuentran distribuidas las fibras en un CFRP UD en el plano X-Y [48].	15
Figura 2-11.- Representación del paso de la corriente en la dirección perpendicular a las fibras en función de los contactos entre ellas [47].	16
Figura 2-12.- Esquema típico de una WTB con el LPS. a) Aparecen todos los elementos de la pala. b) Sección transversal de la pala [52].	19
Figura 2-13.- Modelo simplificado del LPS integrado por el bajante, el spar cap de CFRP y las uniones equipotenciales. Adaptado de [31].	20
Figura 2-14.- Esquema que refleja la dependencia del valor de R_{sp} en función del punto de conexión.	20
Figura 2-15.- Simulación de la densidad de corriente en la superficie de conexión entre un electrodo metálico y un laminado de CFRP [31].	21
Figura 3-1.- Representación de un compuesto de CFRP UD ideal donde aparecen las direcciones consideradas.	29
Figura 3-2.- Imagen tomada con SEM sobre el plano Y-Z de la probeta PP después del corte por chorro de agua. En ella se pueden observar las cabezas de algunas fibras que han quedado expuestas y huecos en el material debidos al arrancamiento de fibras.	30
Figura 3-3.- Imágenes tomadas con microscopía al finalizar todas las fases de pulido en la probeta PG. a) Imagen con un zoom de x200. b) Imagen sobre la zona remarcada con un zoom de x600.	31
Figura 3-4.- Detalle de una muestra de CFRP UD con tratamiento superficial con ácido y pulido con papel abrasivo [16].	31
Figura 3-5.- Detalles de la preparación de la probeta PF: a) Estado inicial del material suministrado. b) Eliminación de la capa de protección (peel ply). c) Pulido basto de las superficies de las probetas. d) Probetas finales después del corte por agua y del pulido fino.	32

Figura 3-6.- Imágenes con SEM de las fibras existentes en los materiales compuestos utilizados. a) fibras en las láminas de prepreg la probeta PG. b) Fibras en el laminado de la probeta de pultruido PP.	34
Figura 3-7.- Imágenes con SEM del material prepreg utilizado en esta tesis.	34
Figura 3-8.- Imágenes con SEM del material pultruido utilizado en esta tesis.	35
Figura 3-9.- Imagen del linescan realizado mediante SEM para evaluar la afectación por el proceso del sizing.	36
Figura 3-10.- Resultado del linescan realizado mediante SEM sobre las situación de la Figura 3-9.	36
Figura 3-11.- Elemento que permite definir la resistividad volumétrica de un material.	37
Figura 3-12.- Representación de la discontinuidad y no homogeneidad del CFRP UD fabricado con láminas de prepreg.	38
Figura 3-13.- Representación del efecto de que los electrodos de contacto no tengas conexión con la misma fibra a ambos lados de la muestra de material de CFPR UD.	40
Figura 3-14.- Representación de la evolución de la conductividad de un material compuesto de CFRP en función de la densidad de fibras [32], [33].	40
Figura 3-15.- Esquema básico de la obtención de la resistividad por el método de los 2 puntos.	41
Figura 3-16.- Esquema básico de la obtención de la resistividad por el método de los 4 puntos.	42
Figura 3-17.- a) Representación de los puntos de aplicación de corriente y medida de potenciales sobre la probeta de material anisotrópico. b) Transformación de Wasscher mediante la cual se obtiene un paralelepípedo isotrópico equivalente [31].	43
Figura 4-1.- Detalle de cómo se variaba la presión sobre los contactos superficiales añadiendo peso sobre ellos.	51
Figura 4-2.- Evolución de la resistencia total de la probeta en función de fuerza aplicada sobre los electrodos de prueba. Los electrodos utilizados son los de cobre.	52
Figura 4-3.- Detalle del montaje para determinar el par de apriete a aplicar sobre los contactos.	52
Figura 4-4.- Evolución de la resistencia total de la probeta en función del par de apriete aplicado sobre los electrodos de prueba. Los electrodos utilizados son los de cobre.	52
Figura 4-5.- Detalle del estado del electrodo de aluminio después del ensayo.	53
Figura 4-6.- Detalle del sistema de fijación entre el electrodo de prueba y la probeta de CFRP.	53
Figura 4-7.- Medida en dirección X. Probeta de 5 mm. R _{Ic} : Corriente Creciente de la 1ª conexión;	55
Figura 4-8.- Medida en dirección X. Probeta de 3 mm. R _{Id} : Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	56
Figura 4-9.- Medida en dirección X. Probeta de 1,5 mm. R _{Id} : Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	57
Figura 4-10.- Montaje para determinar, por el método de los 2 puntos, la dependencia de la resistencia de la probeta con respecto a la corriente, en la dirección Y (transversal a las fibras).	57
Figura 4-11.- Medida en dirección Y. Probeta 1 de 5 mm. R _{Ic} : Corriente Creciente de la 1ª conexión;	58
Figura 4-12.- Medida en dirección Y. Probeta 2 de 5 mm. R _{Id} : Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	59
Figura 4-13.- Medida en dirección Y. Probeta de 3 mm. R _{Id} : Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	59

Figura 4-14.- Medida en dirección Y. Probeta de 1,5 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	60
Figura 4-15.- Montaje para determinar, por el método de los 2 puntos, la dependencia de la resistencia de la probeta con respecto a la corriente, en la dirección Z (perpendicular a las fibras). 60	
Figura 4-16.- Medida en dirección Z. Probeta de 5 mm. R_Ic: Corriente Creciente de la 1ª conexión;	61
Figura 4-17.- Medida en dirección Z. Probeta de 3 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	62
Figura 4-18.- Medida en dirección Z. Probeta de 1,5 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1ª conexión;	62
Figura 4-19.- Imagen térmica de la superficie de la probeta en el ensayo 1: a) al iniciar el ensayo; b) al finalizar el ensayo.	63
Figura 4-20.- Imagen térmica de la superficie de la probeta en el ensayo 2: a) al iniciar el ensayo; b) al finalizar el ensayo.	64
Figura 4-21.- Detalle del montaje para la medida por el método de 4 puntos y dimensiones de la probeta con la localización de los puntos de medida y la nomenclatura a utilizar.	75
Figura 4-22.- Detalle de las dimensiones de la punta del multímetro.	76
Figura 4-23.- Detalle de las dimensiones de la punta de prueba con resorte.	76
Figura 4-24.- Detalle de las dimensiones del borne de conexión estándar.	76
Figura 4-25.- Gráfico de las resistividades obtenidas en función del nº de la medida y del tipo de punta utilizada.	77
Figura 4-26.- Gráfico de las resistividades obtenidas en función del nº de la medida y de la cara de la probeta.	79
Figura 4-27.- Detalle de la superficie de contacto de la probeta donde se ha aplicado la pintura de plata para la medida de la resistividad en la dirección X.	83
Figura 4-28.- Detalle de la superficie de contacto de las probetas donde se ha aplicado la pintura de plata para la medida de la resistividad en la dirección Y y Z.	83
Figura 4-29.- Detalle del sistema de medida utilizando electrodos completos.	85
Figura 4-30.- Detalle del sistema de fijación de los nuevos electrodos.	86
Figura 4-31.- Detalle del sistema de fijación de los electrodos completos de la cara A y B.	87
Figura 4-32.- Detalle de la localización de los puntos de medida y la nomenclatura a utilizar.	92
Figura 4-33.- Detalle del sistema de medida utilizando como referencia de potencial el electrodo de potencial 0 V.	92
Figura 4-34.- Representación del mapa de potenciales en la probeta de CFRP. a) Potenciales sobre la cara A.	94
Figura 4-35.- Representación de la evolución de la diferencia de potencial entre las caras de la probeta de CFRP a lo largo de la misma.	94
Figura 4-36.- Representación 3D de la evolución de la diferencia de potencial entre las caras de la probeta de CFRP.	95
Figura 4-37.- Detalle de la colocación del electrodo de medida correspondiente al potencial del punto 4.	98

Figura 4-38.- Detalle del montaje del electrodo completo de aluminio para una coordenada de la probeta.....	98
Figura 4-39.- Detalle del montaje con todos los electrodos de medida montados simultáneamente.	99
Figura 5-1.- Representación de la estructura de spar cap de CFRP. a) Se representa como varía el ancho y el espesor del spar cap en función de la longitud del mismo. b) Vista ampliada de la sección de la estructura con sus elementos constitutivos. c) Imagen de la sección real de un spar cap.....	106
Figura 5-2.- A la izquierda se muestra el esquema del ensayo con contactos superficiales. A la derecha la imagen real del montaje realizado.	108
Figura 5-3.- Evolución Tensión-Corriente para el Ensayo S1.	109
Figura 5-4.- A la izquierda se muestra el esquema del ensayo con contactos superficiales en ambas caras. A la derecha la imagen de la conexión en ambas caras de la probeta.	110
Figura 5-5.- Evolución Tensión-Corriente para el Ensayo S2.	111
Figura 5-6.- a) Esquema del Ensayo S1 donde se representa el espesor efectivo (e'). b) Representa el comportamiento equivalente del Ensayo S2, con la inyección de corriente por ambas caras de la probeta.....	111
Figura 5-7.- Esquemas de las dimensiones de la probeta y distribución de los puntos de medida.	112
Figura 5-8.- Esquema del sistema de medida utilizado en el Ensayo S3.....	112
Figura 5-9.- Valores del Ensayo S3 con los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A.	113
Figura 5-10.- Valores del Ensayo S3 con los electrodos superficiales en la Cara B. La corriente inyectada es de 4,98 A.	114
Figura 5-11.- Valores del Ensayo S4 con la probeta PMG y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	116
Figura 5-12.- Valores del Ensayo S4 con la probeta PGG y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	117
Figura 5-13.- Valores del Ensayo S4 con la probeta PGG y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	117
Figura 5-14.- Dimensiones de las probetas del Ensayo S5 con el detalle de los puntos de medida de potenciales.	119
Figura 5-15.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PFE y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre	

ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	120
Figura 5-16.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PME y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	121
Figura 5-17.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PGE y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	121
Figura 5-18.- Esquema de la distribución de los puntos de medida de potencial al inyectar la corriente por ambas caras de la probeta.....	122
Figura 5-19.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PFE y los electrodos superficiales en ambas caras. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara A. b) Potenciales medidos en la cara B. c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	122
Figura 5-20.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PME y los electrodos superficiales en ambas caras. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara A. b) Potenciales medidos en la cara B. c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	123
Figura 5-21.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PGE y los electrodos superficiales en ambas caras. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara A. b) Potenciales medidos en la cara B. c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.....	123
Figura 5-22.- Comparativa de la evolución de la máxima diferencia de potencial (Max Vd) respecto del total de tensión medida en extremos de los electrodos superficiales para cada una de las probetas ensayadas.....	124
Figura 5-23.- Detalle de los tipos de conductores incluidos en este ensayo.....	127
Figura 5-24.- Esquema del montaje para el ensayo de impulsos de corriente.....	127
Figura 5-25.- Formas de onda de la tensión y corriente medidas. La amplitud de la corriente de pico aplicada es algo superior a 1,1 kA. a) Probeta PBC. b) Probeta PCC. c) Probeta PFA. d) Probeta PGA.....	128
Figura 5-26.- Formas de onda de la tensión y corriente medidas. La amplitud de la corriente de pico aplicada es algo superior a 1,1 kA. a) Probeta PFE con contactos superficiales en una cara. b) Probeta PFE con contactos superficiales en ambas caras. c) Probeta PME con contactos superficiales en una cara. d) Probeta PME con contactos superficiales en ambas caras.....	128
Figura 5-27.- Formas de onda de la tensión y corriente medidas. La amplitud de la corriente de pico aplicada es algo superior a 1,1 kA. a) Probeta PFE con contactos superficiales en una cara. b) Probeta PFE con contactos superficiales en ambas caras. c) Probeta PGE con contactos superficiales en una cara. d) Probeta PGE con contactos superficiales en ambas caras.....	129

Figura 5-28.- Representación de un tramo de spar cap de CFRP comprendido entre dos electrodos de equipotencialización con conexión superficial.....	131
Figura 5-29.- Esquema de la probeta utilizada para el Ensayo S7.....	131
Figura 5-30.- Esquema del sistema de medida. a) Tensiones sobre el eje longitudinal (V_{AAX}). b) Tensiones en dirección transversal (V_{ABX} y V_{ACX}).	132
Figura 5-31.- Impulso de corriente aplicado para la forma de onda lenta y tensión medida en el punto V_{AB3}	132
Figura 5-32.- Impulso de corriente para la forma de onda rápida y tensión medida en el punto V_{AB3}	132
Figura 5-33.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección de las fibras para el impulso con tiempo de frente lento.....	133
Figura 5-34.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección transversal a la fibras (AB y AC) para el impulso con tiempo de frente lento.	133
Figura 5-35.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección de las fibras para el impulso con tiempo de frente rápido.....	134
Figura 5-36.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección transversal a la fibras (AB y AC) para el impulso con tiempo de frente rápido.	134
Figura 5-37.- Comparativa de la distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección de las fibras para los impulsos aplicados (S – frente lento; F – frente rápido).	134
Figura 6-1.-Esquema de una WTB con las conexiones equipotenciales y la distribución de corriente. Causas de los posibles fallos.	142
Figura 6-2.- Diferentes secciones de la viga donde la distancia con los conductores de retorno se mantiene constante.	143
Figura 6-3.- Formas de onda y valores de la corriente total inyectada, de la corriente que circula por el bajante y de la corriente derivada por uno de los spar caps.....	144
Figura 6-4.- Valores de las mediciones extrapolados a los valores de la norma para la primera descarga de retorno en el nivel de protección LPL I.....	144
Figura 6-5.- Forma de onda de corriente inyectada en la con un frente de onda rápido.	145
Figura 6-6.- Diferencia de potencial entre el bajante y el spar cap de CFRP extrapolado a los valores de la norma para el nivel de protección LPL I.....	145
Figura 6-7.- Esquema del montaje para el ensayo de distribución de corriente.....	147
Figura 6-8.- Ejemplo del modelo de baja frecuencia representando el acoplamiento del circuito en P_i entre los segmentos c y d.	147
Figura 6-9.- Esquema del modelo electromagnético.	148
Figura 6-10.- Formas de onda de corriente obtenidas en [1]......	149
Figura 6-11.- Corrientes a través de bajante del LPS y de los dos spar caps de la viga de CFRP para una elevación respecto del plano de tierra de 0,5 m.	149
Figura 6-12.- Modelo EMM con 4 conductores de retorno y 1 m de separación respecto de la viga.	150
Figura 6-13.- Resultados de la distribución de corriente obtenidas con el modelo EMM. a) Considerando la resistencia de contacto nula. b) Con una resistencia de contacto de 200 m Ω	150

Figura 6-14. – Simulación FEM de la densidad de corriente en la zona de equipotencialización del electrodo unido al bajante y el laminado de CFRP.	151
Figura 6-15.- Formas de onda normalizadas. a) Impulso de tensión tipo rayo. b) Impulso de tensión tipo maniobra.	152
Figura 6-16.- a) Esquema básico de un generador de Marx. b) Modelo de 6 etapas implementado con Matlab.	153
Figura 6-17.- a) Forma de onda obtenida con el modelo de Matlab con 10 etapas y una tensión de carga de 100 kV. b) Forma de onda obtenida con el generador real utilizando 18 etapas y una tensión de carga de 35 kV.	154
Figura 6-18.- Resultado final del generador de Marx modular fabricado.	154
Figura 6-19.- Geometría de la probeta con la distribución de los electrodos sobre su superficie. ...	155
Figura 6-20.- a) potenciales medidos sobre la superficie donde se encontraban los electrodos. b) Potenciales medidos sobre la cara contraria a los electrodos. c) diferencia de potencial entre ambas caras.	156
Figura 6-21.- a) Configuración del ensayo y disposición de los electrodos. b) Imagen termográfica de la cara de los electrodos. c) Imagen termográfica de la cara opuesta a los electrodos.	156
Figura 6-22.- a) Configuración del ensayo y disposición de los electrodos. b) Imagen termográfica de la cara de los electrodos. c) Imagen termográfica de la cara opuesta a los electrodos.	157
Figura 6-23.- a) Configuración del ensayo y disposición de los electrodos. b) Imagen termográfica de la cara de los electrodos. c) Imagen termográfica de la cara opuesta a los electrodos.	157
Figura 6-24.- Imagen termográfica de la superficie de la probeta donde se encuentran los electrodos justo después del impulso.	158
Figura 6-25.- Comparación de la corriente inyectada y del potencial medido en el mismo punto para: a) el ensayo experimental; b) para el modelo de FDTD.	160
Figura 6-26.- Potenciales V_{ABX} y V_{ACX} a lo largo de la probeta para el impulso de corriente rápido obtenidos de forma experimental.	160
Figura 6-27.- Potenciales V_{ABX} y V_{ACX} a lo largo de la probeta para el impulso de corriente rápidos obtenidos mediante el modelo de FDTD.	160
Figura 6-28.- Potenciales V_{AAX} a lo largo de la probeta para el impulso de corriente rápido obtenidos: a) de forma experimental; b) mediante el modelo de FDTD.	161
Figura 6-29.- Simulación de la distribución de potenciales sobre la superficie del spar cap de CFRP cuando la conexión equipotencial es buena.	164
Figura 6-30.- Simulación de la distribución de potenciales sobre la superficie del spar cap de CFRP cuando la conexión equipotencial de es de buena calidad.	164
Figura 6-31.- Ejemplos de imágenes termográficas medidas sobre laminados de CFRP sometidos a corriente. a) y b) corresponde con distribuciones homogéneas y por tanto a conexiones correctas. c) y d) corresponde a diferentes tipos de defecto en la realización de las conexiones equipotenciales.	164
Figura 6-32.- Esquema y metodología de medida para la validación de la calidad de las conexiones.	165

Índice de tablas

Tabla 3-1.- Características de las probetas de CFRP utilizadas.	29
Tabla 4-1.- Probeta PG en dirección X. Valores de las dos medidas realizadas con dos Micro-Óhmetros diferentes.	55
Tabla 4-2.- Probeta PM en dirección X. Valores de las dos medidas realizadas con dos Micro-Óhmetros diferentes.	56
Tabla 4-3.- Probeta PF en dirección X. Valores de las dos medidas realizadas con dos Micro-Óhmetros diferentes.	56
Tabla 4-4.- Probeta 1 PG en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	57
Tabla 4-5.- Probeta 2 PG en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	58
Tabla 4-6.- Probeta PM en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	59
Tabla 4-7.- Probeta PF en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	60
Tabla 4-8.- Probeta PG en dirección Z. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	61
Tabla 4-9.- Probeta PM en dirección Z. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	61
Tabla 4-10.- Probeta PF en dirección Z. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.	62
Tabla 4-11.- Valores del ensayo 1 a corriente máxima en la dirección X.	63
Tabla 4-12.- Valores del ensayo 2 a corriente máxima en la dirección X.	64
Tabla 4-13.- Valores del ensayo a corriente máxima en la dirección Y.	64
Tabla 4-14.- Valores del ensayo a corriente máxima en la dirección Z.	65
Tabla 4-15.- Valores de temperatura de servicio para diferentes tipos de resina [12].	67
Tabla 4-16.- Valores de la resistividad en X obtenidos para las probetas de 5 mm.	68
Tabla 4-17.- Valores de la resistividad en X obtenidos para las probetas de 3 mm.	69
Tabla 4-18.- Valores de la resistividad en X obtenidos para las probetas de 1,5 mm.	69
Tabla 4-19.- Valores de la resistividad en Y obtenidos para las probetas de 5 mm.	70
Tabla 4-20.- Valores de la resistividad en Y obtenidos para las probetas de 3 mm.	70
Tabla 4-21.- Valores de la resistividad en Y obtenidos para las probetas de 1,5 mm.	70
Tabla 4-22.- Valores de la resistividad en Z obtenidos para las probetas de 5 mm.	71
Tabla 4-23.- Valores de la resistividad en Z obtenidos para las probetas de 3 mm.	71
Tabla 4-24.- Valores de la resistividad en Z obtenidos para las probetas de 3 mm.	72
Tabla 4-25.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5 _{plata4hA2'}	86
Tabla 4-26.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5 _{plata4hB2'}	86

Tabla 4-27.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5 _{plata4hA1'}	88
Tabla 4-28.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5 _{plata4hB1'}	88
Tabla 5-1.- Medidas de la probeta utilizada para el Ensayo S1.	108
Tabla 5-2.- Valores de R_T medidos con diferentes micro-óhmetros para el Ensayo S1.	109
Tabla 5-3.- Valores de R_T medidos con diferentes micro-óhmetros para el Ensayo S1.	110
Tabla 5-4.- Valores de las mediciones de la R_T realizadas en la probeta PFG.....	113
Tabla 5-5.- Detalle del tipo y espesor del material utilizado para este ensayo.....	115
Tabla 5-6.- Valores de la R_T medida para cada una de las probetas utilizadas.	116
Tabla 5-7.- Detalle del tipo y espesor del material utilizado para este ensayo.....	119
Tabla 5-8.- Valores de la R_T medida para cada una de las probetas utilizadas con los electrodos sólo en una cara.	120
Tabla 5-9.- Valores de la R_T medida para cada una de las probetas utilizadas con los electrodos en ambas caras.....	120
Tabla 5-10.- Resumen de los valores más significativos de las diferentes probetas estudiadas.	124
Tabla 5-11.- Evolución de la RT para cada probeta al disponer de contactos superficiales en una cara o en ambas.	125
Tabla 5-12.- Descripción de las probetas utilizadas para los ensayos de impulsos de corriente superficial.....	126
Tabla 5-13.- Descripción de los conductores utilizados para los ensayos de impulso de corriente.	127
Tabla 5-14.- Tabla de valores de R_T y Z_P de cada una de las probetas ensayadas.....	129
Tabla 6-1.- Tabla de valores máximos de los parámetros del rayo según los diferentes niveles de protección [3].....	142
Tabla 6-2.- Tabla de valores de I_P y AI para cada uno de los modelos estudiados.....	149
Tabla 6-3.- Comparación de los valores obtenidos con el modelo teórico (T) con los del prototipo (P) utilizando 10 etapas del generador de Marx.....	153

Capítulo 1

1 Introducción

En el contexto de transición energética en el que nos encontramos en la actualidad y con los objetivos marcados por Las Naciones Unidas para el 2030, el papel que debe jugar la energía eólica desde el punto de vista socioeconómico es evidente. Todos los actores presentes en la toma de decisiones son conscientes de ello y en la actualidad el esfuerzo que se está haciendo en esta dirección es más que relevante [1]. En el año 2020 la energía eólica instalada creció un 53% y se situó en los 743 GWh, siendo este año el de mayor capacidad instalada de la historia [2].

La energía eólica es fundamental en el camino hacia la sostenibilidad tanto en la búsqueda de una energía segura, asequible como sostenible. Cada uno de los actores presentes en este camino tiene retos importantes que afrontar. En este sentido, los fabricantes de aerogeneradores deben estar en la vanguardia tecnológica reduciendo costes, mejorando la eficiencia y aumentando su penetración en el mercado de la generación verde. Otro aspecto clave que se debe trabajar es el de la reducción del impacto ambiental en la creación de nuevos parques y potenciar la economía circular asociada a la energía eólica. Aquí, en el reciclaje de los materiales compuestos cada vez más utilizados en la fabricación de las palas de los aerogeneradores (WTB), queda trabajo por hacer aunque ya existen iniciativas importantes en esta dirección [3].

Algunos de estos aspectos aquí comentados necesitan ser estudiados con mayor profundidad con el fin de aportar conocimiento y avanzar en la dirección que la sociedad necesita. Para conseguirlo, la industria eólica debe fabricar aerogeneradores más eficientes, y esto va estrechamente relacionado con el crecimiento del tamaño de dichas estructuras. Uno de los elementos clave en este crecimiento son la longitud de las WTB. Algunos de los prototipos de aerogeneradores de mayor tamaño actualmente diseñados superan los 115 m de longitud de pala y alcanzan los 16 MW de potencia [4]. Para conseguir WTB de estas dimensiones, los materiales compuestos juegan un papel fundamental y requieren ser estudiados con detalle para poder incorporarlos correctamente en el desarrollo de estas enormes estructuras.

1.1 Evolución de los aerogeneradores y la necesidad de la protección contra el rayo

Este contexto, el de obtener energía verde a través de aerogeneradores cada vez más eficientes y con costes de producción más reducidos, ha hecho que el tamaño de las turbinas eólicas no haya parado de crecer y que constantemente se deba actualizar la infografía que muestra esta evolución.

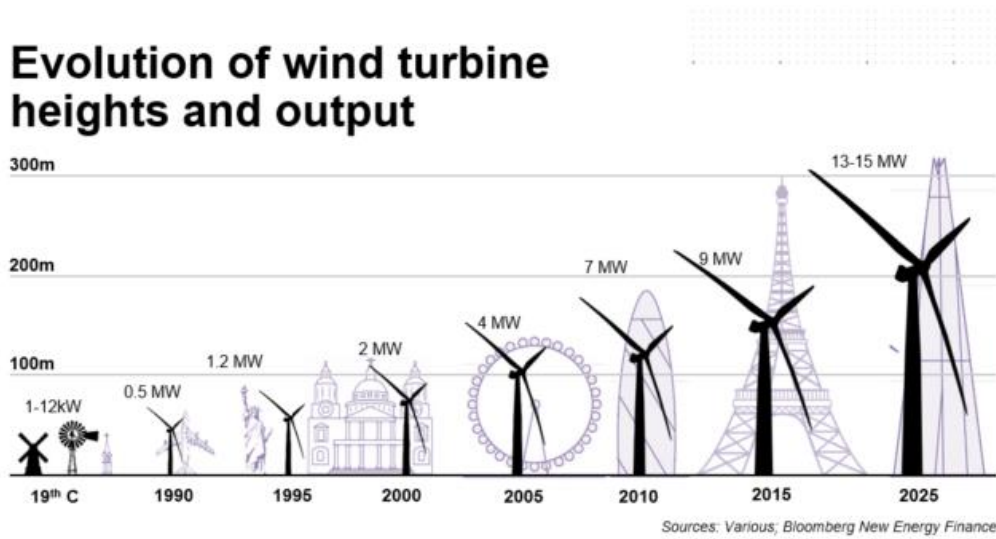


Figura 1-1.- Evolución del tamaño de las aerogeneradores [4].

Esta evolución en el tamaño de los aerogeneradores lleva asociado un efecto negativo y que requiere de un análisis importante a la vez de complejo. Este efecto negativo va estrechamente ligado a la gran altura que están alcanzando las turbinas eólicas y que, para poder aprovechar mejor el recurso del viento, deben instalarse en zonas remotas como zonas montañosas o en el mar. El acceso a estas zonas remotas incrementa de forma substancial el coste de mantenimiento asociado a fallos y reparaciones.

Esta gran altura de los aerogeneradores los hace estar más expuestos a las descargas atmosféricas y los daños en la WTB debidos a estos fenómenos son los que originan mayores costes y tiempos más largos de reparación, tiempos durante los cuales la turbina se encuentra fuera de servicio y no produce energía [5]-[7].

Derivado de esta afectación, en 2010 se aprobó la primera edición de la norma de protección contra el rayo en aerogeneradores, la IEC 61400-24 y que posteriormente fue actualizada [8].

Dado que las WTB son los elementos más expuestos a las descargas atmosféricas de un aerogenerador y teniendo en cuenta que el coste de las WTB de un aerogenerador puede suponer entre el 20 - 25% de su coste total, su protección contra el rayo se convierte en una tarea fundamental.

Al mismo tiempo que ha ido creciendo la longitud de las WTB, ha ido creciendo la incorporación de materiales compuestos en su fabricación. De manera especial, en la última década, los materiales compuestos de CFRP [9] están teniendo una gran presencia. Si la estructura de la WTB incorpora materiales compuestos conductores como los basados CFRP, el diseño del LPS que la proteja requiere de aspectos no triviales para garantizar una vida útil adecuada.

1.2 Motivación y objetivos de la tesis

La motivación por profundizar en el campo de la protección contra el rayo en aerogeneradores nace al tiempo que se crea el grupo de trabajo para el desarrollo de la norma IEC 61400-24, de la necesidad de poder incorporar elementos que ayudaran a los fabricantes de aerogeneradores a diseñar y validar los LPS que incorporaban en sus turbinas.

Gracias a la experiencia previa en la protección contra el rayo existente en el grupo de investigación (LRG – UPC), tanto por parte del responsable del grupo y director de esta tesis, como del doctorando que la presenta, se tuvo la posibilidad de realizar un ensayo de distribución de corriente de rayo sobre el prototipo de una viga que incorporaba compuestos de CFRP [8].

Con la experiencia adquirida gracias a ese ensayo se pudieron extraer las limitaciones que implicaba realizarlo, tanto desde el punto de vista de la dificultad técnica como de los costes; de las ventajas que aportaría el disponer de modelos fiables para el análisis y validación del LPS de una WTB; y de la necesidad de conocer y comprender el comportamiento de los compuestos de CFRP y de cómo integrarlos de la mejor en el LPS.

Esta tesis se inicia con el objetivo general de aportar conocimiento en estos aspectos y de profundizar en el comportamiento de los materiales compuestos de CFRP en particular, como elemento crítico para el correcto diseño del LPS de una WTB.

De manera particular se desea aportar conocimiento en aspectos como:

- La preparación del material compuesto de CFRP con el fin de obtener y analizar sus características eléctricas.
- Establecer las condiciones óptimas para la obtención del tensor ortotrópico de resistividades de los materiales compuestos de CFRP.
- Estudiar las implicaciones de las conexiones superficiales realizadas sobre los materiales compuestos de CFRP tanto en corriente continua como frente a impulso de corriente tipo rayo.
- La determinación de los parámetros necesarios para modelar una WTB y que aspectos tener en cuenta en función del tipo de modelado.
- Aportar soluciones a la industria que ayuden a mejorar el proceso de fabricación del LPS de una WTB.

1.3 Organización de esta tesis

Con el fin de facilitar el seguimiento de esta tesis a continuación se detalla la estructura planteada para la misma.

En este primer capítulo se ha realizado una breve presentación de lo que puede aportar la energía eólica en el contexto de la sociedad actual, de los retos que tiene por delante y sobre cuáles de ellos esta tesis espera aportar resultados que ayuden en su desarrollo.

En el Capítulo 2 se detalla la estructura que tienen las actuales WTB y como se han incorporado los materiales compuestos en su fabricación. Se hace una revisión detallada de los materiales compuestos de CFRP y de su comportamiento eléctrico y térmico. También se hace una revisión de cómo se debe tener en cuenta a la hora de diseñar el LPS de una WTB que incorpora este tipo de materiales y se acaba con una descripción de las técnicas más comunes utilizadas para el modelado de un WTB desde el punto de vista de la protección contra el rayo.

El Capítulo 3 está dedicado a los compuestos de CFRP utilizados en la tesis, las técnicas para la preparación del material, aspectos a tener en cuenta para su manipulación y preparación de las probetas de ensayo. Por último, se acaban revisando los aspectos a tener en cuenta para la obtención de la resistividad de materiales como los compuestos de CFRP y las técnicas más utilizadas en la actualidad.

Los Capítulos 4 y 5 están dedicados en su totalidad a todos los ensayos realizados sobre las probetas de material compuesto de CFRP. El objetivo es obtener la máxima información sobre el comportamiento de dichos materiales. En el Capítulo 4 se detallan aspectos críticos en la obtención de la resistividad en los compuestos de CFRP, de cómo dependen del tipo de material y de la influencia del sistema de medida. El Capítulo 5 está más dedicado al comportamiento del material cuando se realizan conexiones superficiales y el comportamiento frente a impulsos de corriente.

En el Capítulo 6 se hace un resumen de todos los trabajos y publicaciones en los que el doctorando ha participado relacionadas con el ámbito de estudio, así como de las aportaciones realizadas.

Esta tesis finaliza con el Capítulo 7 donde se presentan las conclusiones finales de este trabajo, ideas y líneas de futuro para seguir avanzando en este campo, y unas reflexiones personales.

1.4 Bibliografía

- [1] KPMG, “El impacto socioeconómico de la energía eólica en el contexto de la transición energética,” 2019.
- [2] AEE, “La eólica en el Mundo,” 2021. <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo> (accessed Mar. 07, 2022).
- [3] F. R. Linares-Moreno, “La energía eólica y la economía circular,” *Greenfiled*, 2019. <https://explotacionesagrariascampoverde.com/la-energia-eolica-y-la-economia-circular> (accessed Mar. 10, 2021).
- [4] Ewwind, “The World’s biggest wind turbines,” 2022. <https://www.evwind.es/2022/06/04/the-worlds-biggest-wind-turbines/86393> (accessed Jun. 12, 2022).
- [5] J. Montanyà, O. van der Velde, and E. R. Williams, “Lightning discharges produced by wind turbines,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, no. 3, pp. 1455–1462, Feb. 2014, doi: 10.1002/2013JD020225.
- [6] F. Rachidi *et al.*, “A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine blades,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2489–2496, 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.896443.
- [7] A. Candela Garolera, K. L. Cummins, S. F. Madsen, J. Holboell, and J. D. Myers, “Multiple Lightning Discharges in Wind Turbines Associated With Nearby Cloud-to-Ground Lightning,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 526–533, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2391013.
- [8] “UNE-EN IEC61400-24:2019 - Aerogeneradores. Parte 24: Protección contra el rayo.,” 2020.
- [9] B. L. Ennis *et al.*, “Optimized Carbon Fiber Composites in Wind Turbine Blade Design - SAND2019-14173,” Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2019.

Capítulo 2

2 Estructura de las palas de aerogenerador (WTB) y su protección contra el rayo

2.1 Introducción

En la actualidad existen un gran número de materiales disponibles para el desarrollo de cualquier tipo de proceso industrial o de producto. Algunos de ellos existen de manera natural en nuestro entorno y otros se obtienen mediante procesos artificiales. A su vez, todos estos materiales se pueden clasificar de diferentes formas, por ejemplo, según sus propiedades mecánicas, o por sus propiedades eléctricas, o en función de las aplicaciones donde se utilizan.

Cuando hablamos de un *Material Compuesto* nos estamos refiriendo a un material creado de forma artificial, mediante procesos manuales o industriales, y que se obtiene mediante la combinación de dos o más elementos. Al hablar de forma particular de *CFRP* (Carbon Fiber Reinforced Polymer) o Polímero Reforzado con fibras de Carbono, nos estamos refiriendo a un material compuesto que refuerza las propiedades mecánicas del polímero añadiendo fibras de carbono [1]–[5].

El uso del CFRP en la industria actual (aeronáutica, automoción, ...) ha tenido en la última década un crecimiento enorme [1],[4], [6] y el sector de la energía eólica no es una excepción [7]–[9]. En la fabricación de las primeras WTB, era más habitual el uso de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). El aumento de potencia de las turbinas eólicas y el consecuente crecimiento en el tamaño de sus palas, ha hecho que el CFRP se incorpore en la fabricación de las WTB. También hay fabricantes que optan por soluciones híbridas, combinando GFRP con CFRP, obteniendo las características mecánicas y de peso deseadas [7]. Las excelentes propiedades mecánicas del CFRP como su elevada resistencia, su gran rigidez o su elevada resistencia a la fatiga acompañadas de un bajo peso, han hecho que este material compuesto sea un elemento clave en el desarrollo de las WTB. Las características mecánicas de estos materiales compuestos son ampliamente estudiadas y documentadas [9]–[12] puesto que son la base para el diseño de cualquier estructura que deberá estar sometida a esfuerzos y cargas mecánicas.

En el caso particular de la industria aeronáutica y eólica, el hecho de que el CFRP sea conductor de la corriente eléctrica lo hace especial y obliga a tratarlo de forma diferente a otros materiales

compuestos como, por ejemplo, a los tradicionales con refuerzo de fibra de vidrio (GFRP). En especial cabe destacar lo crítico que puede resultar el comportamiento de este material frente a las descargas atmosféricas por el hecho de que, tanto los aviones como los aerogeneradores, se encuentran altamente expuestos a estos fenómenos [13]–[18]. En particular, el aumento de tamaño tan significativo que han tenido las turbinas eólicas en los últimos años, junto con la incorporación de estos nuevos materiales compuestos, hace que la protección frente al fenómeno de las descargas atmosféricas deba ser tenida muy en cuenta [18]–[20].

Resulta destacable indicar que los fabricantes de materiales compuestos con refuerzo de carbono sólo suelen incorporar en su hoja de especificaciones las propiedades eléctricas del filamento de carbono [12]. Esto es así porque, si ya el propio filamento de carbono puede cambiar su resistividad en función de su proceso de fabricación y material de base, el sistema de fabricación utilizado y la composición del laminado de carbono pueden hacer variar las propiedades eléctricas del conjunto mucho más [21]–[23]. De aquí se deriva la gran dificultad de poder determinar, desde el punto de vista eléctrico, las propiedades de una estructura de grandes dimensiones fabricada en base a este tipo de material compuesto.

Existen estudios que aprovechan estas propiedades conductoras de CFRP para poder detectar el deterioro de estructuras del material compuesto mediante el análisis de su resistencia eléctrica [24]–[29], pero no son tantos los trabajos realizados en el sentido de modelar, desde el punto de vista eléctrico, el comportamiento de los laminados de material compuesto con carbono en aplicaciones eólicas.

En el caso de la industria eólica y en particular en el de las WTB, este material debe tenerse muy en cuenta al diseñar el sistema de protección contra el rayo (LPS) [30]. Al tener que formar parte de este sistema de protección, se hace indispensable su modelado desde el punto de vista eléctrico para determinar la mejor manera de integrarlo junto al LPS. El poder estudiar su comportamiento frente a descargas de rayo mediante herramientas de simulación se convierte en algo fundamental debido al alto coste que implican los ensayos reales [31], [32].

Para poder modelar este tipo de estructuras de material compuesto, es necesario conocer su composición. Así que resulta básico conocer el proceso de fabricación de los laminados de CFRP para después, poder entender mejor cómo se ve afectado su comportamiento desde el punto de vista eléctrico. Una vez visto cómo se fabrica, que tipos hay y que particularidades tiene el compuesto de CFRP, podremos entrar en el estudio de sus propiedades eléctricas, como determinarlas y qué dificultades conlleva obtener unos valores de calidad.

2.2 Estructuras de las palas de los aerogeneradores

El objetivo de los materiales compuestos es, fundamentalmente, dotar a la pala de un comportamiento mecánico adecuado, soportando los diferentes esfuerzos a los que se encuentra sometida durante toda su vida útil. El uso de estos nuevos materiales reduce significativamente el peso del conjunto, manteniendo otras cualidades que podrían aportar los materiales convencionales.

Dado el coste y el proceso de industrialización, son diferentes los materiales que se utilizan para la fabricación de una pala, y multitud los estudios orientados a la optimización de su diseño [33]–[36].

Una WTB se puede descomponer en la *Raíz (Root)*, la *Concha (Shell)* y la *Viga o Estructura de soporte (Beam)*. Ésta última, a su vez, divide en dos partes: el *Alma de la Viga (o Shear Web)* y las *Alas de la Viga (o Spar Caps)*.

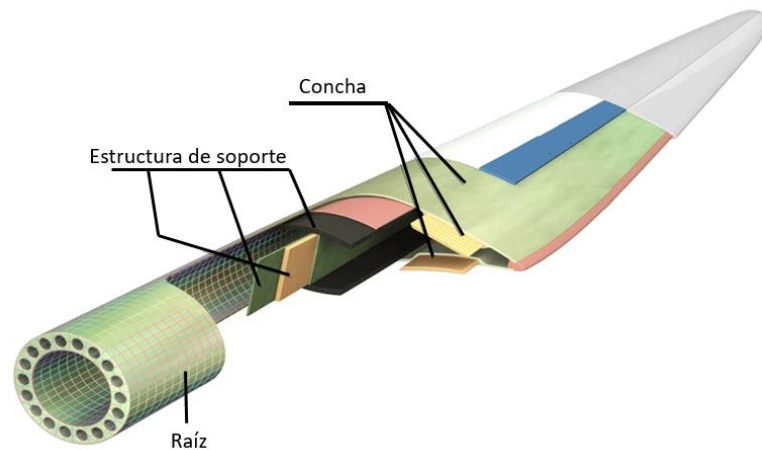


Figura 2-1.- Elementos básicos de una pala de aerogenerador (WTB). Adaptado de [37].

Como el diseño de la estructura de la pala acaba determinado que materiales se deben utilizar y su dimensionado, es conveniente conocer los diseños más habituales, así como donde suelen incorporarse los compuestos de CFRP. En este sentido, donde suele haber más variedad de soluciones es en la estructura de soporte o viga que sustenta la pala.

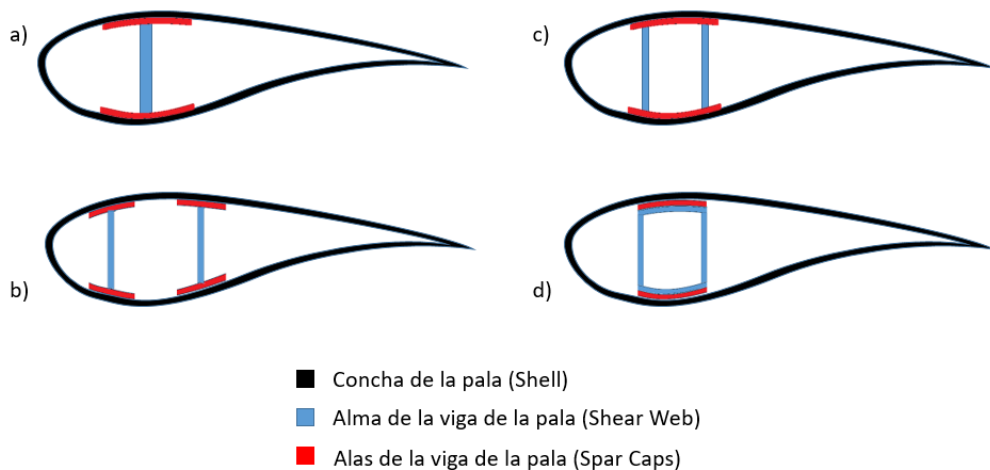


Figura 2-2.- Diferentes soluciones para la estructura de soporte de una pala de aerogenerador. Adaptadas de [38],[40].

Desde el punto de vista de este trabajo, sólo se hará referencia de forma más explícita a las partes que incorporan CFRP (en la Figura 2-2, corresponden a los elementos de color rojo), pero es evidente la gran variedad de materiales compuestos necesarios para la fabricación de una WTB que cumpla con las exigencias actuales.

Si se observa la estructura de la pala y se desea modelar su comportamiento eléctrico, la parte más significativa será la que incorpora el CFRP. Esta parte es la que debe integrarse en el LPS y es por donde circulará parte de la corriente del rayo. Así que, en función de cómo se fabrique este laminado y como se conecte con al LPS, el comportamiento eléctrico del conjunto variará. Es por esto que sea necesario conocer todas estas particularidades.

El ancho y el espesor de los spar caps de CFRP de una WTB no es uniforme por cuestiones mecánicas, siendo más estrecho y fino en la punta, y más ancho y grueso a medida que nos alejamos de ella en dirección a la raíz de la pala [38],[39]. Este espesor variable de los spar caps, dependiendo de la zona de la viga donde nos encontremos, deberá fabricarse apilando capas de CFRP. Según el tipo de material base de CFRP utilizado, el número de éstas capas variará para conseguir las prestaciones mecánicas deseadas.

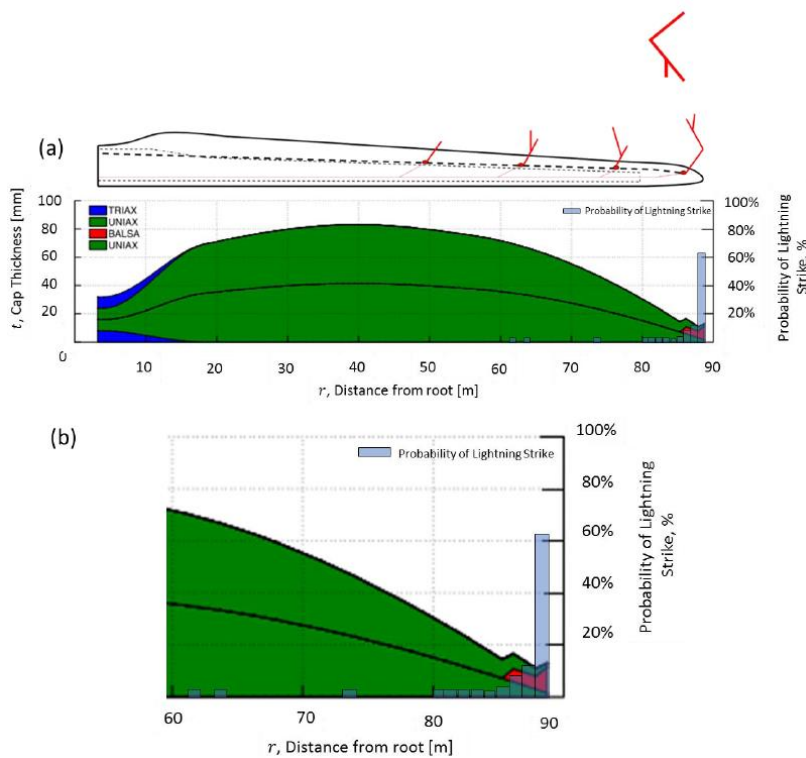


Figura 2-3.- Evolución del espesor del spar cap de una pala de 88 m. Incluye la probabilidad de impactos de rayo a lo largo de la longitud de la WTB [40], [41].

Esta situación hace pensar que la unión de los spar caps con el LPS tendrá multitud de alternativas, ya que se debe garantizar que:

- La corriente del rayo que pase a través de la estructura de CFRP nos lo pueda dañar.
- Que no se generen diferencias de potencial entre capas de CFRP que podrían originar arcos eléctricos en el interior de la estructura de CFRP, siendo estos también muy perjudiciales para el material.
- Que no se generen diferencias de potencial entre la estructura de CFRP y el bajante del LPS, ya que también podría originar arcos eléctricos y dañar dicha estructura.

Al mismo tiempo, si se desea realizar un modelado de esta estructura de CFRP, no se puede considerar una estructura única de espesor variable, sino que deben representarse las capas de material utilizado. Esto es debido a que, al crear la estructura completa, entre los diferentes laminados habrá zonas ricas en resina y otros materiales que dificultarán el paso de la corriente de unos a otros.

Esta situación pone de manifiesto, todavía más, la importancia de la resistividad del material en la dirección perpendicular a las fibras, es decir, a través de su espesor. También será necesario conocer cómo es la superficie de contacto entre laminados del CFRP, el número de capas existente en cada zona del spar cap y, por último, cómo son las conexiones eléctricas con el LPS, cuántas hay y cómo se encuentran distribuidas a lo largo de la estructura de CFRP.

Por tanto, dado que cada fabricante tendrá su diseño (tipo de material, espesor del material, longitud y distribución a lo largo del spar cap, nº de conexiones equipotenciales, ...), la mejor forma de enfocar este estudio será abordando el estudio individual de las láminas de CFRP que se utilizan como base para crear estructuras más grandes y variables, como en la fabricación de WTB. Una vez conocido el material base y conocida una configuración concreta se podrá crear un modelo que refleje, de mejor manera, la realidad. También se podrán estudiar diferentes configuraciones, buscando la que tenga un mejor comportamiento.

2.3 Descripción del material compuesto con carbono (CFRP)

De manera general, los materiales compuestos y en particular los que incorporan carbono (CFRP), se fabrican a partir de dos elementos básicos, las *fibras de carbono* que constituyen el refuerzo del material, y la *matriz* que constituye el elemento encargado de soportar y mantener las fibras unidas, así como de transferir los esfuerzos mecánicos aplicados a dichas fibras [42]. La matriz suele ser una *resina (o polímero)*.

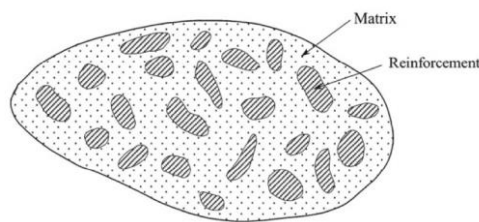


Figura 2-4.- Representación de la estructura de un material compuesto [11].

Para que estos dos elementos se unifiquen y consigan las propiedades deseadas existe un tercer elemento que ayuda en esta unión, el *apresto*, y que consiste en un tratamiento superficial de las fibras [43]. Sobre este tratamiento superficial, los fabricantes de compuestos de CFRP no suelen dar mucha información por constituir una parte importante de su know how.

Las fibras de carbono para fabricar el material compuesto se obtienen mediante un proceso de oxidación, carbonización y grafitación de una sustancia rica en carbono. Aunque existen otros precursores, el más común en la fabricación del material compuesto para la fabricación de palas es

el peroxiacetilnitrato (PAN). Esto se debe a su menor coste y facilidad de manipulación. Según se realice el proceso para la obtención de la fibra, especialmente la temperatura de la grafitación, las fibras de carbono obtenidas tendrán unas propiedades mecánicas y eléctricas diferentes [12]. El diámetro del filamento obtenido suele oscilar entre 5-9 μm .



Figura 2-5.- Carretes con un haz múltiple de fibras de carbono [44].

Se puede fabricar material compuesto con refuerzo de fibras de carbono donde se utilicen fibras cortas y dispuestas aleatoriamente en el seno de la matriz que las envuelve. La densidad de fibras respecto del volumen total del material compuesto determina las propiedades de éste. También se pueden utilizar fibras de gran longitud dispuestas en paralelo y todas en la misma dirección. Este último caso suele ser el utilizado para la fabricación de WTB y, aunque según el elemento a fabricar disponer de un carrete con un haz múltiple de las fibras de carbono (Figura 2-5) puede resultar práctico, no es el caso del proceso de fabricación de las WTB donde este formato no resulta útil.

Es en este punto donde entra en juego el segundo elemento del material compuesto, la resina o matriz. La combinación de ambos elementos (las fibras y la matriz) acaba conformando la base del material compuesto. La matriz también aporta unas características mecánicas al compuesto final y es por esto que existen una gran variedad de polímeros para este fin [42]. Las resinas o polímeros utilizados para la fabricación de materiales compuestos se clasifican en termoestables y termoplásticas, dependiendo de su comportamiento térmico. Las resinas termoplásticas pueden fundirse y solidificarse de forma repetida sin que aparentemente pierdan propiedades, pero necesitan temperaturas altas de trabajo. Por otro lado, las resinas termoestables trabajan con temperaturas de curado más bajas, pero una vez endurecidas ya no puede modificar su estado. Esto complica el reciclado de materiales compuestos realizados con este tipo de polímeros. En la actualidad, las resinas termoestables son las más utilizadas para la fabricación de palas ya que las temperaturas y presiones más bajas facilitan el curado. Suelen utilizarse resinas epoxi o de poliéster, aunque se está trabajando mucho en la mejora de estos materiales [7].

Tal y como se ha comentado, existe un tercer elemento, el apresto, el cual tiene como objetivo el favorecer la mejor unión de los dos elementos principales, proteger las fibras de daños debidos a fricción y reducir huecos en el material compuesto durante los procesos de impregnación y curado. Por tanto, este apresto dependerá de la matriz utilizada [43].

Dependiendo de la geometría de la estructura que se desee obtener y de su tamaño, resulta más práctico y rentable utilizar el material compuesto en un formato u otro [45]. En la actualidad, los más

comunes en el sector de la energía eólica son las Láminas de Prepreg y los Perfiles Pultruidos. Dependiendo del formato del material compuesto el proceso de fabricación puede variar, así como la composición interna de la estructura final.

- **Láminas de Prepreg:** Este formato para el suministro del material compuesto consiste en finas láminas donde los filamentos de refuerzo se encuentran impregnados de una resina termoestable. El proceso de curado en condiciones adecuadas de temperatura y presión, desencadena una reacción química que modifica la estructura flexible de esta lámina de prepreg para convertirla en un material sólido de larga durabilidad, resistente a la temperatura, de una elevada rigidez y muy liviano.

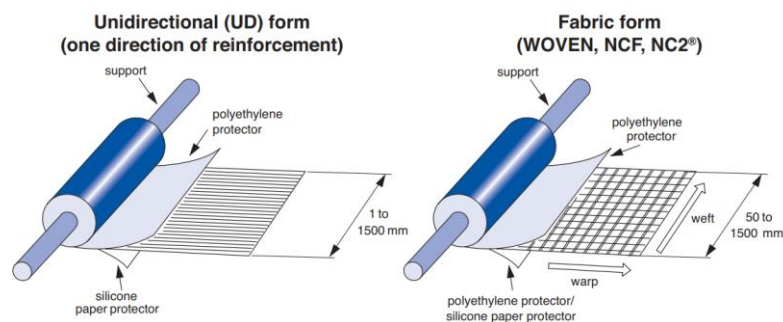


Figura 2-6.- Formato en el que se suelen suministrar las láminas de Prepreg de material compuesto [46].

Aunque en este caso el estudio se centra en CFRP, las láminas de prepreg las podemos encontrar con otros tipos de refuerzo (fibra de vidrio, aramidas, ...). En el caso de la fabricación de WTB, los esfuerzos mecánicos que debe soportar la viga hacen que los spar caps se fabriquen con láminas de fibras unidireccionales (CFRP UD). En otros elementos estructurales de la pala se pueden encontrar otros materiales compuestos y láminas con fibras en más de una dirección.

Para crear una estructura o un perfil de material compuesto a partir de láminas de prepreg se van depositando, normalmente sobre un molde, tantas láminas como sea necesario. En ocasiones, según las características mecánicas de la estructura que se desean conseguir, se pueden combinar láminas con diferentes tipos de refuerzo y con fibras en varias direcciones. Con este proceso de capas se consigue una estructura de las características mecánicas deseadas. Evidentemente el proceso finaliza con el correspondiente proceso de curado, quedando todas las láminas en un bloque compacto. Inicialmente, este fue el proceso más utilizado para la fabricación de WTB [45].

- **Perfiles Pultruidos:** En los últimos años ha tomado fuerza el uso del material compuesto obtenido por pultrusión, lo que permite obtener perfiles de mayor sección que las láminas de prepreg, con mayor densidad de fibras y con geometrías concretas pero uniformes [45]. Al igual que con las láminas de prepreg, estos perfiles de material compuesto se pueden combinar para crear estructuras mayores. El uso de este tipo de perfiles de material compuesto reduce los tiempos y costos de fabricación de las palas. También aporta ventajas desde el punto de vista de sus propiedades eléctricas.



Figura 2-7.- Formatos de perfiles de CFRP obtenidos por pultrusión [45].

Habitualmente, cualquier estructura o perfil de CFRP fabricado con láminas de prepreg o pultruido, lleva en sus caras externas una tela denominada Peel Ply.



Figura 2-8.- Probeta de carbono donde se está eliminando la peel ply para su posterior fase de pulido.

Esta tela suele ser habitualmente de nylon o poliéster con un baño antiadherente, que normalmente es de silicona o poliamida. Sus funciones son varias:

- La principal es absorber el exceso de resina durante el proceso de curado del laminado.
- También evita la contaminación de la superficie con sustancias que puedan afectar a su unión con otros materiales para formar otras estructuras de mayor tamaño.
- Al retirar la peel ply, se confiere una rugosidad superficial que mejora la adherencia de otros laminados o de la pintura.

El inconveniente, desde el punto de vista eléctrico, es que al quitar la peel ply queda un exceso de resina en la superficie. Por tanto, si se desea realizar una conexión eléctrica sobre la superficie del laminado se debe realizar un pulido fino para eliminar este exceso de resina y tener contacto directo con las fibras.

2.4 Características eléctricas del CFRP

Si se analizan los materiales compuestos en base a su comportamiento eléctrico y térmico, es necesario observar las características individuales de los dos elementos fundamentales que lo forman, las fibras que componen el refuerzo del material y la matriz que garantiza la estructura del conjunto. En el caso de los CFRP, estos dos elementos tienen características claramente diferentes, afectando al conjunto del material compuesto.

La resistividad de las fibras de carbono, si bien pueden variar según el fabricante y el proceso utilizado, se mueve alrededor de $10^{-5} \Omega\text{m}$. Es decir, es bastante buen conductor. Por otro lado, tenemos la matriz, formada por resinas de diferentes características y que se pueden mover en resistividades entre $10^{10} - 10^{20} \Omega\text{m}$ [47].

Inicialmente, suponiendo un caso ideal de CFRP UD, la estructura de un laminado se podría representar tal y como se muestra en la Figura 2-9. Es decir, dada una determinada geometría y un determinado volumen de fibras, éstas se repartirían de forma uniforme y lineal a lo largo del material.

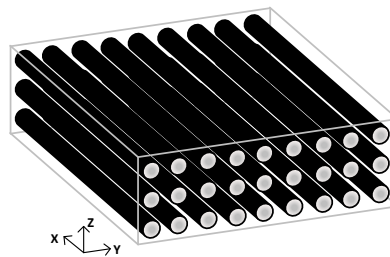


Figura 2-9.- Representación ideal de un laminado de CFRP UD.

Si asumimos esta representación ideal, la conducción eléctrica de la corriente del CRFP UD sólo tendría sentido en la dirección de las fibras (X), ya que en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras no podría haber conducción de corriente porque las fibras estarían aisladas unas de otras. Si las fibras no se tocan entre sí, dado el carácter aislante de la matriz, la conductividad en las direcciones ortogonales a las fibras sería nula.

En la realidad, y debido al proceso de fabricación, las fibras no son completamente paralelas entre sí y llegan a tocarse entre ellas, lo que acaba permitiendo el paso de la corriente en las direcciones transversal y perpendicular a las fibras.

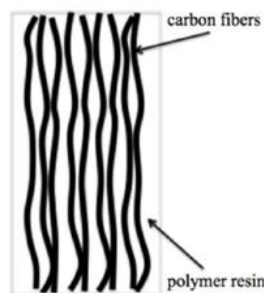


Figura 2-10.- Representación de cómo se encuentran distribuidas las fibras en un CFRP UD en el plano X-Y [48].

La resistencia que representa el contacto entre fibras también está influenciada por el apresto (sizing), del cual suele haber muy poca información como se ha comentado con anterioridad. Pero es evidente que acaba afectando a la resistividad equivalente del material en las direcciones ortogonales a las fibras.

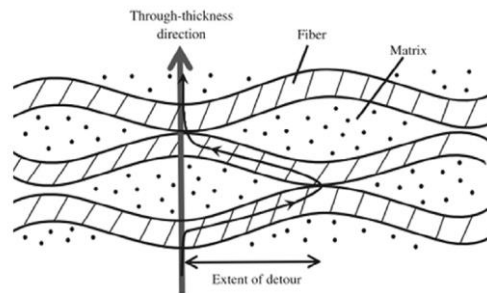


Figura 2-11.- Representación del paso de la corriente en la dirección perpendicular a las fibras en función de los contactos entre ellas [47].

Esta resistencia de contacto entre dos conductores fue estudiada con detalle por Holm [49], indicando que su valor depende de la resistividad de los conductores y del área de contacto entre ellos.

En base a este conocimiento, se puede afirmar que la resistividad en las direcciones ortogonales a las fibras dependerá de estos contactos entre fibras y que, a su vez, estos contactos dependerán de la densidad de fibras existentes en el material, del proceso de fabricación (prepreg o pultruido). Un trabajo interesante en este sentido es el de Y. Hirano et al. [50], donde se estudia la resistividad de un laminado de CFRP fabricado con láminas de prepreg en la dirección Z del material. En él se muestra la dependencia de este valor con respecto al proceso de fabricación. La geometría del laminado, es decir, de su ancho y espesor, también determinará el número de contactos que puede haber entre las fibras y, por tanto, los posibles caminos por donde podría circular la corriente [50], [51]. Esta puede ser una de las causas por las que la resistividad en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras sea diferente, tal y como aparece en la mayoría de referencias consultadas.

Además, en el caso de los CFRP, al tener un elemento conductor de la electricidad como son las fibras de carbono, inevitablemente llevará asociado un efecto térmico (por efecto Joule) que alcanzará a la matriz que lo envuelve. La conductividad térmica de las fibras de carbono frente a de la matriz también es completamente diferente, lo que hace que al igual que con la resistividad del CFRP, la conductividad térmica también sea anisotrópica. Si los incrementos de temperatura son elevados, se pueden ver afectadas las características mecánicas del material.

Los daños que dan lugar a esta pérdida de características mecánicas en los materiales compuestos se pueden clasificar en: *daños en las fibras de refuerzo*, *deterioro en la resina* que forma la matriz, y *delaminación* del material compuesto [38]. En este trabajo de Y. Hirano et al. se muestra la estrecha relación existente entre la carga eléctrica aplicada al material compuesto y el área de resina afectada. También se observa la dependencia de la delaminación del material en relación con la energía específica aplicada (acción integral) del impulso de corriente aplicado. Por último, se observa una estrecha relación entre el daño en las fibras y la profundidad afectada del material en relación con el

valor de pico del impulso de corriente. Estos comportamientos tienen una estrecha relación con el carácter anisotrópico que caracteriza a los CFRP y, por tanto, dependiendo de si el laminado de material compuesto dispone fibras en una única dirección o en varias, estos comportamientos pueden variar.

2.5 Protección contra el rayo en aerogeneradores. UNE-EN IEC 61400-24

Debido a la gran evolución de la energía eólica en las últimas décadas y la clara afectación de este tipo de estructuras por las descargas atmosféricas, fue necesario desarrollar una norma internacional para armonizar los criterios sobre la protección de aerogeneradores, la evaluación del riesgo de recibir impactos según su ubicación, dimensiones, etc., así como los ensayos para validar los diseños implementados [30].

Los elementos del aerogenerador que requieren una atención especial a la hora del diseño del sistema de protección (LPS) son las palas (WTB). Son las partes del aerogenerador más expuestas y, por tanto, las que reciben un mayor número de impactos de toda la estructura. Es por esto que la norma le dedica una gran parte de la misma a sus aspectos constructivos, a los criterios de protección, a los ensayos para validar dichos elementos de protección o para validar los puntos que tiene esta mayor probabilidad de impacto.

Dado que los ensayos recomendados en la norma son costosos y no siempre es posible realizarlos, la norma abre la posibilidad de validar el LPS por diferentes vías:

- Mediante ensayos específicos de alta tensión y/o alta corriente.
- Demostrando la similitud del LPS de la pala con un previamente validado por el método anterior.
- Utilizando un análisis o simulaciones que hayan sido validadas con resultados de ensayos previos en laboratorio.

Estas dos últimas vías de validación abren la puerta y dotan de importancia a la obtención de modelos ajustados de la WTB+LPS. Así, posteriormente, podremos utilizar estos modelos durante el proceso de validación de una nueva pala y reducir los costes de ensayos en laboratorio.

Uno de los aspectos que se detalla en la norma respecto al LPS es que se deben tener en cuenta todos los elementos conductores utilizados en la fabricación de la WTB. Es por esto que, si se utiliza el CFRP en el desarrollo estructural de la WTB, la interacción de este material compuesto con el LPS deberá ser analizada.

Por tanto, el LPS de la WTB debe tener en cuenta todos los elementos conductores y las conexiones entre ellos, que permiten conducir la corriente del rayo desde los receptores hasta la raíz de la misma, para después ser derivada hasta tierra. Si existen varios caminos posibles por donde la corriente del rayo puede circular en este recorrido hasta la raíz de la WTB, es necesario escalar la magnitud de la corriente y las formas de onda de acuerdo con la corriente que circulará por cada uno de estos caminos.

Aunque la norma contempla la posibilidad, según la estrategia seguida para el diseño del LPS, de dejar aislada la estructura de CFRP, lo más habitual y seguro suele ser equipotencializar esta estructura con el bajante del LPS.

Desde el punto de vista del ensayo y verificación del LPS de una WTB la norma separa dos vías. Los ensayos en alta tensión, orientados hacia la determinación de los puntos de impacto del rayo, la identificación de los caminos que puede tomar la corriente del rayo y los puntos donde se pueden producir descargas derivadas de este fenómeno. En estos ensayos, la amplitud de la corriente aplicada no es comparable a la de un rayo real.

Es por esto que la otra vía de ensayos, la de inyectar altas corrientes, es la orientada a evaluar los daños que se pueden originar por el efecto de la conducción de la corriente asociada a una descarga tipo rayo. Estos ensayos se pueden aplicar a WTB completas o a partes y elementos de la misma. La norma define los valores máximos de los parámetros del rayo según el nivel de protección deseado.

Al realizar ensayos de partes o elementos de la WTB, la amplitud de la corriente inyectada debe ser proporcional a la parte que se espera en ella. Para ello, la norma hace referencia a que el fabricante debe definir estos parámetros, es decir, indicar que corriente puede llegar a circular para cada camino posible desde el punto de impacto hasta la raíz de la WTB.

Es aquí donde, un ensayo con la WTB completa, es decir, con sus dimensiones totales y con todos los circuitos, conexiones y elementos presentes, resulta de gran utilidad para saber cómo se distribuye la corriente del rayo a través de todos ellos. A su vez, dado el coste y la dificultad de realizar este ensayo con una WTB completa, si se realiza este ensayo para una WTB en concreto y se obtiene un modelo numérico que ayude a predecir cómo se distribuirá la corriente a lo largo de toda ella y sus elementos, puede resultar de mucha utilidad en la validación de nuevas WTB en las que su diseño incorpore un LPS de características similares.

2.6 Técnicas para el modelado de una WTB

Una vez llegados a este punto queda presentada la estructura de una WTB, los materiales que se suelen utilizar en su construcción, donde suelen encontrarse las estructuras de CFRP y que alternativas existen para fabricarlas. Al mismo tiempo, un modelo completo donde estuvieran incluidos todos los elementos que recorre la corriente del rayo desde los receptores hasta la raíz de la pala, debería incluir:

- *El bajante*, que puede estar formado por un único conductor o por más de uno, pudiendo ser éstos de diferente tipo (conductores cilíndricos, conductores planos, bandas conductoras, ...).
- *Los spar caps*, que tiene una geometría variable a lo largo de la longitud de la pala y que para crearlas se pueden utilizar diferentes tipos de materiales base de CFRP y diferentes métodos de fabricación.
- *Las conexiones*, que permitirán la unión entre los dos elementos anteriores. El número de estas conexiones a lo largo de la pala y cómo se realicen, también influirán en cómo se distribuirá la corriente del rayo.

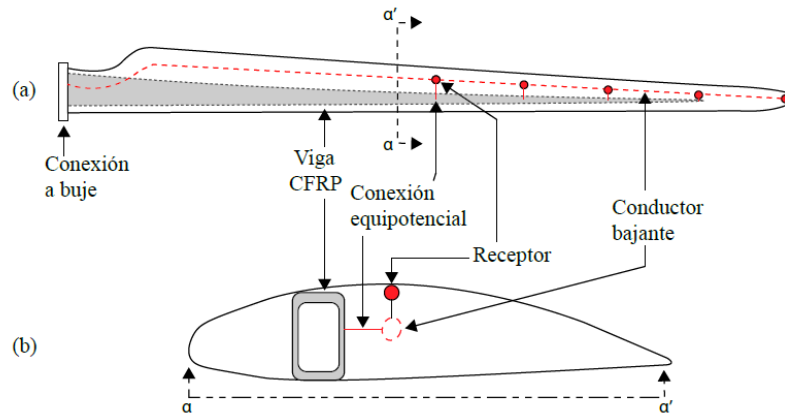


Figura 2-12.- Esquema típico de una WTB con el LPS. a) Aparecen todos los elementos de la pala. b) Sección transversal de la pala [52].

Un buen diseño del LPS de una WTB debe garantizar que el punto de impacto del rayo se produzca sobre los receptores presentes en la punta de la pala. A su vez, debe permitir que la mayor parte de la corriente del rayo fluya a través del bajante del LPS.

El objetivo de la equipotencialización entre el bajante y los spar caps es evitar la aparición de arcos eléctricos originados por las diferencias de potencial entre ambos elementos al paso de la corriente del rayo. Al realizar esta conexión entre ambos elementos, una parte de esta corriente fluirá a través de los spar caps de CFRP presentes en la viga de la pala y, por tanto, la manera de realizar estas conexiones determina en gran medida la parte de la corriente a través de estas estructuras.

Así que, como esté constituida la estructura de CFRP de los spar caps y como sea la unión de estos con el bajante, será determinante en esta distribución de corriente. Otro de los objetivos importantes es conseguir una distribución de la corriente lo más homogénea posible por la estructura de CFRP, reduciendo así la densidad de corriente y, por tanto, los daños que pueda sufrir el material [53].

Dependiendo del tipo de información se desee obtener de un modelo será mejor utilizar una técnica u otra. Es por esto que a continuación se hace un breve repaso de los métodos más utilizados en este campo, indicando lo que puede aportar cada uno de ellos y que limitaciones o inconvenientes puede tener.

2.6.1 Modelado en baja frecuencia

Un modelo en baja frecuencia permite representar todos los elementos conductores de un sistema mediante un circuito eléctrico con parámetros concentrados o distribuidos. En estos modelos la influencia del Campo Eléctrico (E) viene representada por capacidades (C), el Campo Magnético (H) viene representado por las autoinductancias (L) y las inductancias mutuas (M) y la circulación de la corriente por los diferentes elementos se representa mediante resistencias (R) y conductancias (G) [54]. Este tipo de modelos pueden resultar muy útiles y prácticos a la hora de determinar cómo se distribuyen las corrientes por cada elemento de la WTB, así como su amplitud y forma de onda.

Para el caso de una WTB, el circuito simplificado que la representa podría tener la forma [55], [31]:

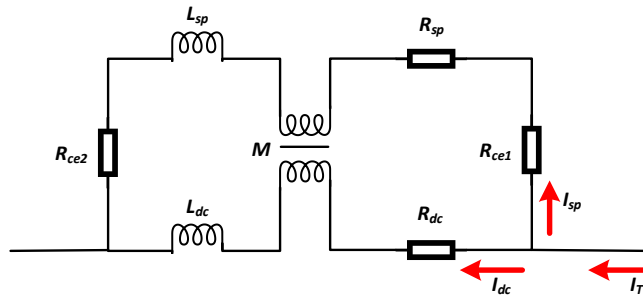


Figura 2-13.- Modelo simplificado del LPS integrado por el bajante, el spar cap de CFRP y las uniones equipotenciales. Adaptado de [31].

donde R_{dc} sería la resistencia del conductor bajante, L_{dc} sería la autoinductancia del conductor bajante, R_{sp} sería la resistencia del spar cap, L_{sp} sería la autoinductancia del spar cap y M sería el acoplamiento inductivo entre ambos circuitos. Las resistencias R_{cex} representan cada uno de los contactos entre el spar cap y el bajante. En este modelo no se han incluido ni las capacidades ni las conductancias por ser poco significativa su influencia [56].

La adaptación de este modelo simplificado a una WTB real requeriría de algunas adaptaciones.

1. Trabajar con un modelo distribuido en lugar de concentrado. Dada la longitud actual de las WTB, el número de conexiones equipotenciales, la sección variable de los spar caps, etc., daría más calidad a los resultados obtenidos.
2. También debería incluir la totalidad de bajantes, ya que puede haber más de uno. La resistencia del conductor bajante (R_{dc}) debería incluir el efecto pelicular asociado a las componentes de alta frecuencia del impulso de corriente.
3. La resistencia del spar cap (R_{sp}) no es uniforme. Ésta dependerá del punto de la pala, ya que el número de laminados variará, así como de los puntos donde se realicen las conexiones equipotenciales. También dependerá del tipo de CFRP utilizado.

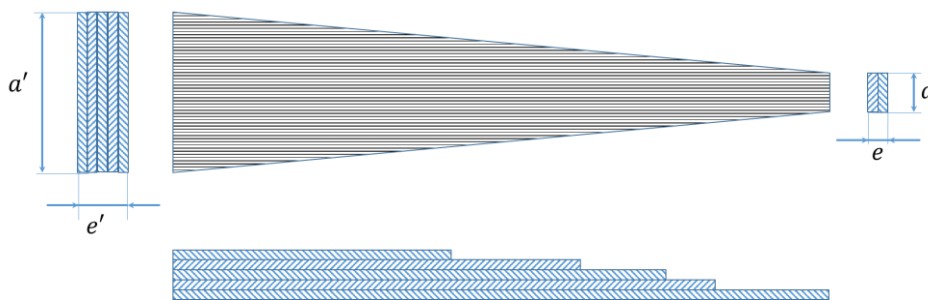


Figura 2-14.- Esquema que refleja la dependencia del valor de R_{sp} en función del punto de conexión.

4. La resistencia de los contactos (R_{cex}) dependerá de la sección del spar cap donde se realice cada conexión y de cómo se implemente la misma.

Es evidente que, en un modelo simplificado, se podría representar una $R_T = R_{ce1} + R_{sp} + R_{ce2}$, en la que estaría el total de la resistencia entre dos conexiones equipotenciales. Este valor sería más fácil de determinar sobre una pala real.

5. Las autoinductancias y las inductancias mutuas no son tan fáciles de obtener. Una manera de determinarlas puede ser con la ayuda de técnicas basadas en el método de elementos finitos (FEM) [57].

La determinación de la corriente esperada por cada elemento gracias a un modelo TLM, permite realizar ensayos específicos de cada elemento bajo las condiciones encontradas. Este tipo de ensayos individuales resultan más sencillos que los de pala completa y permiten evaluar pequeñas modificaciones sobre elementos existentes en un diseño previo. Algo que la norma [30] contempla.

2.6.2 Modelado con FEM

El modelado mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) resulta útil para el estudio de condiciones quasi-estáticas y combinando comportamientos como, por ejemplo, el eléctrico y el térmico [58],[59]. No es óptimo si lo que se desea observar es un comportamiento transitorio como el circuito LPS de una WTB cuando es atravesado por una corriente transitoria.

Para analizar y validar comportamiento el eléctrico y/o térmico de un laminado de CFRP bajo unas condiciones concretas esta técnica resulta muy útil. También es de gran utilidad, tal y como se ha comentado anteriormente, para determinar parámetros eléctricos y magnéticos de un material conductor al ser recorrido por una corriente eléctrica, sólo conociendo la geometría del elemento y sus propiedades.

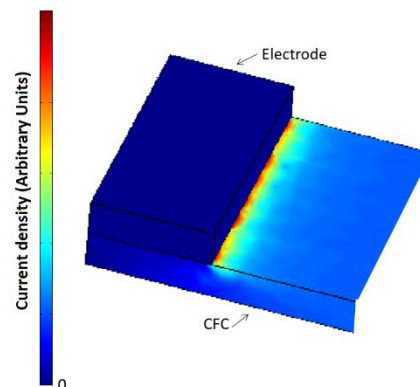


Figura 2-15.- Simulación de la densidad de corriente en la superficie de conexión entre un electrodo metálico y un laminado de CFRP [31].

Si las situaciones que se desean estudiar tienen cierto comportamiento no ideal y por tanto difícil de representar mediante un modelo, los resultados que se obtienen pierden calidad. Este es el caso del contacto eléctrico entre dos materiales donde, en la realidad, debido a las imperfecciones de las superficies en contacto existen puntos sin conexión entre ambas superficies.

Así que este método será un complemento perfecto para la obtención de los valores necesarios para crear modelos tanto basados en TLM como en modelos electromagnéticos.

2.6.3 Modelado con FDTD

Otra técnica para el modelado de una WTB puede ser el uso de modelos electromagnéticos. Este tipo de modelado ha experimentado un gran avance gracias a la capacidad computacional disponible en

la actualidad. Entre los métodos más utilizados en la actualidad encontramos el Método de los Momentos (MoM) y el Método de las Diferencias Finitas (FDTD) [60].

El MoM es un método numérico que resuelve las ecuaciones electromagnéticas en formato integral y suele utilizarse en el dominio frecuencial. Cuando se aplica esta técnica con corrientes tipo rayo, donde las componentes frecuenciales tiene un espectro bastante amplio, la solución para las componentes de baja frecuencia suelen introducir un error significativo a no ser que se complemente con otras técnicas. Esto complica el análisis. De la misma manera, si se desean analizar elementos de gran volumen, también es necesario combinar el MoM con otros métodos para reducir el tiempo de computación [61].

El método FDTD trabaja en régimen temporal, y realiza un mallado de todo el dominio del elemento a simular y facilita el trabajo con materiales no homogéneos. Es un método que requiere una elevada capacidad de cómputo y que el código para implementarlo tiene cierta dificultad, especialmente cuando se deben introducir elementos materiales anisotrópicos, mallados no uniformes, etc. Esta es la situación en la que nos encontramos en el caso de querer simular una WTB. Para este tipo de situaciones, el trabajo de J.A. Rey [52] muestra una solución interesante.

2.7 Comentarios finales

En este capítulo se ha presentado con detalle la estructura de una WTB actual, los materiales que se utilizan, así como las técnicas necesarias para su fabricación. Se ha destacado la importancia que tiene hoy en día el uso de los CFRP en una WTB y que implicaciones tiene desde el punto de vista de la protección contra el rayo. También se han descrito de una manera precisa las características de la fibra de carbono y de los materiales compuestos fabricados a partir de ellas. Por último, se ha hecho referencia a las técnicas que tenemos disponibles para poder modelar, desde el punto de vista electromagnético y también térmico, la parte conductora de una WTB fabricada con CFRP y que incorpora el LPS.

Después de todo este estudio, queda clara la importancia que tiene el poder conocer y caracterizar el comportamiento eléctrico de los CFRP. Esta información será imprescindible para la obtención de cualquier modelo. También resulta evidente el efecto térmico resultante de todo este comportamiento, por los daños que causa en una estructura fabricada con este tipo de material.

No menos importante resulta el cómo se realicen las conexiones eléctricas entre la estructura de CFRP y el sistema LPS.

Estos aspectos, imprescindibles para el modelado, son los que se trabajaran en los siguientes capítulos de esta tesis, desde un enfoque experimental.

2.8 Bibliografía

- [1] D. Ozkan, M. S. Gok, and A. C. Karaoglanli, "Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability," in *Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes*, A. Öchsner and H. Altenbach, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 235–253.
- [2] D. D. L. Chung, *Carbon Composites: Composites with Carbon Fibers, Nanofibers, and Nanotubes*, 2nd Editio. Philadelphia, PA, USA: Elsevier Inc., 2016.
- [3] P. Bajpai, *Carbon Fiber*. Cambridge, MA: Elsevier Inc., 2020.
- [4] R. Rusinek, "Cutting process of composite materials: An experimental study," *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 45, no. 4, pp. 458–462, May 2010, doi: 10.1016/J.IJNONLINMEC.2010.01.004.
- [5] L. E. Murr, "Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance," *Handb. Mater. Struct. Prop. Process. Perform.*, 2021, doi: 10.1007/978-3-319-01905-5.
- [6] F. Romano, J. Fiori, and U. Mercurio, "Structural design and test capability of a CFRP aileron," *Compos. Struct.*, vol. 88, no. 3, pp. 333–341, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.04.010>.
- [7] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. F. Sørensen, "Materials for Wind Turbine Blades: An Overview," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, 2017, doi: 10.3390/ma10111285.
- [8] P. Brøndsted, H. Lilholt, and A. Lystrup, "Composite materials for wind power turbines blades," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 505–538, 2005, doi: 10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641.
- [9] F. Mølholt Jensen and K. Branner, "1 - Introduction to wind turbine blade design," in *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, P. Brøndsted and R. P. L. Nijssen, Eds. Woodhead Publishing, 2013, pp. 3–28.
- [10] J. A. H. Hult and F. G. Rammerstorfer, "Engineering mechanics of fibre reinforced polymers and composite structures," p. 314, 1994.
- [11] J. M. Berthelot, *Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis*. New York: Springer, 2013.
- [12] B. A. Newcomb, "Processing, structure, and properties of carbon fibers," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, pp. 262–282, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.
- [13] E. Rupke, "Lightning direct effects handbook," Pittsfield, USA, 2002. [Online]. Available: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/3352.pdf>.
- [14] "When Lightning Strikes - Flight Safety Foundation." <https://flightsafety.org/asw-article/when-lightning-strikes/> (accessed Oct. 15, 2021).
- [15] D. Mitchard, N. S. Jamoshid, D. Clark, D. Carr, and A. Haddad, "Investigation of lightning direct effects on aircraft materials," *2016 Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. Int. Transp. Electrif. Conf. ESARS-ITEC 2016*, 2016, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841393.
- [16] "Turbines shoot upside-down lightning," *Nature*, vol. 506, no. 7488, p. 268, 2014, doi: 10.1038/506268a.
- [17] H. Chen *et al.*, "Analysis of the cloud-to-ground lightning characteristics before and after installation of the coastal and inland wind farms in China," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 190, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2020.106835.
- [18] S. Soula, J. F. Georgis, and D. Salaün, "Quantifying the effect of wind turbines on lightning location and characteristics," *Atmos. Res.*, vol. 221, pp. 98–110, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2019.01.010.

- [19] V. March, "Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 159, pp. 50–57, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.EPSR.2017.08.020.
- [20] J. Montanyà, O. van der Velde, and E. R. Williams, "Lightning discharges produced by wind turbines," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, no. 3, pp. 1455–1462, Feb. 2014, doi: 10.1002/2013JD020225.
- [21] G. Barra *et al.*, "Enhanced electrical properties of carbon fiber reinforced composites obtained by an effective infusion process," *2014 IEEE 9th Nanotechnol. Mater. Devices Conf. NMDC 2014*, pp. 88–91, Dec. 2014, doi: 10.1109/NMDC.2014.6997429.
- [22] S. Beckwith, "Resin infusion technology: Part 3 - A detailed overview of RTM and VIP infusion processing technologies," *Sampe J.*, vol. 43, pp. 66–69, 2007.
- [23] J. C. Watson and J. C. Serrano, "Composites materials for wind blades," *Wind Syst. Mag.*, pp. 46–51, 2010.
- [24] A. Todoroki and J. Yoshida, "Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load," *JSME Int. Journal, Ser. A Solid Mech. Mater. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 357–364, Jul. 2004, doi: 10.1299/JSMEA.47.357.
- [25] A. Todoroki, Y. Tanaka, and Y. Shimamura, "Identifying Delamination in Cross-ply and Quasi-isotropic Beams of CFRP by a Standardized Electrical Resistance Method," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 12, no. 1, pp. 75–85, 2004, doi: 10.1177/096739110401200107.
- [26] A. Todoroki, K. Omagari, Y. Shimamura, and H. Kobayashi, "Matrix crack detection of CFRP using electrical resistance change with integrated surface probes," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 11–12, pp. 1539–1545, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2005.11.029.
- [27] L. Selvakumaran and G. Lubineau, "Electrical behavior of laminated composites with intralaminar degradation: A comprehensive micro-meso homogenization procedure," *Compos. Struct.*, vol. 109, no. 1, pp. 178–188, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2013.10.057.
- [28] E. Sevkat, J. Li, B. Liaw, and F. Delale, "A statistical model of electrical resistance of carbon fiber reinforced composites under tensile loading," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 10–11, pp. 2214–2219, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2008.04.011.
- [29] J. Wen, Z. Xia, and F. Choy, "Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 77–86, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2010.08.005.
- [30] "UNE-EN IEC61400-24:2019 - Aerogeneradores. Parte 24: Protección contra el rayo," 2020.
- [31] D. Romero, J. Montanyà, and J. Vinck, "Test and simulation of lightning current distribution on a wind turbine blade," 2014, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973406.
- [32] J. Montanyà *et al.*, "Fast current impulse test for wind turbine blades," *EUROEM*, 2008.
- [33] B. L. Ennis *et al.*, "Optimized Carbon Fiber Composites in Wind Turbine Blade Design - SAND2019-14173," Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2019.
- [34] R. H. Barnes and E. V. Morozov, "Structural optimisation of composite wind turbine blade structures with variations of internal geometry configuration," *Compos. Struct.*, vol. 152, pp. 158–167, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.013>.
- [35] J. Zhu, X. Cai, P. Pan, and R. Gu, "Multi-Objective Structural Optimization Design of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Using the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II and Finite Element Method," *Energies*, vol. 7, no. 2, pp. 988–1002, 2014, doi: 10.3390/en7020988.
- [36] C. L. Bottasso, F. Campagnolo, and A. Croce, "Multi-disciplinary constrained optimization of wind turbines," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 27, no. 1, pp. 21–53, Jan. 2012, doi: 10.1007/S11044-011-9271-X.

- [37] "Sandia_Sizes_up_Wind_Turbine_Blade_Design_C_large.gif." http://img.deusm.com/designnews/288/288605-Sandia_Sizes_up_Wind_Turbine_Blade_Design_C_large.gif (accessed Oct. 25, 2021).
- [38] Y. Hirano, S. Katsumata, Y. Iwahori, and A. Todoroki, "Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 10, pp. 1461–1470, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2010.06.008.
- [39] M. Rosemeier and M. Bätge, "A concept study of a carbon spar cap design for a 80m wind turbine blade," *J. Phys. Conf. Ser. OPEN ACCESS*, doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012039.
- [40] A. Candela Garolera, S. F. Madsen, M. Nissim, J. D. Myers, and J. Holboell, "Lightning Damage to Wind Turbine Blades From Wind Farms in the U.S.," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 1043–1049, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2370682.
- [41] C. Bak, "The DTU 10 MW reference wind turbine," 2013.
- [42] NetComposites, "Composites Guide," 2021. <http://netcomposites.com/guide>.
- [43] E. J. Kim, J. H. Park, I. K. Paik, and C. S. Chae, "Polyurethane based sizing agent for CFRP applications," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, vol. 707, no. 1, pp. 59–65, 2020, doi: 10.1080/15421406.2020.1743455.
- [44] "JEC 2016: SGL Group showcases innovative fiber materials and composites for different market segments | SGL Carbon." <https://www.sglcarbon.com/en/company/press/press-information/press-report/jec-2016-sgl-group-showcases-innovative-fiber-materials-and-composites-for-different-market-segment/> (accessed Oct. 22, 2021).
- [45] "Zoltek PX35 - Wind Energy Sales Sheet." <https://zoltek.com/wp-content/uploads/2018/08/Wind-Sales-Sheet-2021.pdf> (accessed Oct. 20, 2021).
- [46] Hexcel Corporation, "Hexply Prepreg Technology," [Online], 2013. http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf (accessed Oct. 05, 2021).
- [47] J. B. Park, T. K. Hwang, H. G. Kim, and Y. D. Doh, "Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 1, pp. 57–66, Nov. 2006, doi: 10.1088/0964-1726/16/1/006.
- [48] Q. Zhao *et al.*, "Review on the Electrical Resistance/Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polymer," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: 10.3390/app9112390.
- [49] R. Holm, *Electric Contacts. Theory and Applications*, 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [50] H. Yu, D. Heider, and S. Advani, "A 3D microstructure based resistor network model for the electrical resistivity of unidirectional carbon composites," *Compos. Struct.*, vol. 134, pp. 740–749, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.08.131.
- [51] T. G. Gutowski and G. Dillon, "The Elastic Deformation of Lubricated Carbon Fiber Bundles: Comparison of Theory and Experiments," *J. Compos. Mater.*, vol. 26, no. 16, pp. 2330–2347, 1992, doi: 10.1177/002199839202601601.
- [52] J. A. Rey, "Aportación al análisis de la distribución de corriente del rayo en palas de aerogenerador equipadas con fibra de carbono," UPC, 2021.
- [53] T. M. Harrell and A. A. Laudani, "SPARCAB. Lightning protection of wind turbine blades with carbon fibre composite materials. D.3.1 Lightning Induced Damage Mechanisms to CFRP Structures," 2018.
- [54] C. Christopoulos, *The transmission-line modeling method - TLM*. New York: IEEE, 1995.
- [55] O. Vryonis, A. A. M. Laudani, T. Andritsch, I. O. Golosnoy, and A. S. Vaughan, "Lightning Protection of Wind Turbine Blades—How Supersizing Has Created New Challenges for Nanodielectrics Research," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 37, no. 6, pp. 6–20, 2021, doi: 10.1109/MEI.2021.9580820.

- [56] H. Kawakami, "Lightning Strike Induced Damage Mechanisms of Carbon Fiber Composites," University of Washington, 2011.
- [57] M. Ianoz and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*. Wiley Interscience, 1997.
- [58] J.-M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 3rd Editio. Wiley, 2014.
- [59] "COMSOL Multiphysics, 3.4." .
- [60] Y. Baba and V. A. Rakov, "Electromagnetic models of the lightning return stroke," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 112, no. D4, 2007, doi: <https://doi.org/10.1029/2006JD007222>.
- [61] J. Zhu, S. Omar, and D. Jiao, "Solution of the Electric Field Integral Equation When It Breaks Down," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 8, pp. 4122–4134, 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2322899.

Capítulo 3

3 Estudio de la resistividad eléctrica de los compuestos de carbono unidireccional (CFRP UD)

3.1 Introducción

Llegado a este punto, se dispone del siguiente conocimiento:

La estructura de las WTB actuales que incorporan materiales compuestos.

- Los diferentes procesos de manufactura en función del material compuesto utilizado.
- Las diferentes alternativas para obtener los laminados de CFRP.
- La composición y características del material base (prepreg o pultruido) de CFRP.
- Los aspectos necesarios para su modelado, tanto desde el punto de vista eléctrico como también térmico [1]–[4].

Para este último punto, queda clara la necesidad de una fuerte experimentación por no ser un material homogéneo y fuertemente ligado a su proceso de fabricación.

El comportamiento especial de los materiales compuestos [5] está fuertemente relacionado con el hecho de estar formados por al menos dos elementos y, en el caso del CFRP, con características eléctricas totalmente diferentes. Sus elementos constitutivos y el proceso de fabricación hacen que sea un material anisotrópico y no homogéneo. Por tanto, la conductividad del CFRP vendrá condicionada por todo ello.

Si queremos caracterizar este material para después poder incluir esta información en los modelos completos de una WTB, lo primero que se debe hacer es estudiar las metodologías necesarias para extraer esta información del material. Así que se deberá realizar una amplia revisión de los trabajos previos existentes, así como un análisis detallado de los resultados que presentan. Algunos de los más destacados y recientes son los de Newcomb [2], Zhao et al. [6] o Kwok et al. [7].

A partir de este estudio previo, se podrán definir los procesos a llevar a cabo para la preparación de las probetas que se ensayarán, las características y dimensiones más adecuadas de estas probetas con el fin de extraer información relevante sobre su comportamiento, así como poder adquirir experiencia en el tratamiento de este tipo de materiales, identificar de forma más clara aquellos

aspectos prácticos que pueden ser más críticos y evaluar la reproducibilidad de determinados ensayos. Esta idea de la reproducibilidad es un aspecto muy relevante desde el punto de vista científico. Así que este estudio previo será fundamental para poder comparar los resultados de nuestros ensayos con los de estado del arte actual.

Por tanto, el objetivo de este capítulo es el de presentar los materiales utilizados, las técnicas empleadas para la preparación de las probetas y las técnicas que permiten obtener las resistividades del material.

3.2 Descripción del CFRP utilizado

Dado que uno de los objetivos es poder caracterizar de la mejor manera posible el CFRP que se utiliza en la fabricación de una WTB, se ha obtenido material de características similares utilizado en este sector. Por otro lado, es obvio que existen diferencias entre las características de los materiales compuestos que ofrecen cada uno de los fabricantes.

En el caso de utilizar láminas de prepreg, el usuario final también condicionará el resultado de la estructura de CFRP en función de cómo realice la aplicación y el curado de estas láminas. Si se utilizan perfiles de CFRP pultruido, la sección de este material, como se combinen y como sea el proceso de curado, también determinarán el comportamiento final.

Conviene destacar que, entre los estudios existentes orientados a la obtención de las resistividades de los compuestos de CFRP, en unos casos no se detalla de manera precisa el procedimiento seguido para la preparación de las probetas [8] y, en otros casos, las probetas se han obtenido por procedimientos muy precisos (cortes de las probetas y pulidos superficiales con máquinas especiales, tratamientos de las superficies de contacto con pinturas conductoras u otras sustancias que mejoran el contacto eléctrico, ...)[9], no aplicables en el proceso de industrialización para la fabricación de una WTB.

Por todo lo explicado sobre la composición y el proceso de fabricación de los compuestos de CFRP, pero también sobre la preparación de las probetas, los valores obtenidos en un determinado ensayo no se pueden generalizar, si bien son valores útiles para mostrar ordenes de magnitud y tendencias en el comportamiento de este tipo de compuestos. Además, en un proceso industrial real, muchos de los procedimientos descritos en algunos de estos estudios no son aplicables, bien por las dimensiones de los laminados, bien porque los costes derivados de utilizarlos no serían asumibles.

Para realizar este estudio se mandaron fabricar varias probetas siguiendo un proceso industrial similar al que se utiliza en la fabricación de la viga de una WTB a partir de láminas de prepreg. Se fabricaron probetas de 3 espesores diferentes, es decir, con diferente número de capas. El material base utilizado corresponde a láminas de prepreg PX35 de Zoltek.

Según el fabricante, estas láminas de prepreg tienen un contenido en resina que puede variar entre un 28 – 45 %. La resistividad eléctrica de las fibras utilizadas para la fabricación de estas láminas es de $15,5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ [10].

Cuando se estaba finalizando este estudio, se tuvo acceso a un pequeño trozo de perfil de CFRP fabricado por pultrusión. El fabricante de este laminado es EPSILON Composites [11]. En este caso no se disponía de más información sobre el contenido de fibras ni de su resistividad.

Nombre probeta	Fabricante	Tipo	Nº de capas	Espesor total
PF	Zoltek	Prepreg	3	1,6 mm
PM	Zoltek	Prepreg	5	3,0 mm
PG	Zoltek	Prepreg	8	5,0 mm
PP	Epsilon	Pultruido	-	4,0 mm

Tabla 3-1.- Características de las probetas de CFRP utilizadas.

3.3 Proceso de preparación de las probetas

En cualquier estudio del comportamiento eléctrico de un material, las conexiones eléctricas que deben realizarse toman una gran relevancia. Cuanto menor es la resistividad del material más importante es la resistencia del contacto [5].

En el caso de un compuesto de CFRP, a esta baja resistividad del material se le suma la dificultad de no ser un material homogéneo, en el que existen dos elementos completamente diferentes no sólo en su comportamiento eléctrico sino también en su manera de tratarlo mecánicamente a la hora de preparar las muestras que se desean ensayar.

Por tanto, la preparación de las muestras tomará mucha importancia y, en especial, el pulido de las superficies para la realización de los contactos. Los trabajos de Kwok et al. [7], Todoroki et al. [12], [13], o Zimney et al. [14], son muestra de ello. Además, este último trabajo también pone de manifiesto cómo puede afectar a las medidas las dimensiones de las muestras en función de la resistividad del material. Aunque en estos trabajos los campos de aplicación de los compuestos de CFRP son otros diferentes a los de esta tesis, el objetivo final es el mismo, el de caracterizar el comportamiento eléctrico del material.

El primer paso para la preparación de las muestras es el corte de las mismas. Existen multitud de técnicas y herramientas para realizar el corte en este tipo de materiales, pero en ningún trabajo de los revisados en esta tesis se habla con detalle de ello. Se puede encontrar alguna referencia al respecto en el libro de Chung [14]. En definitiva, el grosor de la herramienta de corte, la velocidad de avance y de movimiento de la misma, son variables que acaban afectando. En los últimos años, la técnica de corte por chorro de agua ha tomado cierto auge ya que, entre otras ventajas, evita un incremento de la temperatura del material que se está cortando [15].

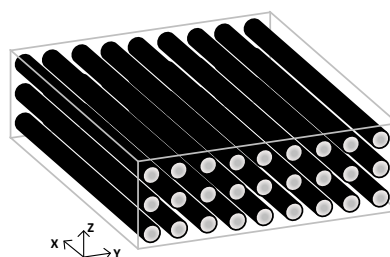


Figura 3-1.-Representación de un compuesto de CFRP UD ideal donde aparecen las direcciones consideradas.

Durante el proceso de preparación de las muestras, se realizaron pruebas de corte con diferentes técnicas de las comentadas anteriormente. Se observó que no era del todo determinante, y que en todas ellas la superficie quedaba en condiciones similares. Lo que se observó con las diferentes técnicas de corte fue que en el momento del corte se producían pequeños arrancamientos de fibras, que dejaban huecos en la matriz. Esto es debido al hecho de estar cortando un material compuesto donde hay dos elementos muy diferentes, las fibras de carbono de gran dureza y fragilidad, y la resina, mucho más elástica. Evidentemente, el número de huecos y profundidad de los mismos, variaba según la técnica de corte.

Estos huecos, si no se eliminan de forma adecuada en la fase de pulido, dificultan la calidad de la conexión eléctrica con el compuesto de CFRP. Es especialmente crítico cuando el corte se realiza en el plano Y-Z, es decir, el plano para medir la resistividad en la dirección de las fibras (X).

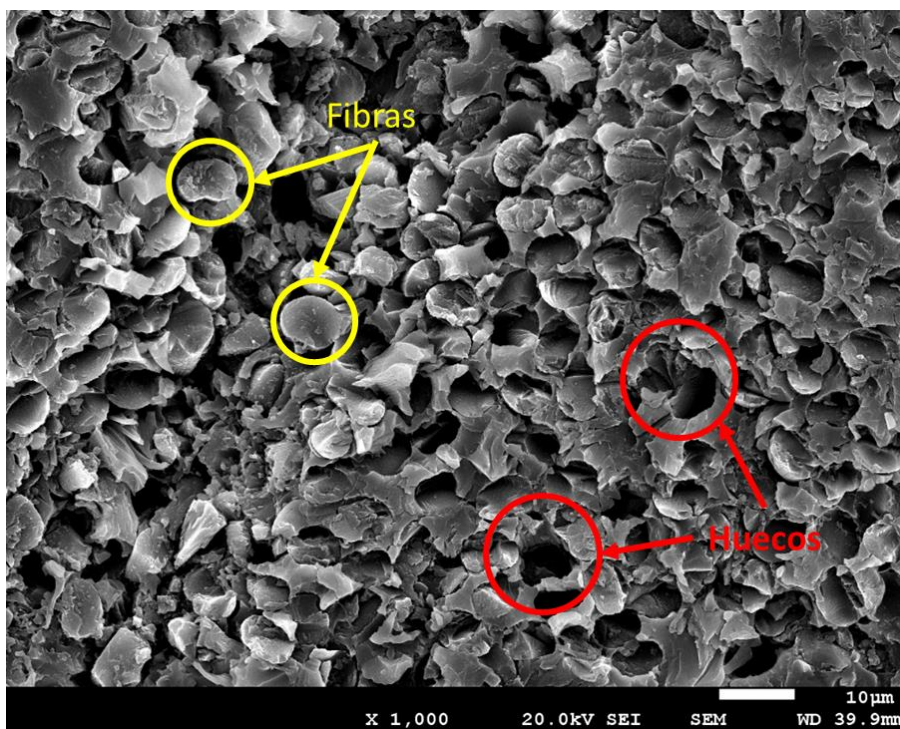


Figura 3-2.- Imagen tomada con SEM sobre el plano Y-Z de la probeta PP después del corte por chorro de agua. En ella se pueden observar las cabezas de algunas fibras que han quedado expuestas y huecos en el material debidos al arrancamiento de fibras.

Por tanto, el tipo de corte utilizado determina la profundidad del pulido que debe realizarse para que queden expuestas el mayor número de fibras posibles. Aparte de la profundidad del pulido, la calidad de este pulido también es determinante si se desea tener acceso a las fibras, ya que se debe eliminar toda la resina superficial que se puede arrastrar durante este proceso.

En nuestro caso, después del corte del material para la obtención de las probetas con las que se realizarán los ensayos, se realizó un pulido basto con papel abrasivo de grano P240 y P400. El objetivo de este pulido inicial era eliminar toda la parte dañada por el corte y uniformizar la superficie. A continuación, se realizó un triple pulido adicional con papel abrasivo de grano P600, P800 y P1200.

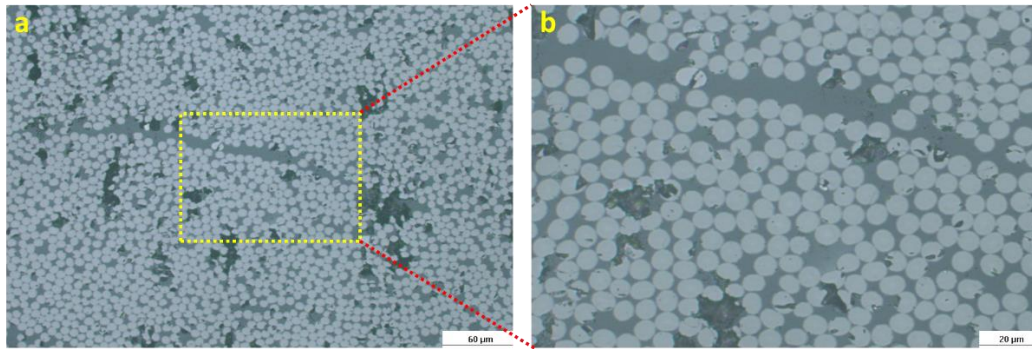


Figura 3-3.- Imágenes tomadas con microscopía al finalizar todas las fases de pulido en la probeta PG. a) Imagen con un zoom de x200. b) Imagen sobre la zona remarcada con un zoom de x600.

El resultado final de la superficie del plano Y-Z se muestra en la Figura 3-3. En ella se puede observar como la mayor parte de las fibras quedan perfectamente accesibles, aunque también se pueden ver algunos restos de resina superficial que no han sido totalmente eliminados. Al mismo tiempo podemos observar la falta de homogeneidad del material, con zonas con mayor densidad de fibras y zonas con ausencia de ellas.

Para el caso de los planos X-Z y X-Y, donde encontramos la fibra de forma longitudinal, la fase de pulido afecta de forma diferente a las fibras según la técnica utilizada para la eliminación de la resina. En este sentido, el trabajo de Scholle et al. [16] detalla muy bien las alternativas a este tipo de tratamiento superficial, así como las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

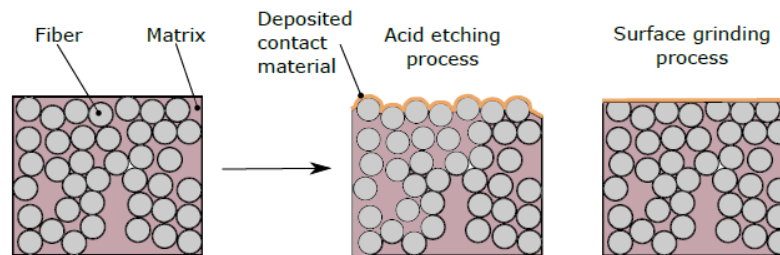


Figura 3-4.- Detalle de una muestra de CFRP UD con tratamiento superficial con ácido y pulido con papel abrasivo [16].

La eliminación de la resina del compuesto de CFRP mediante un concentrado de ácido sulfúrico o laser, deja al descubierto las fibras de forma completa. Al no estar todas ellas al mismo nivel debido al proceso de fabricación del material compuesto, requiere de impregnar o pintar la superficie del material con algún elemento conductor. El más utilizado ha sido la pintura de plata.

El proceso anterior, si bien puede parecer más efectivo, no resulta fácil de implementar en el proceso de fabricación de las WTB. Es por esto que habitualmente se opta por el pulido superficial con papel abrasivo. Este segundo método, si bien deja la superficie más uniforme y facilita el contacto superficial, daña parte de las fibras ubicadas más en la superficie. Este daño también puede afectar al contacto superficial y a la posterior distribución de corriente por el material.

En nuestro caso y dado que el proceso de pulido es el más habitual en los procesos de industrialización del sector eólico, se optado por este segundo método a la hora de preparar el material a ensayar.

Tal y como se presentó en el Capítulo 2, en la fabricación de este tipo de material compuesto se suele añadir una capa de protección (peel ply). Para poder realizar mediciones sobre la superficie de las probetas, se debe retirar esta capa de protección y eliminar el exceso de resina que queda sobre la superficie. Esto permitirá tener un buen contacto eléctrico con las fibras. Por tanto, en primer lugar, se realiza un pulido superficial de todas las caras del material, pero de forma especial sobre las caras donde se encuentra la peel ply. El proceso y material utilizado para realizar este pulido es similar al que se realiza en la industria durante la fabricación de las WTB. Este proceso de pulido debe garantizar que se ha eliminado toda la resina y se tiene acceso a las fibras. Esto ocurre cuando el polvo que se desprende del pulido es totalmente negro, indicando que se está puliendo el carbono. Este pulido inicial se realizó con papel abrasivo de grano P240 y P400. Con la ayuda de la microscopía se pudo validar el proceso de preparación de las probetas.

Una vez pulidas ambas caras de las superficies de las probetas, éstas se cortaron al agua con el fin de obtener el tamaño adecuado para cada uno de los ensayos que se desean realizar. Por último, estas probetas finales reciben a su vez, un pulido adicional más fino por todos sus contornos. El objetivo, tal y como se ha expuesto anteriormente, era conseguir el mejor contacto superficial posible por todas sus caras de las probetas. En nuestro caso, estas probetas finales han recibido el triple pulido explicado y validado por microscopía.

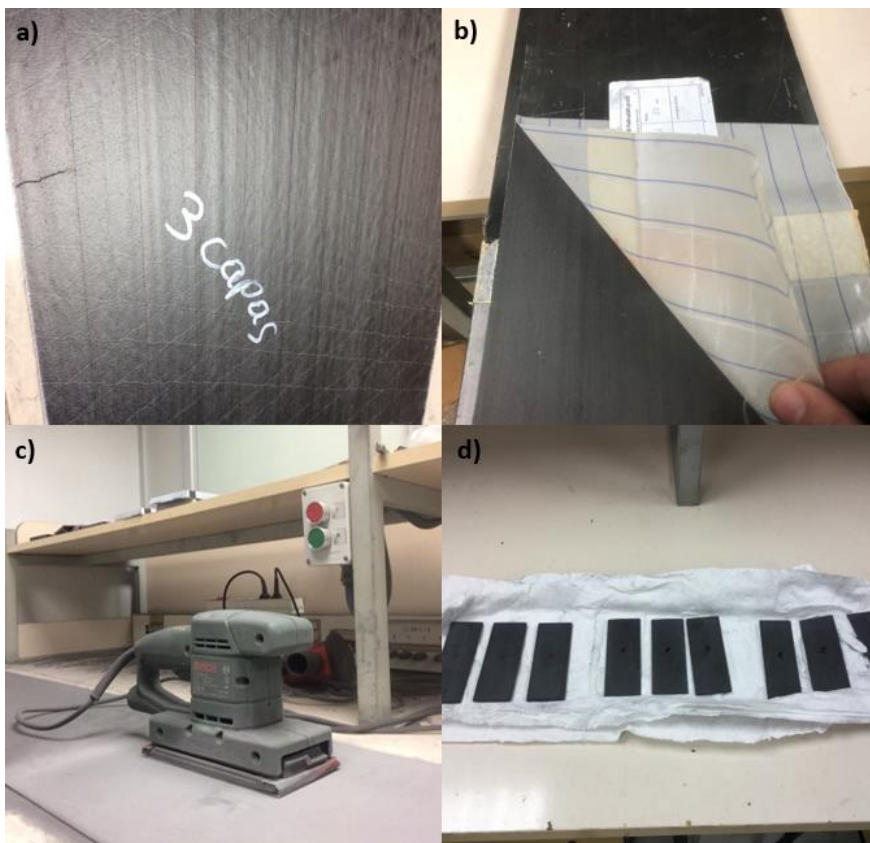


Figura 3-5.- Detalles de la preparación de la probeta PF: a) Estado inicial del material suministrado. b) Eliminación de la capa de protección (peel ply). c) Pulido basto de las superficies de las probetas. d) Probetas finales después del corte por agua y del pulido fino.

Cabe destacar que este acabado superficial final más delicado no siempre es fácil de conseguir cuando se dispone de estructuras de gran tamaño, ya que es muy complicado asegurar que toda la

superficie quede totalmente igual. Pues bien, como se ha podido observar en fases previas de este trabajo y en alguna publicación revisada [7], este pulido final es de vital importancia para que la calidad de los contactos eléctricos sea buena y las mediciones realizadas sean de la máxima calidad. Por tanto, la calidad que se ha obtenido en las probetas a ensayar seguramente es superior al que se puede obtener en un proceso real de fabricación de las WTB.

3.4 Obtención de la resistividad eléctrica del CFRP

La conductividad eléctrica de un material es una propiedad intrínseca y, por tanto, independiente del tamaño o forma de la muestra analizada. Esto es válido para materiales homogéneos, es decir, con las mismas propiedades en cualquier punto de la muestra. Por tanto, un delgado conductor de cobre tendrá la misma conductividad eléctrica que un bloque macizo de grandes dimensiones y con forma heterogénea si se ha fabricado con el mismo material.

Para el caso de un material compuesto de CFRP, no se cumple el requisito de material homogéneo tal y como se ha podido ver esto todo el estudio previo realizado hasta el momento. Tenemos un material compuesto por al menos dos elementos y con características eléctricas opuestas.

Es por esto que, en el momento de querer caracterizar este material desde el punto de vista eléctrico, surjan diferentes caminos a seguir. El primero sería modelar el material tal cual es, es decir, incluir de forma individual todas las fibras envueltas por la matriz. Este modelo microscópico puede ser útil con muestras de pequeñas dimensiones, pero cuando lo que se desea ver es el comportamiento de una estructura de grandes dimensiones este camino no suele ser viable por el coste y tiempo computacional que requiere. La manera de reducir este coste computacional es representar el material como un material homogéneo y anisotrópico [17], [18]. Si se asume esta homogeneización del material, se pueden aplicar las técnicas conocidas de caracterización de materiales, pero hay que saber que límites tiene esta asunción.

3.4.1 Consideraciones sobre los materiales compuestos de CFRP

Los primeros trabajos realizados en el sentido de considerar los compuestos de CFRP materiales homogéneos se orientaron hacia la caracterización desde el punto de vista térmico [19]–[21]. Entre estos, el trabajo de Korab et al. [19], justificaba que esta homogeneización podía realizarse si se cumplían dos criterios claros:

- Que el espesor del material compuesto de CFRP fuese mucho más grande que el diámetro de las fibras.
- Que las fibras estuviesen repartidas de manera uniforme en toda la sección del material.
- Que existe un buen contacto entre fibras dentro de grueso del material.

Teniendo en cuenta el trabajo de Korab et al., aparecen varios métodos analíticos y con diferente nivel de complejidad dependiendo del tipo de material compuesto bajo estudio. Por un lado, están los métodos basados en la denominada Regla de las Mezclas [20]–[22] y por otro, los basados en el Método de Eshelby [23], [24]. Ambas metodologías asumen una distribución homogénea de las fibras y que en el seno del material no existen vacíos. Al mismo tiempo, se menciona que, dada la analogía

entre el comportamiento eléctrico y el térmico, estos criterios pueden hacerse extensivos a ambas conductividades.

Si analizamos estos criterios sobre el material utilizado en esta tesis, podemos observar algunas cuestiones relevantes:

- El primer criterio se suelen cumplir ya que las fibras de carbono utilizadas en la fabricación de estos materiales compuestos suelen tener unos diámetros entre 5-9 μm . En el caso de los materiales utilizados en este trabajo, las fibras se encuentran dentro de este intervalo y, por tanto, podemos aceptar que se cumple.

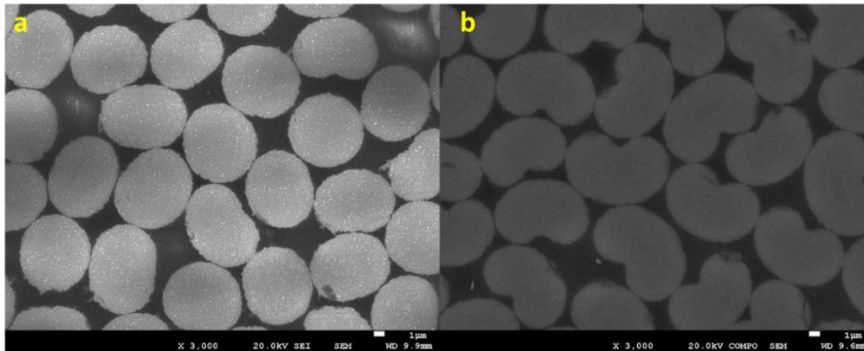


Figura 3-6.- Imágenes con SEM de las fibras existentes en los materiales compuestos utilizados. a) fibras en las láminas de prepreg la probeta PG. b) Fibras en el laminado de la probeta de pultruido PP.

- El segundo criterio ya no es tan claro, ya depende del proceso de fabricación del material y en mayor medida de la densidad de fibras.

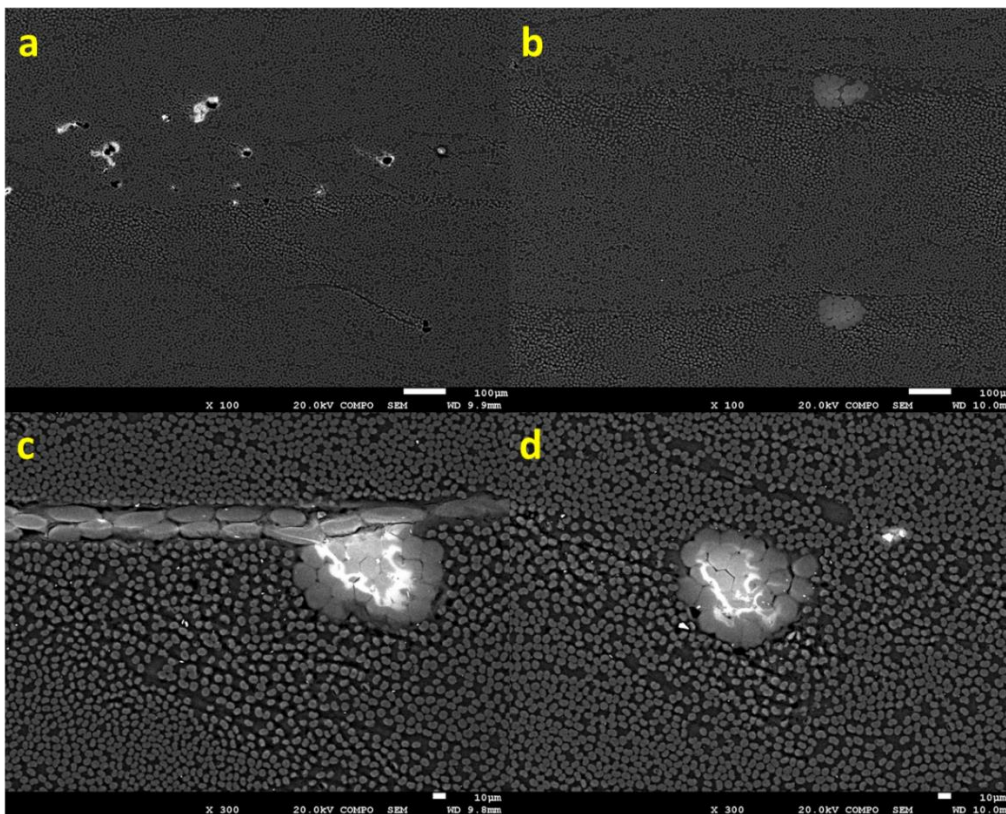


Figura 3-7.- Imágenes con SEM del material prepreg utilizado en esta tesis.

En las imágenes de la Figura 3-7 realizadas sobre material fabricado a partir de láminas de prepreg, podemos observar diferentes elementos que podrían cuestionar la suposición de material homogéneo. En Figura 3-7-a) se observan huecos donde hay ausencia de fibras y de resina. En Figura 3-7-b) se observa claramente que la distribución no es homogénea y que en las zonas de unión entre dos láminas de prepreg este fenómeno se acentúa. En Figura 3-7-c) y d), aparte de poder observar con mayor detalle esta falta de homogeneidad en la distribución de las fibras, se observan zonas donde la resina no se ha distribuido correctamente, creando núcleos aislantes dado el comportamiento eléctrico de la matriz.

Para el caso del material pultruido utilizado en esta tesis, la Figura 3-8-a) muestra una distribución más uniforme, también originada por tener mayor densidad de fibras. Aunque en menor medida, también se observan irregularidades en cuanto a la homogeneidad en la distribución de las fibras si se comparan Figura 3-8-b) y c). Por último, también se observan huecos en el material en Figura 3-8-c) y d) aunque de menor tamaño.

- Si analizamos el tercer criterio sobre el material utilizado en esta tesis, también podemos cuestionar su aceptación. Un elemento clave en este criterio es que la resistividad de las fibras es mucho menor que la resistencia del contacto entre fibras. Por tanto, siempre prevalecerá la conducción esta dirección, en X. Por otro lado, si se compara las Figura 3-6-a) y b), se puede ver como el número de contactos entre fibras es mayor en este segundo caso, que corresponde al material pultruido con respecto al material de prepreg. En este caso, la mayor interacción entre fibras se asocia no sólo a la mayor densidad de fibras sino también a la geometría de las mismas.

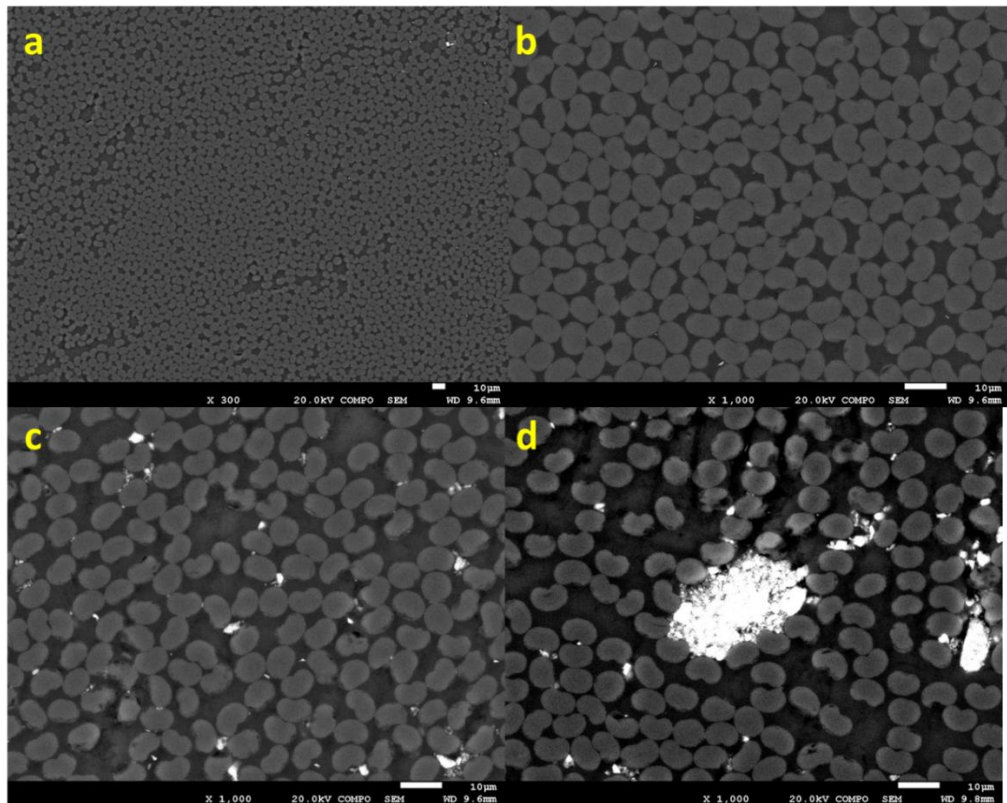


Figura 3-8.- Imágenes con SEM del material pultruido utilizado en esta tesis.

Gracias a la ayuda del SEM, se pudo realizar un estudio detallado de la interfaz de contacto entre fibras y entre fibras sin contacto. El objetivo era analizar si el proceso de apresto (sizing) realizado sobre las fibras del material incluía algún elemento que pudiera influir en la resistencia de este contacto.

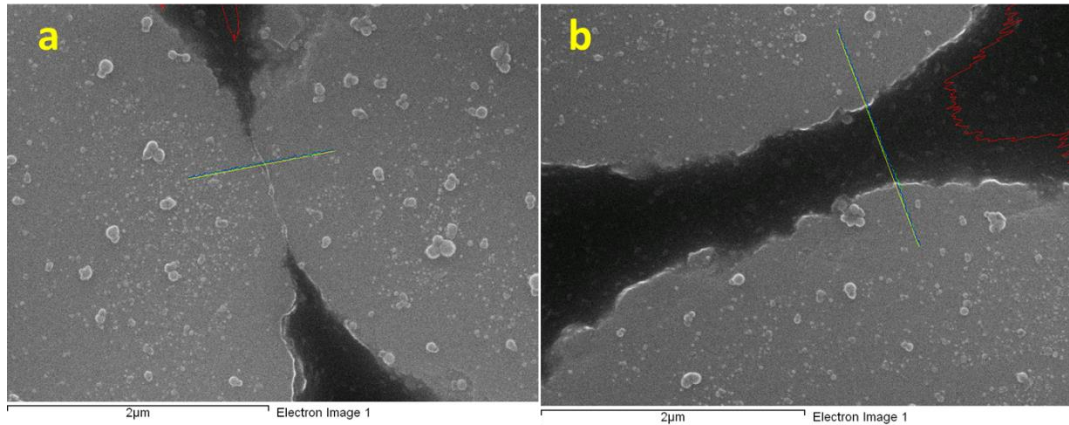


Figura 3-9.- Imagen del linescan realizado mediante SEM para evaluar la afectación por el proceso del sizing.

Del resultado obtenido de este estudio y que se muestra en la Figura 3-10 se puede concluir que, para los materiales compuestos de CFRP utilizados en esta tesis, el sizing no aporta ningún elemento que pueda modificar (favorecer o perjudicar) el contacto entre fibras. Los elementos encontrados se asocian a los habituales presentes en una resina epoxi convencional. Por tanto, la resistencia de este contacto entre fibras vendrá determinada por la conductividad de las fibras, por la superficie de contacto entre las fibras y por la presión existente entre ellas.

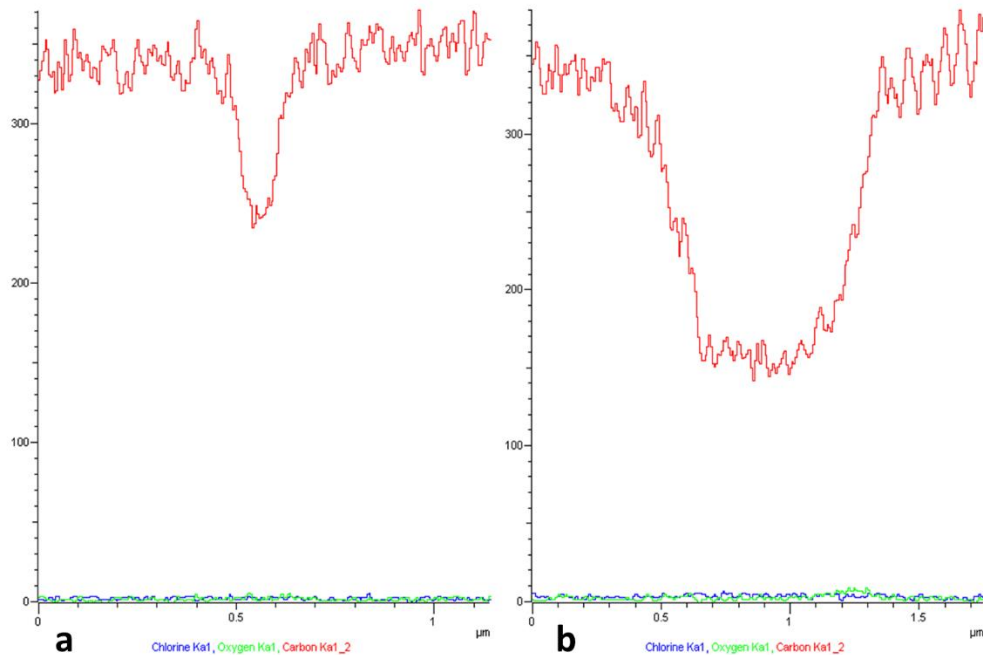


Figura 3-10.- Resultado del linescan realizado mediante SEM sobre las situación de la Figura 3-9.

Después de todo el estudio presentado, se puede ver de forma clara que elementos condicionan e influyen significativamente en los resultados que se obtengan al considerar un compuesto de CFRP como un material homogéneo.

En la mayoría de trabajos revisados, la metodología para obtener la conductividad del CFRP suele ser siempre similar [7], [25]–[27]. Aunque existen otros métodos para determinar la conductividad en materiales, estos han sido menos utilizados [5], [8], [28]. Dado que se está haciendo referencia a un material anisotrópico y poco homogéneo, pero que se asume homogéneo bajo ciertos criterios, aquellas metodologías que permitan una cierta reproducibilidad garantizarán la validación de la información. Este concepto es muy importante desde el punto de vista científico.

Por otro lado, hay ocasiones en las que se hace referencia a la conductividad del material, pero en la práctica suele ser más habitual hacer referencia a su magnitud recíproca, la resistividad. Esto se debe a que la mayoría de instrumentos comerciales que se suelen utilizar están calibrados en unidades de resistencia.

Al mismo tiempo, cuando se habla de resistividad (o de conductividad), se está haciendo referencia a la resistividad volumétrica (ρ_v) a no ser que se especifique lo contrario. En el Sistema Internacional la resistividad se mide en Ωm . Este valor de resistividad (ρ_v) se obtiene a partir de la medida de la resistencia (R) entre las caras opuestas de un cubo del material, siendo l la distancia entre dichas caras y S la superficie de dicha cara.

La ecuación que aparece junto a la Figura 3-11, está asumiendo que el potencial permanece constante para cualquier punto que se encuentre en una sección transversal (S) del material. A su vez, también implica que la corriente que atraviesa el material se distribuye de forma uniforme sobre esta misma sección transversal.

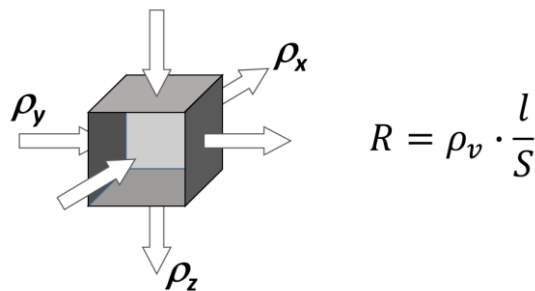


Figura 3-11.- Elemento que permite definir la resistividad volumétrica de un material.

Si un material es isotrópico y homogéneo lo comentado en el párrafo anterior sería cierto y además, daría igual que caras del material utilizar ($\rho_x = \rho_y = \rho_z$). Cuando el material es anisotrópico, como en el caso del CFRP, deberíamos realizar 3 mediciones para obtener dicha resistividad en cada una de las direcciones posibles ($\rho_x \neq \rho_y \neq \rho_z$). Aquí sería conveniente hacer un matiz importante que, aunque habitualmente se suele obviar, hay que tener presente. Un material anisotrópico tendría una resistividad diferente en cada de las direcciones (3-1), mientras que en un material ortotrópico la resistividad es diferente e independiente en las 3 direcciones perpendiculares cartesianas (3-2). Un material ortotrópico es un caso particular de la anisotropía. Por tanto, de forma rigurosa, deberíamos indicar que un material compuesto de CFRP se trata como un material ortotrópico.

$$\rho_v = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\rho_v = \begin{bmatrix} \rho_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_x & 0 & 0 \\ 0 & \rho_y & 0 \\ 0 & 0 & \rho_z \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Al aproximar un material que no es continuo y ni homogéneo, mediante un comportamiento homogéneo se están haciendo una serie de consideraciones que ya se han justificado. Existe otro elemento que condiciona los resultados y que no se ha mencionado. Al asumir el material homogéneo se está dando por sentado que la distribución de la corriente también será homogénea por todo el material. Desde el punto de vista práctico es muy difícil asegurar esto y, por tanto, los potenciales en todos los puntos de una sección transversal del material dependerán de como de uniforme sea esta distribución de corriente. Este fenómeno está estrechamente relacionado con la calidad de los electrodos de conexión.

Por consiguiente, buscar un valor para la resistividad del material en cada dirección será una manera de aproximar el comportamiento real del material compuesto de CFRP a través de un comportamiento homogeneizado.

También conviene recordar que en el caso de un material compuesto de CFRP UD fabricado con láminas de prepreg, esta aproximación tendrá una mayor incertidumbre. Como se ha mostrado en la Figura 3-7, entre cada lámina de material y por el proceso de curado, aparece una zona más rica en resina que empeora la conductividad, especialmente en la dirección perpendicular (Z).

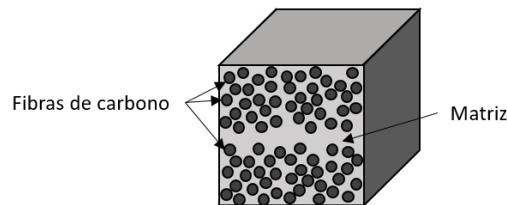


Figura 3-12.- Representación de la discontinuidad y no homogeneidad del CFRP UD fabricado con láminas de prepreg.

En el caso de CFRP fabricado por pultrusión, se ha visto que la distribución es más homogénea y que está estrechamente relacionado con la densidad de fibras del material y con la geometría de las mismas.

Uno de los aspectos al que no se le dedica mucha atención en el análisis de la resistividad del CFRP es que las probetas que se suelen utilizar se alejan de esta forma cúbica teórica. Normalmente el espesor de la probeta suele ser mucho menor que el largo y/o el ancho de la misma. Si el material fuese isotrópico y homogéneo la variación de la geometría de la probeta no afectaría a la medición de la resistividad [29]. En el caso de un compuesto de CFRP esto no se cumple y, por tanto, puede afectar al análisis de esta propiedad [30].

Después de analizar cómo se realizan los contactos eléctricos para equipotencializar la viga de CFRP de la pala con el bajante del LPS, se observa que en ocasiones se utilizan contactos superficiales. Es

por esto que considerar el material como una lámina fina y determinar la resistividad superficial (ρ_s) puede ser un enfoque útil en la caracterización y modelización de este tipo de materiales compuestos. En el caso particular del CFRP y de su anisotropía, determinar la parte efectiva de conducción del material es otro de los aspectos fundamentales.

Llegados a este punto y dado que el objetivo es obtener la resistividad de un material anisotrópico y no homogéneo para poder tratarlo como si fuese homogéneo, se hace necesario revisar las metodologías y procedimientos existentes para ver qué ventajas e inconvenientes encierra cada uno de ellos. A partir de este estudio se podrá proponer la metodología más adecuada para la caracterización del material.

3.5 Revisión de los métodos de medida

3.5.1 Métodos por inyección de corriente

Cualquier método que permita determinar la resistividad de un material a partir de la inyección de corriente y medida de potencial tiene un inconveniente principal. Este inconveniente es la influencia de la resistencia de contacto entre el electrodo de prueba y la probeta del material bajo estudio. Es evidente que cuanto menor sea la resistividad del material mayor será la influencia de la resistencia de contacto. Además, en el caso de los compuestos de CFRP UD este contacto toma todavía mayor relevancia ya que también debe garantizar una distribución de corriente lo más uniforme posible por el material.

Dado que en la dirección de las fibras (X) la resistividad dependerá del número de fibras y de la densidad de fibras, el contacto entre el electrodo y la muestra de material debe garantizar el contacto con el mayor número de fibras posibles. En un caso ideal donde los electrodos de inyección de corriente tuviesen contacto con todas y cada una de las fibras del material en ambos lados de la muestra, conocida la resistividad de una fibra (ρ_f) y sabiendo la densidad de fibras o lo que es lo mismo, el porcentaje que representa la cantidad de número de fibras respecto el total de la sección del material (V_f), se podría hacer el cálculo directamente [28] y determinar la resistividad del material en esta dirección (ρ_x). Sería como tener conductores en paralelo y unidos a ambos lados.

$$\rho_x = \frac{\rho_f}{V_f} \quad (3-3)$$

Según lo visto hasta ahora, las fibras no son perfectamente paralelas y, a lo largo de la muestra de material, tendrán contactos unas con otras. En principio, al ser un camino de menor resistividad la propia fibra que a través del contacto entre fibras, podemos considerar la ecuación (3-3) si los contactos en ambos extremos son totales.

En el momento que no se produzca el contacto en ambos extremos de una fibra, entra en juego la resistencia de contacto entre ellas, ya que la corriente deberá fluir a través de ese contacto, aumentando la resistencia del conjunto. En este momento entra en juego la percolación del material compuesto.

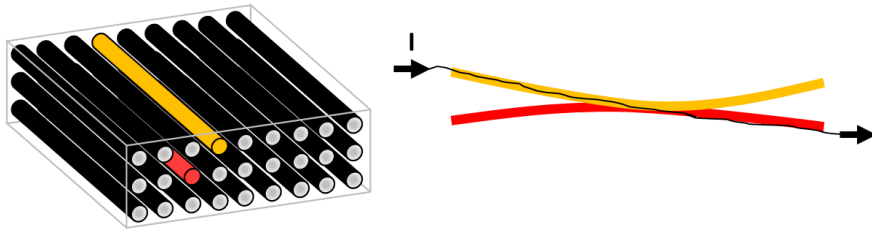


Figura 3-13.- Representación del efecto de que los electrodos de contacto no tengas conexión con la misma fibra a ambos lados de la muestra de material de CFRP UD.

Esta probabilidad de los contactos entre fibras es la que acaba determinando la resistividad en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras. Nuevamente, el factor de percolación depende de la densidad de fibras en el material [31].

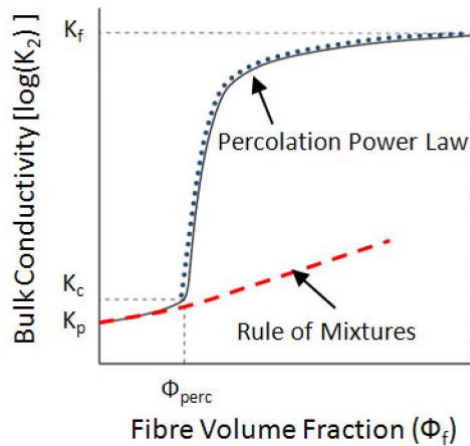


Figura 3-14.- Representación de la evolución de la conductividad de un material compuesto de CFRP en función de la densidad de fibras [32], [33].

Otro efecto que también puede ser relevante en la determinación de la resistividad del material es si la resistencia del contacto no tiene un comportamiento lineal, es decir, que no es puramente óhmico y, por tanto, su valor varía con la amplitud de la corriente inyectada durante los ensayos. Este efecto es fácil de observar mediante los ensayos que se propondrán.

Para reducir el efecto de la resistencia de los electrodos de prueba en este tipo de medidas existen algunas recomendaciones a tener en cuenta. Por ejemplo, es muy importante que las fibras queden bien expuestas en la superficie de contacto, tal y como se detalló anteriormente [7]. En ocasiones se utiliza pintura conductora (usualmente de plata) o Aquadag (solución acuosa con grafito puro), con el fin de reducir el efecto de dicho contacto, especialmente en aplicaciones de laboratorio y con probetas de pequeño tamaño. La presión ejercida entre los contactos y el material bajo estudio también es muy importante, ya que afecta de forma significativa [34]. Una presión excesiva también puede tener un efecto negativo, como puede ser el caso del CFRP, ya que afecta a la estructura interna del material y, por tanto, a su comportamiento. El estudio realizado por A. Todoroki y J. Yoshida [35] muestra como la fuerza ejercida sobre este tipo de materiales modifica su resistividad.

3.5.1.1 Método de los 2 puntos.

Este método es el más sencillo para determinar la resistividad volumétrica de un material y es un método que siempre se puede utilizar.

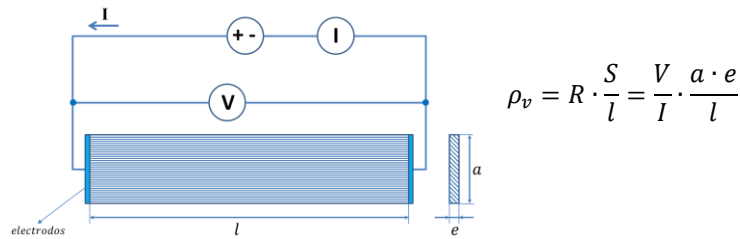


Figura 3-15.- Esquema básico de la obtención de la resistividad por el método de los 2 puntos.

Para este método, se parte de una probeta del material a analizar y se le colocan los electrodos de prueba en los extremos, cubriendo toda la sección (S) del material. En la ecuación para el cálculo de ρ_v , e es el espesor de la probeta, a el ancho de la misma y l su longitud. Tal y como se observa en la Figura 3-15, el valor obtenido de la resistencia (R) incluye la resistencia de contacto de los electrodos. Por tanto, este método introduce mayor error cuanto menor es la resistividad del material a analizar.

En el caso de un compuesto de CFRP, para la determinación de la ρ_x , dado que la sección del material estará compuesta de multitud de fibras, debemos intentar garantizar el contacto con todas ellas para que la medida y los resultados obtenidos sean de mejor calidad. En el caso de ρ_y y ρ_z debemos asegurar, de igual manera, que el electrodo de prueba tiene contacto con el mayor número de fibras posibles ya que nuestro objetivo es la resistividad volumétrica equivalente del material en esa dirección.

Es importante tener presente que este método, si bien no es el más óptimo, en aquellas ocasiones donde otros métodos no se pueden aplicar, este método siempre nos permite disponer de un valor de referencia.

Para el caso de las resistividades ρ_y y ρ_z , existen trabajos que utilizan electrodos que no cubre toda la cara del material. El más destacado en este sentido es el de trabajo de Abry et al. [26], donde además los resultados indican que la resistividad en estas direcciones varían con la longitud de la probeta. Dado que podría resultar útil en probetas de mayor tamaño, deberán contrastarse estos resultados.

3.5.1.2 Método de los 4 puntos.

Este método mejora al anterior en que permite eliminar el efecto de la resistencia de los electrodos de prueba. Por tanto, a priori, será un método que aportará resultados de mayor calidad.

Este método se fundamenta en la elevada impedancia de entrada que tienen los voltímetros y que la resistencia de contacto entre el electrodo y el material a medir es mucho menor que la del voltímetro. Se asume que la corriente inyectada circula a través del material de manera uniforme y, por esto, la distancia entre los electrodos de medida de potencial (l) no debería afectar a la medida.

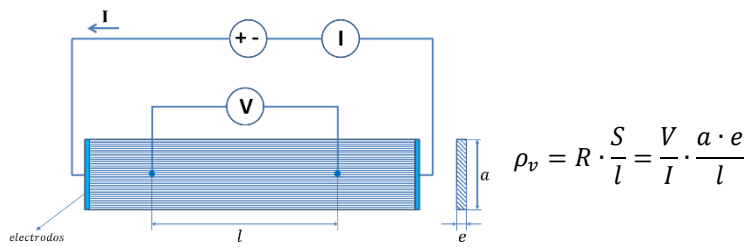


Figura 3-16.- Esquema básico de la obtención de la resistividad por el método de los 4 puntos.

Cuando el material a estudiar no es continuo y ni homogéneo como en el caso del CFRP, surge la duda sobre si los puntos elegidos para la medida de potencial pueden afectar al resultado final. Esta situación puede generar dudas ya que la distribución de la corriente por el material puede no ser homogénea; bien debido a los electrodos de prueba que no tengan la misma buena conexión con todas las fibras, bien por cómo puede ser la interconexión entre las fibras a lo largo del material.

Por tanto, además de garantizar la máxima calidad de los contactos de los electrodos de prueba para que la distribución de corriente sea lo más homogénea posible, el efecto que puede tener la elección de los puntos de medida deberá ser estudiado. También se deberá tener en cuenta el tamaño de dichos electrodos.

Otro aspecto que cabe destacar es que, al ser un material anisotrópico, se deben realizar 3 mediciones para obtener la resistividad en cada una de las direcciones (ρ_x, ρ_y, ρ_z). Ciertamente, el tamaño de las probetas podemos elegirlo adecuadamente para facilitar estas mediciones, pero normalmente, el espesor de éstas suele ser pequeño debido al proceso de fabricación del material. Esto dificulta la medición de ρ_z con el método de los 4 puntos ante la dificultad de colocar los puntos de medida de potencial. Para la medición ρ_x y ρ_y se podrían elegir probetas cuadradas para que el sistema de medida sirva para ambas direcciones, pero si el tamaño del cuadrado de la probeta es muy grande no será fácil asegurar un buen contacto en toda la superficie. Por otro lado, una probeta demasiado pequeña puede no ser representativa del comportamiento del material dado que éste no es demasiado homogéneo.

3.5.2 Otros métodos

Los métodos tradicionales por inyección de corriente tienen sus dificultades para ser aplicados sobre materiales compuestos de CFRP, especialmente en la implementación de contactos de calidad o por garantizar una distribución de corriente uniforme. En los últimos años se han intentado buscar otros métodos que permitan obtener los valores de resistividad con calidad, pero evitando estos inconvenientes. A continuación, se comentarán los más destacados.

3.5.2.1 Método de Montgomery

Este método se desarrolla ante la necesidad de determinar el tensor de resistividades de materiales anisotrópicos, siendo lo más habitual materiales ortotrópicos. Es un método teórico y lleva el nombre de quien lo inició, H.C. Montgomery [26]. Algunos trabajos posteriores han incorporado mejoras para facilitar su uso. El más destacado es el de Dos Santos et al. [31].

El método busca desacoplar la relación entre las resistividades de cada dirección y así encontrar las componentes del tensor de la ecuación (3-2). Este procedimiento lo consigue encontrando una geometría isotrópica equivalente a nuestra probeta original anisotrópica. Lo habitual para este método es trabajar con probetas en forma de paralelepípedo y así facilitar su desarrollo.

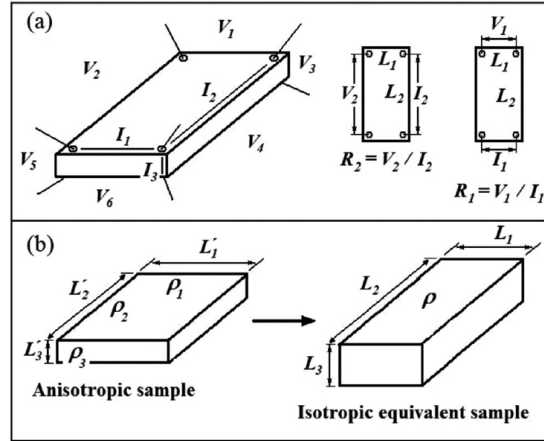


Figura 3-17.- a) Representación de los puntos de aplicación de corriente y medida de potenciales sobre la probeta de material anisotrópico. b) Transformación de Wasscher mediante la cual se obtiene un paralelepípedo isotrópico equivalente [31].

Así que con la inyección de corriente entre dos puntos y la medida del potencial en el lado opuesta de la misma cara de la probeta se determinan unas resistencias equivalentes. Todos los puntos en los que se deben realizar las medidas están indicados Figura 3-17. A partir de estos valores y con ayuda de la Transformación de Wasscher [31] se obtiene una muestra equivalente isotrópica. La relación entre la muestra isotrópica y los valores medidos sobre la muestra anisotrópica permite estimar los valores del tensor de resistividades.

Después de analizar el método, resultaría práctico y fácil de llevar a cabo ya que todas las medidas son superficiales. Esto ha dado lugar a numerosos estudios sobre materiales anisotrópicos [36]–[40].

Para el caso de los compuestos de CFRP tiene algunas restricciones. Las dimensiones de las probetas deben guardar una relación específica entre los diferentes ejes y los valores medidos de las resistencias en cada una de las direcciones limitan la calidad de los resultados. A mayores ratios entre las resistencias medidas en dos caras perpendiculares el error de los resultados aumenta. También hay que tener en cuenta el espesor de las probetas utilizadas para realizar las medidas.

Como se puede observar, es un método que requiere menos preparación y que no es tan sensible a la calidad de las conexiones, ya que la inyección de corriente y la medida de potencial se hace de forma puntual y superficial. Por tanto, no es un método a descartar inicialmente en materiales compuestos de CFRP, pero debido a que requieren unos tamaños de probetas específicos no se ha podido llevar a cabo su análisis en esta tesis.

3.5.2.2 *Método de Corrientes de Foucault*

El método de las Corrientes de Foucault (Eddy Current testing - ECT) es un método basado en principios electromagnéticos y no requiere contacto con la probeta. Si bien no es un método que permite analizar el comportamiento del material, los trabajos realizados para la obtención del tensor de resistividades no son definitivos y obtienen mejores resultados cuando el material compuesto de CFRP dispone de fibras en varias direcciones [8], [41]. No es el caso de la aplicación en WTB. Un trabajo interesante de la aplicación de esta técnica para la determinación de las resistividades del material es el de Bui et al. [28]. En este caso se combina la técnica de inducción de corrientes con la termografía, relacionando el modelo térmico y eléctrico del material compuesto. Se obtienen unos datos preliminares interesantes, especialmente respecto de las ratios entre las resistividades en cada dirección, dada la alta correlación existente con la distribución de temperatura.

Donde sí está teniendo resultados interesantes y puede ser de gran utilidad en la detección de la calidad del material y en la detección de daños como delaminación y pequeñas roturas. En este tipo de aplicaciones presenta una gran velocidad de inspección.

3.6 Bibliografía

- [1] J. C. Watson and J. C. Serrano, "Composites materials for wind blades," *Wind Syst. Mag.*, pp. 46–51, 2010.
- [2] B. A. Newcomb, "Processing, structure, and properties of carbon fibers," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, pp. 262–282, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.
- [3] S. Beckwith, "Resin infusion technology: Part 3 - A detailed overview of RTM and VIP infusion processing technologies," *Sampe J.*, vol. 43, pp. 66–69, 2007.
- [4] G. Barra *et al.*, "Enhanced electrical properties of carbon fiber reinforced composites obtained by an effective infusion process," *2014 IEEE 9th Nanotechnol. Mater. Devices Conf. NMDC 2014*, pp. 88–91, Dec. 2014, doi: [10.1109/NMDC.2014.6997429](https://doi.org/10.1109/NMDC.2014.6997429).
- [5] T. Blythe and D. Bloor, *Electrical Properties of Polymers*. Cambridge University Press, 2008.
- [6] Q. Zhao *et al.*, "Review on the Electrical Resistance/Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polymer," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: [10.3390/app9112390](https://doi.org/10.3390/app9112390).
- [7] N. Kwok and H. T. Hahn, "Resistance Heating for Self-healing Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 13, pp. 1635–1654, 2007, doi: [10.1177/0021998306069876](https://doi.org/10.1177/0021998306069876).
- [8] J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto, and N. Hu, "Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method," *NDT E Int.*, vol. 68, pp. 1–12, Dec. 2014, doi: [10.1016/J.NDTEINT.2014.07.001](https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2014.07.001).
- [9] R. J. Hart and O. I. Zhupanska, "The role of electrical anisotropy and effective conducting thickness in understanding and interpreting static resistance measurements in CFRP composite laminates," *J. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 7, pp. 867–882, 2020, doi: [10.1177/0021998319870860](https://doi.org/10.1177/0021998319870860).
- [10] G. Toray, "Zoltek PX35." <https://zoltek.com/products/px35/> (accessed Apr. 20, 2019).
- [11] "EPSILON Composites." <https://www.epsilon-composite.com/en> (accessed Jan. 17, 2022).
- [12] A. Todoroki, K. Suzuki, Y. Mizutani, and R. Mutsuzaki, "Durability estimates of copper plates electrodes for self-sensing CFRP composites," *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, vol. 4, no. 6, 2010.
- [13] A. Todoroki and J. Yoshida, "Apparent Negative Piezoresistivity of Single-Ply CFRP due to Poor Electrical Contact of Four-Probe Method," in *Advances in Fracture and Strength*, 2005, vol. 297, pp. 610–615, doi: [10.4028/www.scientific.net/KEM.297-300.610](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.297-300.610).
- [14] E. J. Zimney, G. H. B. Dommett, R. S. Ruoff, and D. A. Dikin, "Correction factors for 4-probe electrical measurements with finite size electrodes and material anisotropy: a finite element study," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 7, pp. 2067–2073, Jun. 2007, doi: [10.1088/0957-0233/18/7/037](https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/7/037).
- [15] Shape Technologies Group, "Waterjet machines." .
- [16] P. Scholle, S. Rütger, and M. Sinapius, "Comparison of Electrical Contacting Techniques to Carbon Fiber Reinforced Plastics for Self-Strain-Sensing Applications," *C*, vol. 7, no. 4, 2021, doi: [10.3390/c7040081](https://doi.org/10.3390/c7040081).
- [17] R. M. Sullivan and N. J. Salamon, "A finite element method for the thermochemical decomposition of polymeric materials—I. Theory," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 431–441, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(92\)90035-F](https://doi.org/10.1016/0020-7225(92)90035-F).
- [18] H. L. N. Mcmanus and G. S. Springer, "High Temperature Thermomechanical Behavior of Carbon-Phenolic and Carbon-Carbon Composites, II. Results," *J. Compos. Mater.*, vol. 26, no. 2, pp. 230–255, 1992, doi: [10.1177/002199839202600205](https://doi.org/10.1177/002199839202600205).
- [19] J. Korab, P. Štefánik, Š. Kavecký, P. Šebo, and G. Korb, "Thermal conductivity of unidirectional copper matrix carbon fibre composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 4, pp. 577–581, 2002.

- [20] B. W. James, G. H. Wostenholm, G. S. Keen, and S. D. McIvor, "Prediction and measurement of the thermal conductivity of composite materials," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 20, no. 3, p. 261, 1987.
- [21] M. W. Pilling, B. Yates, M. A. Black, and P. Tattersall, "The thermal conductivity of carbon fibre-reinforced composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 14, no. 6, pp. 1326–1338, 1979.
- [22] G. S. Springer and S. W. Tsai, "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials," *J. Compos. Mater.*, vol. 1, no. 2, pp. 166–173, 1967, doi: 10.1177/002199836700100206.
- [23] D. Hull and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2nd ed. Cambridge University Press, 1996.
- [24] G. Khare, N. Chandra, and J.-F. Silvain, "Application of Eshelby's Tensor and Rotation Matrix for the Evaluation of Thermal Transport Properties of Composites," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 15, no. 2, pp. 117–129, 2008, doi: 10.1080/15376490701810464.
- [25] A. Todoroki, M. Tanaka, and Y. Shimamura, "Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 5, pp. 619–628, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00019-2.
- [26] J. C. Abry, S. Bochard, A. Chateauminois, M. Salvia, and G. Giraud, "In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 925–935, May 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(98)00132-8.
- [27] R. Abid, A. Haddad, H. Griffiths, D. Clark, and C. Stone, "Electrical characterization of aerospace graded carbon fiber reinforced plastic composites under low current DC and impulse energizations," 2013.
- [28] H. K. Bui *et al.*, "Characterization of Electrical Conductivity of Anisotropic CFRP Materials by Means of Induction Thermography Technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 3, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2017.2742979.
- [29] M. Heaney, "Measuring Electrical Conductivity and Resistivity," CRC Press LLC, 2014.
- [30] A. Uhler, "The potentials of infinite systems of sources and numerical solutions of problems in semiconductor engineering," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 34, no. 1, pp. 105–128, 1955, doi: 10.1002/j.1538-7305.1955.tb03765.x.
- [31] C. A. M. dos Santos *et al.*, "Procedure for measuring electrical resistivity of anisotropic materials: A revision of the Montgomery method," *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 8, p. 83703, 2011, doi: 10.1063/1.3652905.
- [32] R. D. Chippendale, "Modelling of the thermal chemical damage caused to carbon fibre composites," University of Southampton, 2013.
- [33] Y. P. Mamunya, V. V. Davydenko, P. Pissis, and E. V. Lebedev, "Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders," *Eur. Polym. J.*, vol. 38, no. 9, pp. 1887–1897, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(02\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00064-2).
- [34] R. Holm, *Electric Contacts. Theory and Applications*, 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [35] A. Todoroki and J. Yoshida, "Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load," *JSME Int. Journal, Ser. A Solid Mech. Mater. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 357–364, Jul. 2004, doi: 10.1299/JSMEA.47.357.
- [36] R. A. Weller, "An algorithm for computing linear four-point probe thickness correction factors," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, no. 9, pp. 3580–3586, 2001, doi: 10.1063/1.1394186.
- [37] R. Busch, G. Ries, H. Werthner, G. Kreiselmeyer, and G. Saemann-Ischenko, "New aspects of the mixed state from six-terminal measurements on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{x}$ single crystals," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 69, no. 3, pp. 522–525, Jul. 1992, doi: 10.1103/PhysRevLett.69.522.

- [38] J. L. González, J. S. Espinoza Ortiz, and E. Baggio-Saitovitch, "Influence of the anisotropy in the c-axis resistivity measurements of high- T_c superconductors," *Phys. C Supercond.*, vol. 315, no. 3, pp. 271–277, 1999, doi: 10.1016/S0921-4534(99)00193-8.
- [39] M. Ueda, T. Yamaguchi, T. Ohno, Y. Kato, and T. Nishimura, "FEM-aided identification of gauge factors of unidirectional CFRP through multi-point potential measurements," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 37–55, 2019, doi: 10.1080/09243046.2017.1423531.
- [40] G. A. Levin, "On the theory of measurement of anisotropic electrical resistivity by flux transformer method," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 2, pp. 714–718, 1997, doi: 10.1063/1.364135.
- [41] X. Xu, H. Ji, J. Qiu, J. Cheng, Y. Wu, and T. Takagi, "Interlaminar contact resistivity and its influence on eddy currents in carbon fiber reinforced polymer laminates," *NDT E Int.*, vol. 94, pp. 79–91, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.NDTEINT.2017.12.003.

Capítulo 4

4 Análisis experimental de la resistividad eléctrica de materiales compuestos de CFRP UD

4.1 Introducción

Una vez realizado todo el estudio previo en el que se ha incluido la estructura de las WTB actuales, de los diferentes procesos para incorporar los materiales compuestos de CFRP en la fabricación de las WTB, de cómo se pueden obtener los laminados de CFRP y de cómo es la estructura interna de este tipo de materiales, queda claro que su caracterización, tanto desde el punto de vista eléctrico como también térmico [1]–[4], requiere de una fuerte experimentación.

Tras la amplia revisión de trabajos existentes sobre el comportamiento de este tipo de materiales, así como el análisis detallado de los resultados que presentan (algunos de los destacados y recientes son los de Newcomb [2], Zhao et al. [5] o Kwok et al. [6]), se puede ver que es difícil reproducir o comparar ciertos resultados. En algunos de los trabajos revisados y que están orientados a la obtención de las resistividades de los CFRP, no siempre se detalla de manera precisa el procedimiento seguido para la preparación de las probetas [7] y, en algunos casos, las probetas se han obtenido por procedimientos muy precisos (cortes de las probetas y pulidos superficiales con máquinas especiales, tratamientos de las superficies de contacto con pinturas conductoras u otras sustancias que mejoran el contacto eléctrico, ...) [8]. Esto hace que, si ya de por sí estamos hablando de un material no homogéneo, estas variables pueden hacer que los resultados obtenidos en cada trabajo no sean reproducibles. Evidentemente si marcan una tendencia y permiten tener ordenes de magnitud de ciertos valores. También permiten conocer que aspectos son los que más condicionan dichos ensayos.

Como el objetivo principal de este capítulo es el de entender mejor el comportamiento de estos materiales, familiarizarse con sus características y ver la mejor manera de obtenerlas, a partir de todo este conocimiento adquirido se han definido una serie de ensayos específicos. Mediante estos ensayos se pretende adquirir experiencia en el tratamiento de este tipo de materiales, identificar de forma más clara aquellos aspectos prácticos que pueden ser más críticos y evaluar la reproducibilidad de determinados ensayos. Cabe destacar, como se ha presentado en el capítulo

previo, que los materiales compuestos utilizados pueden variar ligeramente en función de los elementos que lo componen y de su proceso de fabricación, principalmente. La idea de la reproducibilidad es un aspecto muy relevante desde el punto de vista científico. Para conseguir este objetivo, todos los ensayos realizados para determinar la resistividad del material vendrán acompañados de la metodología seguida para los mismos, los resultados obtenidos junto a unos comentarios derivados de cada uno de ellos y, por último, las conclusiones que se extraen de todo ello.

Además, en un proceso industrial real, muchos de los procedimientos descritos en algunos de estos estudios no son aplicables, bien por las dimensiones de los laminados, bien porque los costes derivados de utilizarlos no serían asumibles. Es por esto que algunos de los ensayos que aquí se presentarán van encaminados a mostrar los efectos y las diferencias que puede haber entre una probeta tratada de forma industrial, a una tratada de forma más precisa y delicada, pensada para ensayos en laboratorio. Este planteamiento tiene por objetivo identificar aspectos que puedan ser críticos y que puedan afectar al resultado final del sistema LPS.

A partir de los resultados obtenidos de estos ensayos, se dispondrá de un conocimiento que permitirá valorar las diferentes maneras de abordar el modelado de los compuestos de CFRP. También, a partir de la información obtenida en estos ensayos podremos valorar que elementos son más significativos en el proceso de homogeneización del comportamiento de este tipo de materiales y bajo qué condiciones puede ser aceptable dicha aproximación.

4.2 Ensayos para determinar la dependencia de los contactos eléctricos en los ensayos

La importancia de los contactos eléctricos y la dificultad para determinar el valor de la resistencia de contacto sigue siendo un campo donde queda trabajo por hacer. Resulta especialmente delicado en aquellas ocasiones donde se desea analizar el comportamiento de materiales con baja resistividad o donde las pérdidas asociadas a los contactos pueden resultar críticas [6], [9].

Dada la importancia que pueden tener los contactos eléctricos en los ensayos para la obtención de la resistividad del CFRP UD, en este trabajo se marcó el objetivo de fijar un criterio para que en todos los ensayos se procediera de la misma manera. Por ello, lo primero que se realizó fue un estudio específico para ver la mejor manera de realizar dichos contactos.

En los procesos de fabricación industrial, para realizar un contacto eléctrico superficial entre una lámina conductora y el CFRP, se pule la superficie del material compuesto, se fija el contacto a dicha superficie y, a continuación, se realiza el proceso de curado del conjunto. En este proceso se genera el vacío, de forma que entre el contacto eléctrico que permitirá la unión al LPS y el material compuesto, existe una presión que garantizará el buen contacto eléctrico entre ambas superficies. También se ha estudiado que un laminado de CFRP varía su resistividad al encontrarse sometido a esfuerzos mecánicos [10]. Esto quiere decir que una fuerza excesiva puede modificar la estructura del material y, por tanto, su comportamiento eléctrico.

4.2.1 Objetivos del ensayo

Por todo lo explicado anteriormente, en primer lugar, se buscó un sistema de fijación de los electrodos de contacto y un valor de compromiso para la presión entre los electrodos de prueba y las probetas.

Así que el objetivo de este ensayo era encontrar un sistema sencillo, que minimizara los efectos asociados al contacto de los electrodos y que se pudiese mantener para todos los ensayos a realizar. A su vez, se pretendía que la mayor parte de la superficie de la probeta quedase libre para poder realizar mediciones sobre ella. Por último, estas pruebas se realizaron con electrodos de diferentes materiales conductores y de diferentes espesores, para ver cuál de ellos permitía obtener un mejor resultado. Dado que se ha utilizado un sistema de pulido similar al que se utiliza a nivel industrial, también se desea observar su afectación a la medida.

4.2.2 Descripción del ensayo y resultados

- a) En primer lugar, se realizó un análisis de la evolución de la resistencia total de una probeta con contactos superficiales, variando la presión del contacto. Para conseguir este propósito, se fue variando el peso aplicado sobre los electrodos de prueba y así encontrar la presión mínima que permitiera tener un buen contacto eléctrico.

El ensayo se realizó por ambas caras de una misma probeta y así ver el efecto que podía tener la calidad del pulido superficial. Se utilizaron pesas de 2 kg y se fueron añadiendo de forma progresiva para poder ver la evolución del valor de resistencia total de la probeta, es decir, la resistencia de contacto de los electrodos más la resistencia de la probeta de CFRP. En este caso se realizó con contactos superficiales. Aunque este sistema no resultará muy práctico en los ensayos, si permite obtener unos primeros resultados del comportamiento de los contactos.



Figura 4-1.- Detalle de cómo se variaba la presión sobre los contactos superficiales añadiendo peso sobre ellos.

Los resultados obtenidos de este ensayo se muestran a continuación de forma gráfica (Los valores se encuentran en el Anexo A.1).

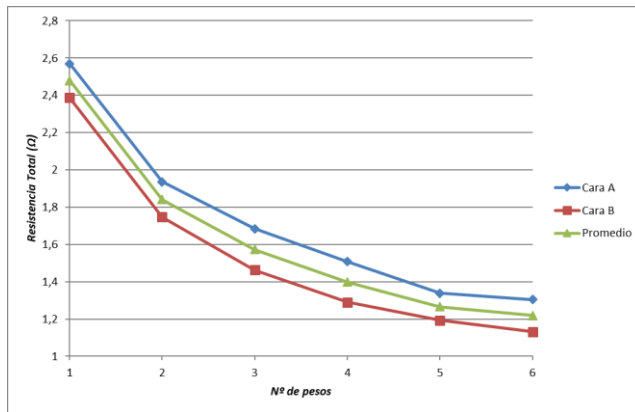


Figura 4-2.- Evolución de la resistencia total de la probeta en función de fuerza aplicada sobre los electrodos de prueba. Los electrodos utilizados son los de cobre.

b) También se realizó un ensayo similar, pero con contactos laterales, tal y como los que se utilizarán para la obtención de la resistividad del material. En este caso se realizó el mismo montaje que se utilizará para la dirección de las fibras (dirección X), que es donde la superficie de contacto es menor y más complicado garantizar una buena conexión con todas las fibras. En esta ocasión, se utilizó una llave dinamométrica para variar el par de apriete y así, de una forma cómoda, poder mantener el mismo valor para todos los ensayos.

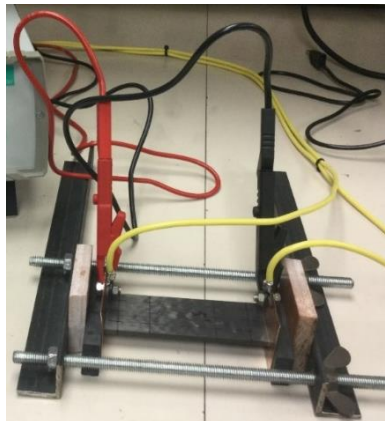


Figura 4-3.- Detalle del montaje para determinar el par de apriete a aplicar sobre los contactos.

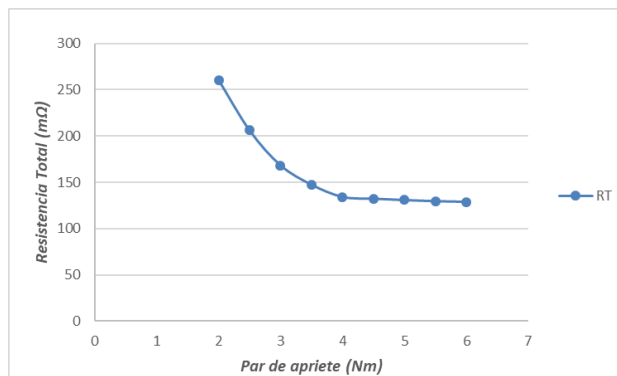


Figura 4-4.- Evolución de la resistencia total de la probeta en función del par de apriete aplicado sobre los electrodos de prueba. Los electrodos utilizados son los de cobre.

4.2.3 Análisis de los resultados y comentarios

En este análisis se probaron diferentes materiales conductores para el electrodo de contacto con el objetivo de obtener el mejor resultado posible. Se probaron 3 tipos de material:

- Lámina de cobre de 0,35 mm de espesor.
- Lámina de latón de 0,35 mm de espesor.
- Lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor.

Los resultados entre la lámina de latón y la de cobre no fue significativa. Con la lámina de aluminio se esperaba obtener un mejor resultado por ser más delgada y tener una mayor facilidad para adaptarse a la superficie de la probeta. Al realizar esta prueba, los resultados no mostraron mejora significativa y, además, después de cada ensayo se debía renovar el electrodo de contacto puesto que quedaba deformado. Por tanto, podría ser una buena opción, pero asumiendo este coste.

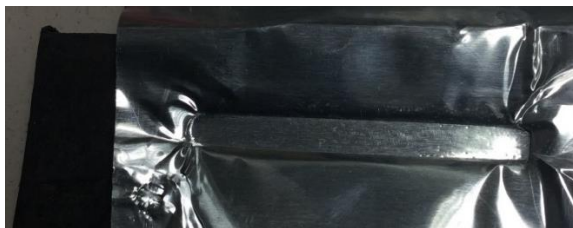


Figura 4-5.- Detalle del estado del electrodo de aluminio después del ensayo.

En la *Figura 4-6* se puede ver la solución adoptada, aunque todos los datos presentados en este apartado son con la lámina de cobre, que es la que resultó más estable y con mejores resultados.

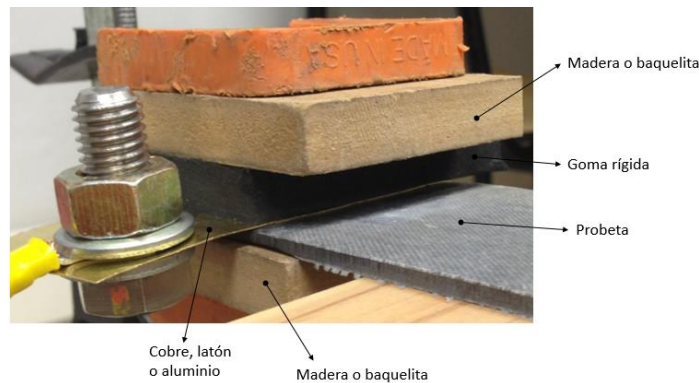


Figura 4-6.- Detalle del sistema de fijación entre el electrodo de prueba y la probeta de CFRP

En los resultados obtenidos se puede apreciar claramente la dependencia de la resistencia en función de la fuerza aplicada sobre el contacto. También se puede observar cómo, llegado un punto, la resistencia del conjunto no mejora significativamente, aunque se aumente la presión ejercida entre el electrodo de prueba y la probeta de carbono.

En base a esta información se determinó que, en cada ensayo, se empezaría aplicando un par de apriete de 5 Nm, se tomaría el valor de la resistencia total y, a continuación, se aumentaría el par de apriete a 5,5 Nm. Si la diferencia entre estos dos valores no era significativa, se dejaría este último valor para realizar el resto de los ensayos. En el caso de que la diferencia entre ambas medidas sí

fuese significativa, se pasaba al siguiente valor del par de apriete y así sucesivamente hasta encontrar este punto de compromiso.

En el caso que se muestra la *Figura 4-4*, la disminución de la resistencia total representa, entre estos dos valores de par de apriete (5 – 5,5 Nm), un valor < 1 % del valor final total. Se considera que esta aproximación resulta aceptable para el presente estudio.

No se puede establecer un valor fijo de presión dado que, según la dirección de medida, la superficie de contacto cambia bastante por las dimensiones de las probetas. También cabe decir que, en todos los ensayos realizados, no fue necesario incrementar el par de apriete por encima de los 6 Nm. Al utilizar una llave dinamométrica, resultaba sencillo asegurar que la presión fuese la misma en todos los puntos de la superficie de contacto.

4.3 Ensayos para determinar la dependencia de la resistividad del material con la corriente

4.3.1 Objetivo del ensayo

Otro de los aspectos que se ha querido estudiar es la dependencia que existe entre la resistividad del material con respecto a la corriente que lo atraviesa. Este comportamiento se ve reflejado por la temperatura que adquiere la probeta y como esta puede afectar a las características del material. En este caso, al ser un material anisotrópico, es necesario realizar este estudio para cada una de las direcciones. Como precedentes a nuestro estudio está el trabajo realizado por Jawad et al. [11]. En él se detalla cómo al ser un material anisotrópico desde el punto de vista eléctrico, también lo será desde el punto de vista térmico. El aumento de esta temperatura en el material es la principal causa de la delaminación del material y de la pérdida de propiedades mecánicas y eléctricas. La temperatura en las conexiones también es un elemento a tener muy presente.

4.3.2 Descripción del ensayo y resultados

Para realizar este ensayo se utiliza el mismo montaje que se utilizará para la obtención de la resistividad por el método de los 2 puntos. Para conseguir ver esta dependencia, se va variando la corriente que atraviesa el material. Mediante la medida de la tensión y la corriente, se determina la resistencia total del sistema, incluida la resistencia de contacto. También se monitoriza la temperatura de la probeta para ver como evoluciona.

Este ensayo se repite con una probeta de cada espesor y, una vez preparada la probeta, se realiza el ensayo con corriente variable. Las probetas utilizadas para estos ensayos tienen unas dimensiones de 80 mm de longitud y su ancho es de 35 mm.

Al principio y al final de cada ensayo se realizan medidas con Micro-Óhmetros industriales con el fin de observar la evolución de las probetas. Estos instrumentos utilizan el método de los 4 puntos, pero, en este caso, la resistencia de contacto está incluida al medir directamente sobre los propios electrodos.

El objetivo de estas medidas es comprobar que la probeta continúa manteniendo las condiciones iniciales al finalizar el ensayo. Dependiendo de cada instrumento, la información se presenta con la mejor resolución que cada uno de ellos permite obtener.

Para las probetas de mayor espesor (las de 5 mm), se realiza el ensayo con valores crecientes y luego con valores decrecientes. Para el resto de probetas (las de 3mm y las de 1,5 mm) sólo se realizan las pruebas con corrientes decrecientes. Para cada probeta utilizada se realizan dos mediciones, es decir, al finalizar el ensayo se deshace el montaje y se vuelve a preparar. De esta forma se puede evaluar como de sensible es el ensayo a la realización de las conexiones. Todos los valores obtenidos en el desarrollo de estos ensayos se encuentran en el Anexo A.2.

4.3.2.1 Medida en dirección X (dirección de las fibras).

Para la medición en coordenadas X se utiliza el montaje de la Figura 4-3.

a) Probeta de 5 mm

Los valores iniciales y finales R_T

PG _x	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	93,96 mΩ	95,33 mΩ
	Keithley 2100	93 mΩ	95 mΩ
Medida 2	Resistomat 2316	66,76 mΩ	68,46 mΩ
	Keithley 2100	68 mΩ	69 mΩ

Tabla 4-1.- Probeta PG en dirección X. Valores de las dos medidas realizadas con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo:

T^a Inicial: 20,2 °C

T^a Final: 28,5 °C

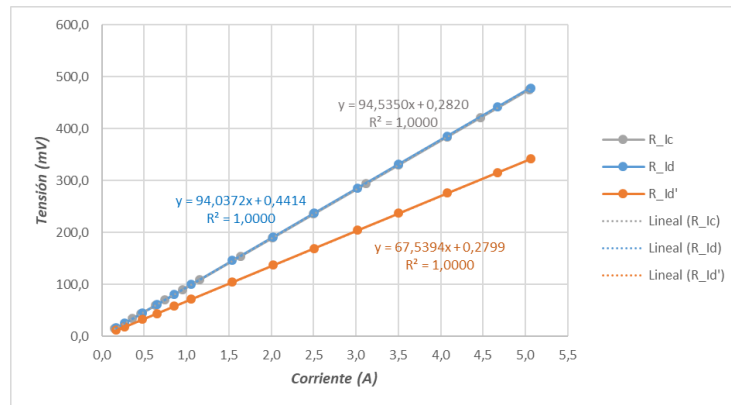


Figura 4-7.- Medida en dirección X. Probeta de 5 mm. R_{Ic}: Corriente Creciente de la 1^a conexión; R_{Id}: Corriente Decreciente de la 1^a conexión; R_{Id'}: Corriente Decreciente de la 2^a conexión.

b) Probeta de 3 mm

Los valores iniciales y finales R_T

PM _x	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	153,27 mΩ	154,48 mΩ
	Keithley 2100	153 mΩ	154 mΩ
Medida 2	Resistomat 2316	151,75 mΩ	152,28 mΩ
	Keithley 2100	151 mΩ	153 mΩ

Tabla 4-2.- Probeta PM en dirección X. Valores de las dos medidas realizadas con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

T^a Inicial: 20,3 °C

T^a Final: 30,2 °C

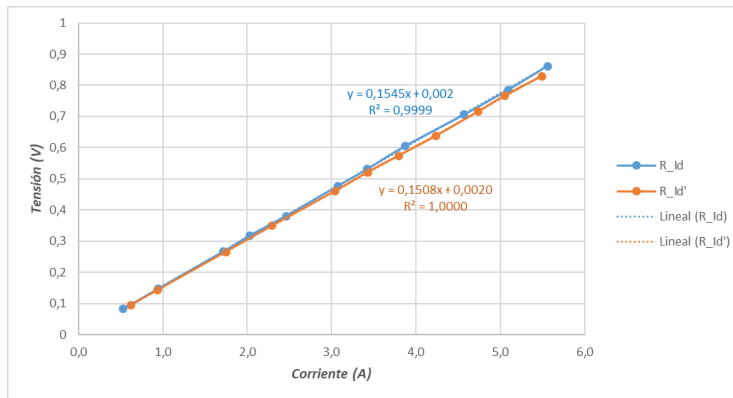


Figura 4-8.- Medida en dirección X. Probeta de 3 mm. R_{Id}: Corriente Decreciente de la 1ª conexión; R_{Id'}: Corriente Decreciente de la 2ª conexión.

c) Probeta de 1,5 mm

Los valores iniciales y finales R_T

PF _x	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	146,38 mΩ	148,12 mΩ
	Keithley 2100	146 mΩ	147 mΩ
Medida 2	Resistomat 2316	132,26 mΩ	135,33 mΩ
	Keithley 2100	133 mΩ	135 mΩ

Tabla 4-3.- Probeta PF en dirección X. Valores de las dos medidas realizadas con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

T^a Inicial: 20,5 °C

T^a Final: 33,3 °C

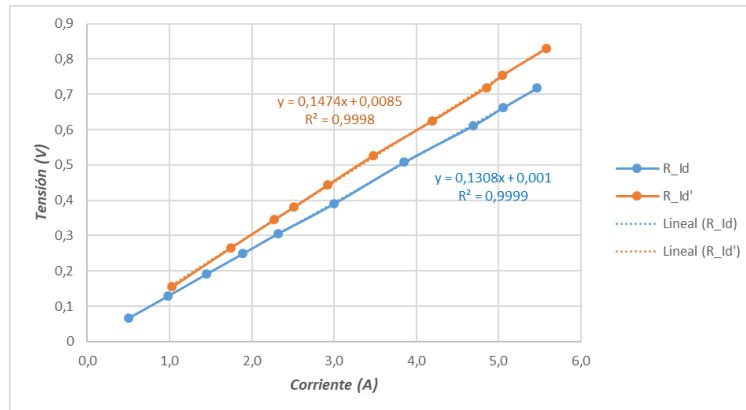


Figura 4-9.- Medida en dirección X. Probeta de 1,5 mm. R_{Id}: Corriente Decreciente de la 1ª conexión; R_{Id'}: Corriente Decreciente de la 2ª conexión.

4.3.2.2 Medida en dirección Y (transversal a las fibras)

Para la medición en coordenadas Y se utiliza el montaje siguiente:

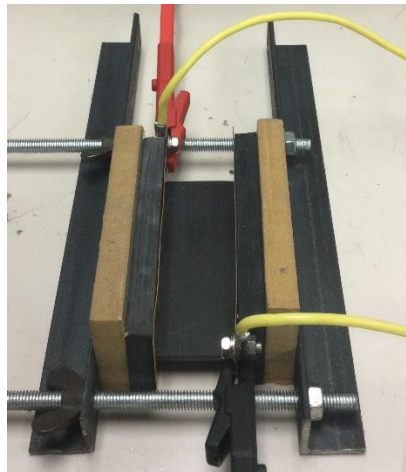


Figura 4-10.- Montaje para determinar, por el método de los 2 puntos, la dependencia de la resistencia de la probeta con respecto a la corriente, en la dirección Y (transversal a las fibras).

a) Probeta de 5 mm – Probeta 1

Los valores iniciales y finales R_T

PG _{Y1}	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	7,838 Ω	12,552 Ω
	Keithley 2100	7,826 Ω	12,554 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	---	---
	Keithley 2100	---	---

Tabla 4-4.- Probeta 1 PG en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

Tª Inicial: 21,4 °C

Tª Final: 114,0 °C

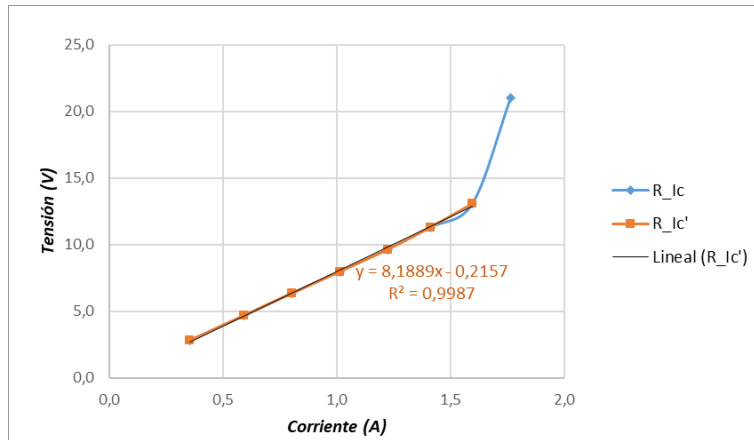


Figura 4-11.- Medida en dirección Y. Probeta 1 de 5 mm. R_Ic: Corriente Creciente de la 1ª conexión; R_Ic': Corriente Creciente de la 1ª conexión hasta antes de iniciarse el aumento de la temperatura.

Durante este ensayo, al alcanzar el valor de 1,764 A, la temperatura empezó a subir de forma continua y el valor de la corriente empezó a disminuir, también de forma continua. La lectura no se estabilizaba. La tensión se mantenía constante gracias al control de la fuente de alimentación utilizada. Al alcanzar el valor de 114,0 °C, se suspendió el ensayo. Una vez parado el ensayo, se dejó enfriar la probeta (24,5 °C) y se volvió a medir la resistencia total para evaluar el estado de la misma.

Como se puede observar en la *Tabla 4-4*, el valor medido después de que la probeta recuperara la temperatura ambiente cambió de forma significativa con respecto al medido antes de iniciar el ensayo. Observando la gráfica, se puede ver que, hasta alcanzar el valor de corriente que inició el aumento descontrolado de la temperatura, la probeta tenía un comportamiento lineal.

b) Probeta de 5 mm – Probeta 2

Debido al problema detectado con la probeta anterior, se repite el ensayo con una nueva probeta de las mismas dimensiones. En este caso se limita la corriente máxima y se aplican los valores de forma decreciente.

Los valores iniciales y finales R_T

PG _{Y2}	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	8,541 Ω	8,653 Ω
	Keithley 2100	8,552 Ω	8,649 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	8,432 Ω	8,541 Ω
	Keithley 2100	8,437 Ω	8,553 Ω

Tabla 4-5.- Probeta 2 PG en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

T^a Inicial: 21,4 °C

T^a Final: 41,3 °C

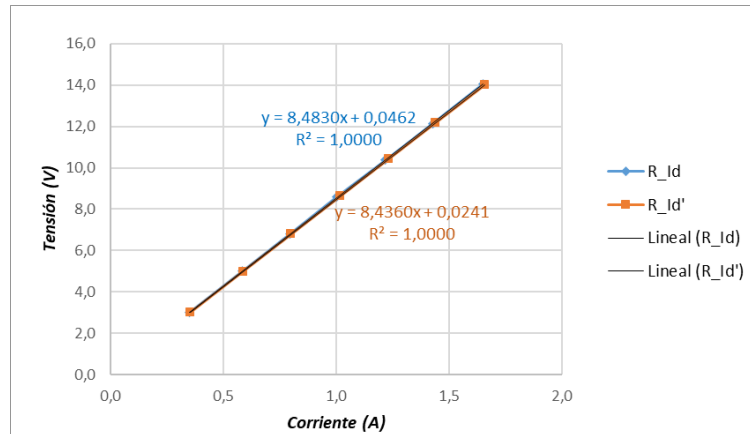


Figura 4-12.- Medida en dirección Y. Probeta 2 de 5 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1^a conexión; R_Id': Corriente Decreciente de la 2^a conexión.

c) Probeta de 3 mm

Los valores iniciales y finales de R_T

PM _Y	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	14,831 Ω	15,220 Ω
	Keithley 2100	14,713 Ω	15,196 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	14,482 Ω	14,744 Ω
	Keithley 2100	14,457 Ω	14,738 Ω

Tabla 4-6.- Probeta PM en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

T^a Inicial: 21,6 °C

T^a Final: 56,8 °C

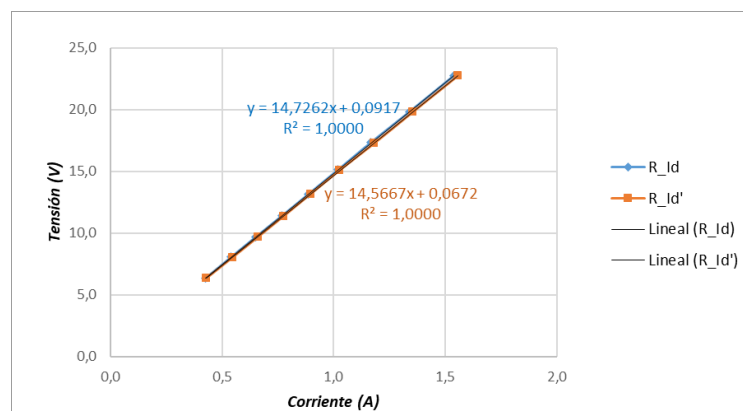


Figura 4-13.- Medida en dirección Y. Probeta de 3 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1^a conexión; R_Id': Corriente Decreciente de la 2^a conexión.

d) Probeta de 1,5 mm

Los valores iniciales y finales de R_T

PF _Y	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	16,644 Ω	16,913 Ω
	Keithley 2100	16,638 Ω	16,922 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	16,353 Ω	16,513 Ω
	Keithley 2100	16,374 Ω	16,488 Ω

Tabla 4-7.- Probeta PF en dirección Y. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

T^a Inicial: 21,6 °C

T^a Final: 63,0 °C

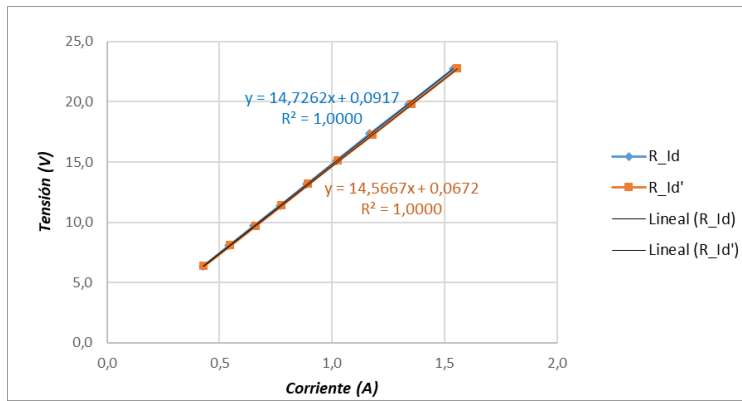


Figura 4-14.- Medida en dirección Y. Probeta de 1,5 mm. R_{Id}: Corriente Decreciente de la 1^a conexión; R_{Id'}: Corriente Decreciente de la 2^a conexión.

4.3.2.3 Medida en dirección Z (perpendicular a las fibras)

Para la medición en coordenadas Z se utiliza el montaje similar a los anteriores, pero con una superficie mayor. De esta manera se garantiza que se ejerce una presión homogénea en toda la superficie de contacto entre la probeta y el electrodo. A continuación, se muestra cómo se realizó el montaje para la medición.



Figura 4-15.- Montaje para determinar, por el método de los 2 puntos, la dependencia de la resistencia de la probeta con respecto a la corriente, en la dirección Z (perpendicular a las fibras).

a) Probeta de 5 mm

Los valores iniciales y finales de R_T

PGz	Micro-Óhmetro	R_T Inicial	R_T Final
Medida 1	Resistomat 2316	0,948 Ω	0,950 Ω
	Keithley 2100	0,941 Ω	0,954 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	0,944 Ω	0,948 Ω
	Keithley 2100	0,939 Ω	0,945 Ω

Tabla 4-8.- Probeta PG en dirección Z. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

T^a Inicial: 20,8 °C

T^a Final: 60,4 °C

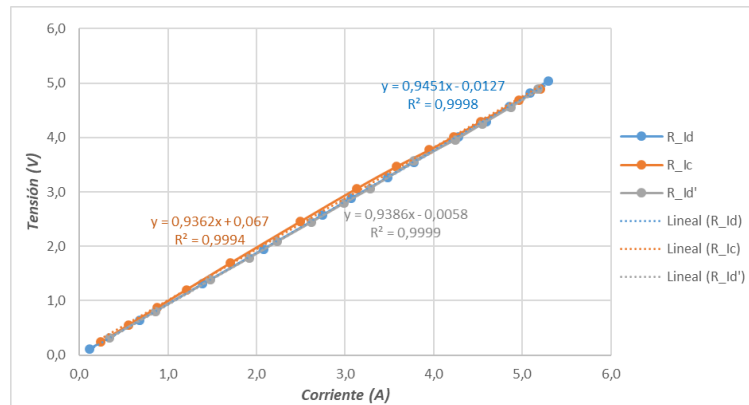


Figura 4-16.- Medida en dirección Z. Probeta de 5 mm. R_{Ic} : Corriente Creciente de la 1ª conexión; R_{Id} : Corriente Decreciente de la 1ª conexión; R_{Id}' : Corriente Decreciente de la 2ª conexión.

b) Probeta de 3 mm

Los valores iniciales y finales de R_T

PMz	Micro-Óhmetro	R_T Inicial	R_T Final
Medida 1	Resistomat 2316	0,533 Ω	0,541 Ω
	Keithley 2100	0,528 Ω	0,546 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	0,547 Ω	0,560 Ω
	Keithley 2100	0,542 Ω	0,557 Ω

Tabla 4-9.- Probeta PM en dirección Z. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

Tª Inicial: 20,8 °C

Tª Final: 56,2 °C

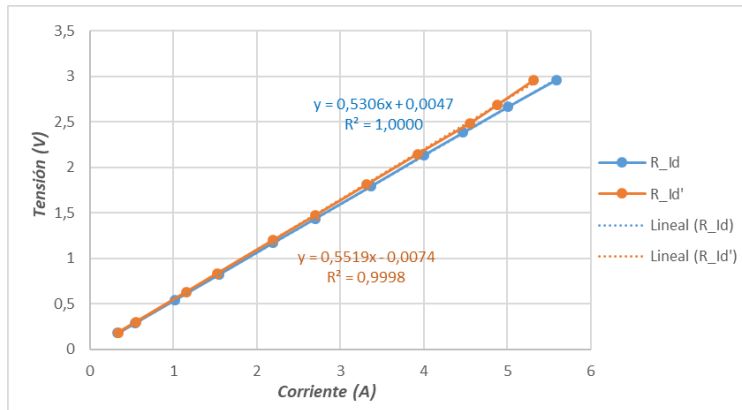


Figura 4-17.- Medida en dirección Z. Probeta de 3 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1ª conexión; R_Id': Corriente Decreciente de la 2ª conexión.

c) Probeta de 1,5 mm

Los valores iniciales y finales de R_T

PFz	Micro-Óhmetro	R _T Inicial	R _T Final
Medida 1	Resistomat 2316	0,244 Ω	0,251 Ω
	Keithley 2100	0,239 Ω	0,255 Ω
Medida 2	Resistomat 2316	0,246 Ω	0,258 Ω
	Keithley 2100	0,244 Ω	0,254 Ω

Tabla 4-10.- Probeta PF en dirección Z. Valores de la medida realizada con dos Micro-Óhmetros diferentes.

Gráficas de la evolución del ensayo

Tª Inicial: 20,9 °C

Tª Final: 52,2 °C

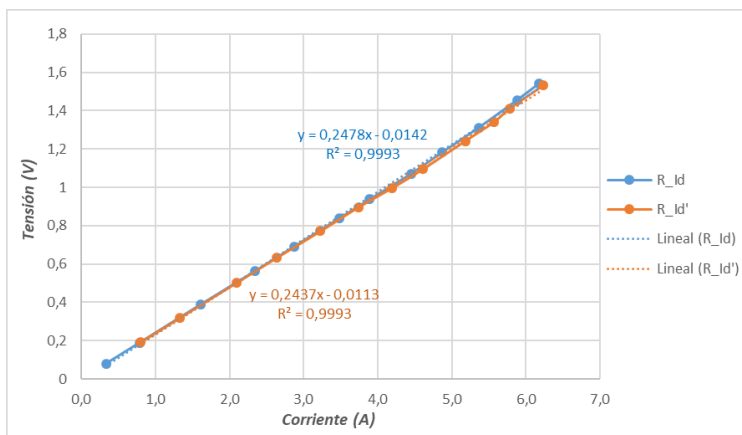


Figura 4-18.- Medida en dirección Z. Probeta de 1,5 mm. R_Id: Corriente Decreciente de la 1ª conexión; R_Id': Corriente Decreciente de la 2ª conexión.

4.3.3 Ensayo con corriente elevada

Después de lo observado en el ensayo en la dirección transversal de las fibras (dirección Y), donde la temperatura empezó a aumentar de forma descontrolada y se tuvo que suspender el ensayo, se creyó oportuno repetir los ensayos aplicando, en cada una de las direcciones, la corriente máxima disponible en el laboratorio. Con estos ensayos se podrá analizar la relación, en cada una de las direcciones, entre la corriente y la temperatura.

Para este ensayo sólo se utilizan las probetas de 5 mm, las de mayor espesor. En esta ocasión, y dada la similitud de los valores obtenidos con ambos Micro-Óhmetros, sólo se medirá la resistencia total del sistema, antes y después del ensayo, con el Resistomat 2316, que es el de mayor calidad de los que se dispone. Durante todo el ensayo se mide la corriente aplicada y la tensión en bornes de los electrodos de prueba. Por último, también se mide la temperatura inicial y final en la superficie de la probeta.

4.3.3.1 Medida en dirección X (dirección de las fibras)

En este caso se utiliza la misma probeta del apartado 4.3.2.1, dado que al finalizar el ensayo parecía conservar sus condiciones iniciales.

La probeta estuvo sometida a la corriente indicada en la tabla siguiente durante 3' 40". Dado que el sistema se encontraba estable transcurrido este intervalo de tiempo, se detuvo el ensayo.

PG _{X1}	Inicial	Final
R _T	84,28 mΩ	86,42 mΩ
V _{medida}	2,521 V	2,478 V
I _{medida}	30,38 A	30,38 A
T ^a	22 °C	101 °C

Tabla 4-11.- Valores del ensayo 1 a corriente máxima en la dirección X.

En este caso, la temperatura se tomó con una cámara térmica. De esta forma se podía observar la totalidad de la superficie.

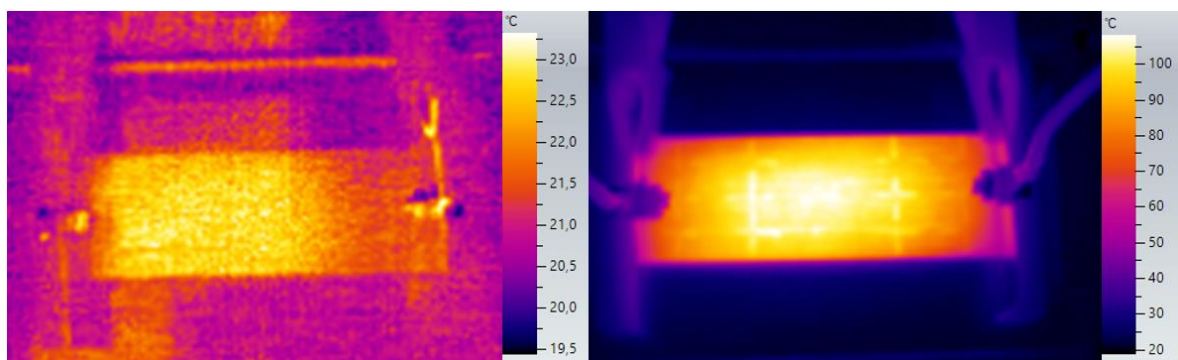


Figura 4-19.- Imagen térmica de la superficie de la probeta en el ensayo 1: a) al iniciar el ensayo; b) al finalizar el ensayo.

Dado que en la dirección X se había observado una mayor dependencia del contacto y viendo que aparentemente la probeta conservaba su estado inicial, se deshace el montaje y se vuelve a repetir

todo el proceso, dando la vuelta a la probeta. De esta forma se puede ver la reproducibilidad del ensayo.

De nuevo, la probeta se sometió al mismo tiempo de ensayo, es decir, 3' 40". Transcurrido este intervalo de tiempo, la temperatura y el resto de valores se mantenían estables y se detuvo.

PG _{X2}	Inicial	Final
R _T	69,46 mΩ	68,72 mΩ
V _{medida}	2,124 V	2,091 V
I _{medida}	30,40 A	30,40 A
T ^a	22,7 °C	103 °C

Tabla 4-12.- Valores del ensayo 2 a corriente máxima en la dirección X.

De igual manera que en el caso anterior, se tomó la temperatura con la cámara térmica sobre la superficie de la probeta.

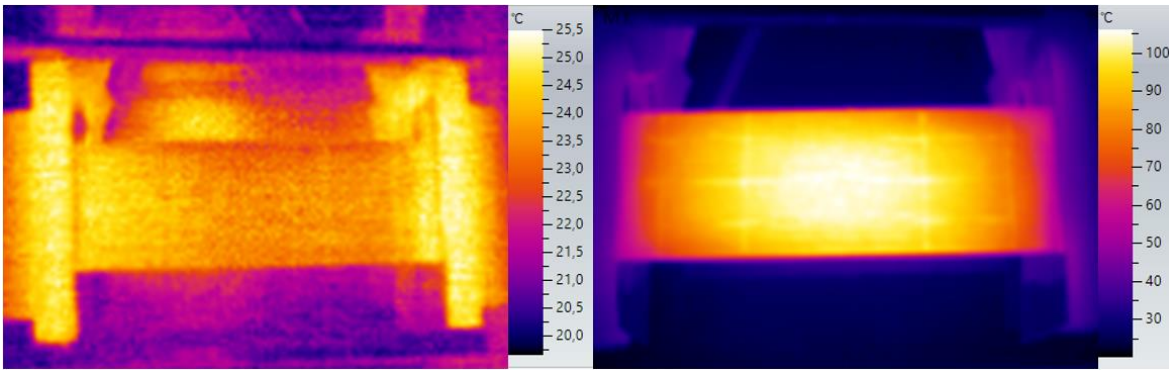


Figura 4-20.- Imagen térmica de la superficie de la probeta en el ensayo 2: a) al iniciar el ensayo; b) al finalizar el ensayo.

4.3.3.2 Medida en dirección Y (transversal a las fibras)

En este caso, dado que la primera probeta utilizada sufrió daños durante el ensayo del apartado 4.3.2.2.a, se utiliza la probeta 2. Esta probeta se ensayó con corriente controlada y de forma decreciente. El valor final de la resistencia total era similar al valor inicial y, por tanto, se considera que se encuentra en buen estado.

La probeta estuvo sometida a las condiciones indicadas en la tabla siguiente durante 32". En este caso, la tensión aplicada sobre la probeta se mantuvo prácticamente constante pero la corriente fue decreciendo con el aumento de la temperatura hasta el momento de detener el ensayo.

PG _Y	Inicial	Final
R _T	8,636 Ω	10,231 Ω
V _{medida}	30,27 V	30,33 V
I _{medida}	3,505 A	1,653 A
T ^a	22,8 °C	152 °C

Tabla 4-13.- Valores del ensayo a corriente máxima en la dirección Y.

4.3.3.3 Medida en dirección Z (perpendicular a las fibras)

En este caso se utiliza la misma probeta del apartado 4.3.2.3.

La probeta estuvo sometida a la corriente indicada durante 3' 40'', es decir, el mismo tiempo que en el caso de la medida en la dirección X. Dado que el sistema se encontraba estable transcurrido este intervalo de tiempo, se detuvo.

PGz	Inicial	Final
R_T	1,187 Ω	0,817 Ω
V_{medida}	7,382 V	6,231 V
I_{medida}	8,82 A	8,83 A
T^a	23,2 °C	81 °C

Tabla 4-14.- Valores del ensayo a corriente máxima en la dirección Z.

En este caso, dado que la parte accesible de la probeta es muy pequeña y los elementos auxiliares de sujeción dificultaban la medida con la cámara térmica, la medida de temperatura se realizó con un termómetro laser, focalizando en la probeta.

4.3.4 Análisis de los resultados y comentarios

Una vez finalizados los ensayos para ver la evolución de la resistividad en función de la corriente que circula por el material en cada una de sus direcciones, los resultados obtenidos permiten obtener algunas conclusiones relevantes y que ayudan a entender mejor el comportamiento de este tipo de materiales.

- 1) El primer resultado que cabe destacar es la alta linealidad que se observa en el comportamiento del material para todas las direcciones, siempre que el material se encuentre en una zona térmicamente estable. Además, dado que en estos ensayos se realizaba un seguimiento de la resistencia total del sistema, es decir, incluyendo la resistencia con los electrodos de contacto, esto indica que el contacto entre los electrodos de prueba y la probeta también tienen un comportamiento lineal.
- 2) Dado que con todas las probetas se han realizado dos mediciones en las mismas condiciones, esto ha permitido observar como en el caso de la medida en dirección X, la conexión entre la probeta y los electrodos de contacto es mucho más crítica y sensible (en algún caso > 25%), que en el caso de la dirección Y y Z, donde los valores se mantienen prácticamente sin cambios (< 1,5%).
- 3) Si entendemos que el electrodo de contacto, especialmente en la dirección X, debería de ser capaz de establecer conexión eléctrica con todas y cada una de las fibras del material para que la corriente se distribuya de una forma más o menos uniforme por todo el material (véase la justificación en el capítulo anterior), se observa que con el pulido realizado es difícil de conseguir. Por otro lado, es el proceso industrial habitual.

Una forma de mejorarlo es pintando esta superficie con pintura de plata, donde esta tiene más facilidad para adaptarse a las irregularidades del material que el electrodo de cobre, pero si la superficie tiene grandes dimensiones el coste puede ser prohibitivo.

- 4) En el caso de la dirección Y y Z, al ser un material compuesto de fibra larga, esta llega de un extremo al otro de la probeta. Por tanto, sólo con que en algún punto de la fibra exista contacto con el electrodo y dada la buena conductividad en X, es suficiente para conseguir un valor más estable.
- 5) Viendo los valores de resistencia total medidos, queda claro que, en el caso de la dirección en X, la resistencia de contacto resulta crítica para la obtención de la resistividad del material. En el caso de la dirección Y y Z no está tan clara que su importancia sea tan elevada. De hecho, existe algún estudio sobre CFRP UD donde, para obtener la resistividad del material, la resistencia de los contactos en estas direcciones se desprecia [10]. En nuestro caso esperamos obtener, con los resultados del resto de ensayos que se realizarán, una justificación más concluyente sobre estos valores de resistividad.
- 6) La bibliografía revisada y comentada indica la clara diferencia de las resistividades que tiene el CFPR UD fabricado con láminas de prepreg, para cada una de sus direcciones. Alguno de estos trabajos también muestra que la conductividad térmica también varía de una dirección del material a otra. Un trabajo destacable en este sentido es el de Jawad et al. [11].

En los ensayos que se han realizado en este trabajo y con las corrientes que se han podido inyectar, podemos extraer algunas conclusiones:

- En la dirección de las fibras (X), el material tiene la resistividad eléctrica más pequeña y es capaz de disipar la energía aplicada sin que el material haya sufrido. Esto lo muestra el estado térmico estable que se alcanza.
- En la dirección perpendicular a las fibras (Z), debido a la dificultad para medir la temperatura, no se pueden sacar unas conclusiones tan claras. Si bien el sistema ha alcanzado la estabilidad térmica, el valor final de la resistencia total ha disminuido, indicando que el material ha sufrido algún tipo de deterioro, que en este caso apunta a que ha aumentado la interacción entre las fibras, haciendo disminuir la resistividad del material.
- En la dirección transversal a las fibras (Y), es donde se ha observado que, con un valor más pequeño de corriente, la probeta no se estabilizaba térmicamente y el ensayo se debía suspender. En este caso, el valor final de la resistencia total aumentaba significativamente respecto al valor inicial. Dado que, en esta dirección, el espesor de la probeta es pequeño y la conductividad del material está condicionada por la interacción entre fibras, este aumento de la temperatura puede deberse al aumento de la densidad de corriente a través de ellas y de ahí el incremento del efecto térmico.

- Respecto a la temperatura alcanzada al aplicar la corriente en dirección Y, se observa el valor crítico entorno a los 120 °C. Esta temperatura está en el rango de valores habituales que se suele utilizar para el curado de este tipo de materiales compuestos que incorporan resinas termoestables tipo epoxi. También, este valor crítico de temperatura está en el rango recomendado de temperaturas de servicio para las resinas utilizadas. Por tanto, podría justificar el deterioro observado.

Type	Maximum Service Temperature	Characteristics
Phenolic	80-100°C	Excellent fire, smoke and toxicity properties (FST).
120°C Curing Epoxy	100°C	Highly toughened epoxy systems usually exhibit good adhesion for honeycomb bonding.
180°C Curing Epoxy	130-155°C	Toughened epoxy systems aiming for maximum hot wet properties.
Bismaleimides (BMI) and polyimides	260°C	Long cure cycles needed to obtain best properties. Temperature resistance main priority, while preserving handling and toughness qualities.

Tabla 4-15.- Valores de temperatura de servicio para diferentes tipos de resina [12].

Otro elemento que puede verse afectado por el incremento de temperatura y que puede influir en la interacción entre fibras, es el tipo de apresto (sizing). Las características de este recubrimiento no están documentadas y entran dentro del know-how de cada fabricante [13]. No es el caso del material utilizado en estos ensayos ya que, como se pudo ver en el estudio con SEM del capítulo anterior, no se observaban diferencias entre la matriz y el entorno cercano de las fibras.

4.4 Obtención de las resistividades del material por mediante el método de los 2 puntos

4.4.1 Objetivos y metodología seguida en los ensayos

Para la obtención de las resistividades (ρ_x, ρ_y, ρ_z) del material por el método de los 2 puntos, dados los resultados obtenidos en los test previos, se tendrán en cuenta algunos aspectos:

- Dada la dependencia que se ha observado con respecto a los contactos, especialmente en la dirección X, se preparan 5 probetas de cada uno de los espesores disponibles de material prepreg. Para el caso del laminado pultruido sólo se dispondrá de una probeta del espesor disponible. Las dimensiones de estas probetas es de 100 mm de longitud y 35 mm de ancho¹.
- Para cada probeta se realizan dos medidas, rehaciendo en cada caso la conexión. De esta forma se podrá evaluar el grado de reproducibilidad.
- Para la obtención del valor de la resistividad en cada dirección y para cada probeta, se sigue el siguiente procedimiento:

¹ Las dimensiones que se indican aquí son aproximadas, ya que después del proceso de corte y pulido suave de la superficie de las probetas, puede haber ligeras variaciones entre ellas. Las medidas reales de cada probeta utilizada se adjuntan en el Anexo A.3. Estas medidas reales son las que se tendrán en cuenta para la obtención de las resistividades.

- i. Se calcula el valor medio de las dos mediciones hechas sobre esa probeta.
- ii. Con este valor medio y las dimensiones reales de cada probeta se calcula la resistividad, según la ecuación siguiente:

$$\rho_v = R \cdot \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{a \cdot e}{l} \tag{4-1}$$

- iii. Con los 5 valores obtenidos, se determina la resistividad media, la incertidumbre del valor obtenido y el porcentaje que representa esta incertidumbre respecto al valor medio obtenido. Dada que la muestra no es suficientemente amplia (≤ 10), la incertidumbre se calcula según [14]:

$$\Delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \tag{4-2}$$

Donde Δ es la incertidumbre de la medida, V_{max} el valor máximo de todas las medidas y V_{min} el valor mínimo de todas las medidas.

- iv. Se utilizan valores de corriente que permitan mantener la estabilidad térmica en el material.
- v. Los montajes utilizados en este apartado para realizar las mediciones, para cada dirección, son los mismos que los utilizados en el apartado anterior.

4.4.2 Resultados de ρ_x

A continuación, se muestran los valores obtenidos para esta dirección del material según el procedimiento descrito. Los valores de las mediciones se pueden consultar en el Anexo A.3.

- **Probeta PG**

Probeta Gruesa	$\rho_x (\Omega m)$	$\rho_{x \text{ media}} (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PG1	0,000273	2,84E-04	4,28E-05
PG2	0,000249		
PG3	0,000263		
PG4	0,000335		
PG5	0,000301		

Tabla 4-16.- Valores de la resistividad en X obtenidos para las probetas de 5 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_x(PG) = 2,84 \cdot 10^{-4} \pm 4,28 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

En el caso de la probeta más gruesa, la incertidumbre representa un 15,1 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PM**

Probeta Media	$\rho_x (\Omega m)$	$\rho_x \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PM1	0,000264	2,08E-04	4,96E-05
PM2	0,000215		
PM3	0,000199		
PM4	0,000197		
PM5	0,000164		

Tabla 4-17.- Valores de la resistividad en X obtenidos para las probetas de 3 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_x(PM) = 2,08 \cdot 10^{-4} \pm 4,96 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

En el caso de la probeta de grueso medio, la incertidumbre representa un 23,9 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PF**

Probeta Fina	$\rho_x (\Omega m)$	$\rho_x \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PF1	0,000102	1,18E-04	3,24E-05
PF2	0,000126		
PF3	0,000099		
PF4	0,000164		
PF5	0,000100		

Tabla 4-18.- Valores de la resistividad en X obtenidos para las probetas de 1,5 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_x(PF) = 1,18 \cdot 10^{-4} \pm 3,24 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

En el caso de la probeta más delgada, la incertidumbre representa un 27,4 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PP**

Para el caso de la probeta de CRFP pultruido, al sólo disponer de dos lecturas sobre la misma probeta, sólo se muestra el valor medio.

$$\rho_x(PP) = 7,71 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

4.4.3 Resultados de ρ_y

En este caso se muestran los valores obtenidos para la dirección Y del material. Los valores de las mediciones se pueden consultar en el Anexo A.3.

- **Probeta PG**

Probeta Gruesa	$\rho_y (\Omega m)$	$\rho_y \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PG1	0,0822	9,12E-02	1,87E-02
PG2	0,0736		
PG3	0,0815		
PG4	0,1078		
PG5	0,1110		

Tabla 4-19.- Valores de la resistividad en Y obtenidos para las probetas de 5 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_y(PG) = 9,12 \cdot 10^{-2} \pm 1,87 \cdot 10^{-2} (\Omega m)$$

En el caso de la probeta más gruesa, la incertidumbre representa un 20,5 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PM**

Probeta Media	$\rho_y (\Omega m)$	$\rho_y \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PM1	0,1051	1,01E-01	1,07E-02
PM2	0,1058		
PM3	0,0902		
PM4	0,0911		
PM5	0,1117		

Tabla 4-20.- Valores de la resistividad en Y obtenidos para las probetas de 3 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_y(PM) = 1,01 \cdot 10^{-1} \pm 1,07 \cdot 10^{-2} (\Omega m)$$

En el caso de la probeta de grueso medio, la incertidumbre representa un 10,6 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PF**

Probeta Fina	$\rho_y (\Omega m)$	$\rho_y \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PF1	0,0696	7,18E-02	2,18E-03
PF2	0,0740		
PF3	0,0721		
PF4	0,0727		
PF5	0,0703		

Tabla 4-21.- Valores de la resistividad en Y obtenidos para las probetas de 1,5 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_y(PF) = 7,18 \cdot 10^{-2} \pm 2,18 \cdot 10^{-3} (\Omega m)$$

En el caso de la probeta más delgada, la incertidumbre representa un 3,0 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PP**

Para la probeta de CFRP pultruido, al igual que para la dirección X, sólo se muestra el valor medio.

$$\rho_y(PP) = 5,10 \cdot 10^{-3} (\Omega m)$$

4.4.4 Resultados de ρ_z

Por último, se muestran los valores obtenidos para la dirección Z. Los valores de las mediciones se pueden consultar en el Anexo A.3.

- **Probeta PG**

Probeta Gruesa	$\rho_z (\Omega m)$	$\rho_z \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PG1	0,863	0,838	0,049
PG2	0,905		
PG3	0,806		
PG4	0,806		
PG5	0,810		

Tabla 4-22.- Valores de la resistividad en Z obtenidos para las probetas de 5 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_z(PG) = 0,838 \pm 0,049 (\Omega m)$$

En el caso de la probeta más gruesa, la incertidumbre representa un 5,9 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PM**

Probeta Media	$\rho_z (\Omega m)$	$\rho_z \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PM1	0,905	0,834	0,061
PM2	0,840		
PM3	0,823		
PM4	0,782		
PM5	0,819		

Tabla 4-23.- Valores de la resistividad en Z obtenidos para las probetas de 3 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_z(PM) = 0,834 \pm 0,061 (\Omega m)$$

En el caso de la probeta de grueso medio, la incertidumbre representa un 7,3 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PF**

Probeta Fina	$\rho_z (\Omega m)$	$\rho_z \text{ media } (\Omega m)$	$\Delta (\Omega m)$
PF1	0,561	0,612	0,055
PF2	0,574		
PF3	0,642		
PF4	0,609		
PF5	0,672		

Tabla 4-24.- Valores de la resistividad en Z obtenidos para las probetas de 3 mm.

Para esta probeta, la resistividad obtenida la podemos expresar como:

$$\rho_z(PF) = 0,612 \pm 0,055 (\Omega m)$$

En el caso de la probeta más delgada, la incertidumbre representa un 9,1 % del valor medio de la resistividad.

- **Probeta PP**

Como en las dos direcciones anteriores, para la probeta de CRFP pultruido, sólo se muestra el valor medio.

$$\rho_z(PP) = 3,63 \cdot 10^{-2} (\Omega m)$$

4.4.5 Comentarios de los resultados

Una vez finalizados los ensayos para la obtención de la resistividad por el método de los 2 puntos, vemos la importancia de los ensayos previos para que los resultados obtenidos sean comparables, ya que la presión de los contactos es en todos los casos igual y se ha trabajado con una corriente que no afecta térmicamente al material.

Sobre los resultados obtenidos se pueden sacar algunas conclusiones interesantes, desde el punto de vista práctico, a la hora de trabajar con este tipo de materiales.

- 1) Los valores obtenidos son algo superiores a los publicados en algunos trabajos de referencia [6], [15], aunque se mueven en un orden de magnitud similar. Esto se asocia principalmente a que, en los ensayos realizados en este trabajo, se incluye la resistencia de contacto por estar medidos por el método de los 2 puntos. Evidentemente para poder comparar estos valores de una forma más precisa con los que aparecen en otras publicaciones, las características de los laminados de CFRP deberían ser similares, así como el proceso de fabricación, la resina, etc.
- 2) Dado que en todos los ensayos el contacto se ha realizado de forma idéntica y la fuerza ejercida similar, en los valores obtenidos se puede ver cómo, desde el punto de vista de la reproducibilidad, la conexión en X es mucho más sensible que en Y o Z. Es decir, las medidas tienen mayor incertidumbre, que en el resto de direcciones. Evidentemente en la dirección

Z es en la que menos incertidumbre hay, al tener mayor superficie de contacto que en el resto de direcciones. Esta incertidumbre se asocia principalmente a los puntos de contacto entre las fibras superficiales de la probeta y el electrodo de prueba, así como con el pulido superficial de las probetas.

- 3) Desde el punto de vista del material y dado que las probetas de prepreg para los ensayos se han obtenido de diferentes zonas del mismo laminado original, se observa una cierta homogeneidad en su comportamiento. La dispersión se asocia más a la dificultad de reproducir las conexiones y, por tanto, refleja lo que puede ocurrir en un proceso industrial real.
- 4) Si analizamos los valores de resistividad en la dirección X, vemos que disminuye con el espesor de la probeta. Si la densidad de fibras es la misma, no debería ser así. Este fenómeno se asocia a que a mayor espesor existe mayor dificultad para tocar todas las fibras y que al ser fabricado con prepreg, un mayor número de capas hace que exista una mayor área de resina respecto de la sección total. En el caso de la probeta de pultruido, si se compara con la PG de prepreg que tiene un espesor similar, la resistividad obtenida es bastante inferior en la de pultruido. Dado que no se dispone de información respecto a la densidad de fibras ni a la resistividad de ellas, es difícil discernir a que se debe esta diferencia. No se asocia a la calidad del contacto ya que el pulido superficial, la presión y el tipo de contacto son iguales en ambos casos.
- 5) Algo similar a la dirección X ocurre en la dirección Y y en la Z, aunque en estas dos direcciones es más acusado. Si recordamos que, en la dirección transversal y perpendicular a las fibras, la conducción de la corriente está ligada a la probabilidad de contactos entre fibras, es lógico que la resistividad de la probeta de pultruido sea mucho menor que en las fabricadas con láminas de prepreg, ya que no existen esas zonas enriquecidas de resina debidas al proceso de fabricación.

4.5 Obtención de la resistividad mediante el método de los 4 puntos

4.5.1 Objetivos de los ensayos

El método de los 4 puntos aplicado sobre una probeta de CFPR puede tener diferentes interpretaciones ya que, al no ser un material homogéneo, elegir dos puntos al azar para medir el potencial no parece óptimo. En el trabajo realizado por Abid et al. [16] se colocaron diferentes electrodos espaciados sobre la superficie de la probeta. En este trabajo se asume que la resistencia equivalente del material entre dos electrodos sería la misma. Estos potenciales no se utilizaron para obtener la resistividad volumétrica del material sino para obtener un modelo del comportamiento superficial del mismo. Otros trabajos, como el Kwok et al. [6], ponen sobre la probeta de carbono un electrodo que cubre todo el ancho de la probeta en la dirección perpendicular respecto a la dirección en la que se desea medir la resistencia. A partir de las lecturas sobre estos electrodos, obtienen la

resistencia de contacto y la resistividad del material. Este tipo de conexión está equipotencializando puntos que no tienen por qué estar al mismo potencial y esto puede afectar al resultado final.

En este trabajo se desean implementar estos dos tipos de mediciones para, según el método de 4 puntos, calcular la resistividad del material y ver si los resultados son comparables. Por todo el estudio previo realizado sobre el carácter anisotrópico y poco homogéneo del CFRP, los métodos utilizados hasta el momento suscitan algunas dudas. Por tanto, se quieren validar y ver su reproducibilidad ya que, en muchos trabajos publicados, el número de muestras o medidas realizadas no son muchas.

Según lo visto en los ensayos por el método de los 2 puntos, la dirección X mostraba mayor sensibilidad a las conexiones a la vez que, al tener una resistividad más baja en la dirección de las fibras, el efecto de la resistencia de contacto será mayor. Por tanto, los ensayos con el método de los 4 puntos se realizarán midiendo la resistividad en esta dirección. En la dirección Y y Z no se realiza este análisis debido a las probetas disponibles.

4.5.2 Metodología de los ensayos

Según lo explicado en el capítulo anterior sobre el método de los 4 puntos, después de los ensayos previos realizados y de las características del material que se está utilizando, los puntos elegidos para la medida sobre la superficie del material pueden ser determinantes. En primer lugar, porque el potencial sobre la probeta se va a repartir de forma más o menos homogénea según la calidad de los contactos entre los electrodos de prueba y el material. Después, dependiendo de la densidad de fibras del material que se vaya a ensayar y de la calidad del pulido superficial, los puntos elegidos pueden no ser lo más representativos.

Es por esto que, en este trabajo, se van realizar diferentes tipos de mediciones, para después poder comparar los resultados obtenidos y extraer conclusiones sobre cuál puede ser el método más adecuado en el estudio de este tipo de materiales. Para facilitar la comparación de los diferentes resultados, todos los ensayos se realizarán con probetas del mismo espesor y en este caso se decide utilizar las probetas más gruesas. Esto también nos permitirá comparar los resultados entre las probetas del prepreg y pultruido.

Dado que se ha trabajado con corrientes controladas y la temperatura de las probetas no ha alcanzado los valores críticos vistos en el apartado 4.3, se considera que siguen estando en su estado original.

En los ensayos que se presentarán a continuación, se realizarán diferentes tipos de mediciones. En primer lugar, se medirán tensiones en diferentes puntos, tanto a lo ancho como lo largo del material. De esta forma se podrá calcular la resistividad del material a partir de diferentes valores. Estos resultados permitirán realizar un análisis detallado del comportamiento del material.

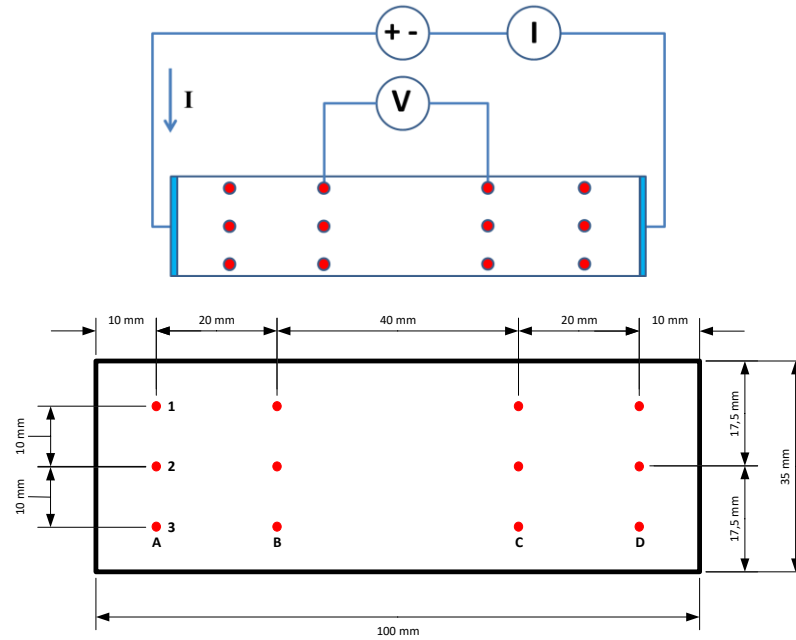


Figura 4-21.- Detalle del montaje para la medida por el método de 4 puntos y dimensiones de la probeta con la localización de los puntos de medida y la nomenclatura a utilizar.

Como las fibras suelen tener unas pocas micras (entre 5 – 7 μm) y están intercaladas con zonas donde hay resina, el punto de contacto para la medida puede afectar al resultado. Es por ello que se realizarán medidas con diferentes puntas de prueba, permitiendo también estudiar la dependencia del punto de contacto y la superficie de contacto.

Con el fin de que los resultados de las mediciones permitan clarificar al máximo la calidad del método, se realizarán mediciones por ambas caras de la probeta para ver si la distribución de potenciales es uniforme y cómo puede afectar al cálculo de la resistividad.

Una vez realizadas las mediciones puntuales, en coordenadas concretas de la probeta se colocarán electrodos a todo el ancho de la probeta, con el fin de equipotencializar esa zona del material. Se desea ver si realmente esta alternativa de medida aporta alguna mejora con respecto al método de potenciales puntuales o si, por el contrario, no refleja el comportamiento real del material.

Para los resultados de la resistividad obtenidos gracias a los diferentes ensayos que se realizarán en este apartado, se utilizará la siguiente nomenclatura a fin de poder comparar después los resultados:

$$\rho_x(PGx_{abcd}) = \text{Valor medio} \pm \text{Incertidumbre } (\Omega\text{m})$$

Donde:

- x : corresponde con el número de la probeta utilizada.
- a : corresponde con el número del ensayo.
- b : corresponde con el número de medición dentro del ensayo.
- c : corresponde con la cara de la probeta donde se han realizado las mediciones.
- d : corresponde con el tipo de punta de prueba utilizado.

4.5.3 Ensayo 1

En este ensayo se realizarán mediciones de potencial entre los puntos indicados en la *Figura 4-21*. Estas mediciones se realizarán con diferentes puntas de prueba para ver si este elemento afecta al resultado final. Se realizan dos mediciones de los potenciales en todos los puntos y entre una medición y otra, se desmonta el sistema y se vuelve a montar. Nuevamente se desea ver la dependencia de los resultados con las conexiones eléctricas entre los electrodos y la probeta.

Las puntas de prueba utilizadas tienen las siguientes características:

- Tipo 1: Puntas de prueba del multímetro (\varnothing 0,77 mm).

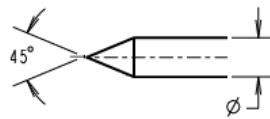


Figura 4-22.- Detalle de las dimensiones de la punta del multímetro.

- Tipo 2: Punta de prueba con resorte (\varnothing 1,6 mm).

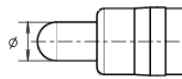


Figura 4-23.- Detalle de las dimensiones de la punta de prueba con resorte.

- Tipo 3: Borne de conexión estándar (\varnothing 4 mm).

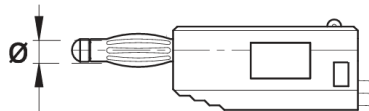


Figura 4-24.- Detalle de las dimensiones del borne de conexión estándar.

Por último, para la obtención de las siguientes tablas de resultados se han tenido en cuenta:

- Las dimensiones reales de la probeta utilizada, que corresponden con las utilizadas en el apartado anterior y después de todos los pulidos realizados.
- En este caso se ha utilizado la probeta PG5.
- Los potenciales medidos en cada tramo son de la misma cara de la probeta.
- Para el cálculo de la resistividad se utilizará la ecuación del método de los 4 puntos vista en el capítulo anterior, pero en este caso, la longitud (l) se sustituye por la distancia del tramo donde se ha medido el potencial.

Para que el análisis de los resultados resulte más claro, los valores obtenidos de las mediciones, así como las resistividades calculadas para cada tramo, se pueden ver en el Anexo A.4. Aquí se muestran los resultados finales de cada ensayo.

4.5.3.1 Resultados del Ensayo 1

El análisis de los valores obtenidos nos permite obtener la resistividad de la probeta para cada una de las condiciones de medida de este ensayo.

- a) Puntas Tipo 1; Cara A; Medida 1.

$$\rho_x(PG5_{11A1}) = 9,04 \cdot 10^{-5} \pm 2,50 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

- b) Puntas Tipo 2; Cara A; Medida 1.

$$\rho_x(PG5_{11A2}) = 9,04 \cdot 10^{-5} \pm 1,96 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

- c) Puntas Tipo 3; Cara A; Medida 1.

$$\rho_x(PG5_{11A3}) = 9,83 \cdot 10^{-5} \pm 2,72 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

- d) Puntas Tipo 1; Cara A; Medida 2.

$$\rho_x(PG5_{12A1}) = 4,87 \cdot 10^{-5} \pm 3,05 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

- e) Puntas Tipo 2; Cara A; Medida 2.

$$\rho_x(PG5_{12A2}) = 9,05 \cdot 10^{-5} \pm 2,92 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

- f) Puntas Tipo 3; Cara A; Medida 2.

$$\rho_x(PG5_{12A3}) = 5,69 \cdot 10^{-5} \pm 2,79 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

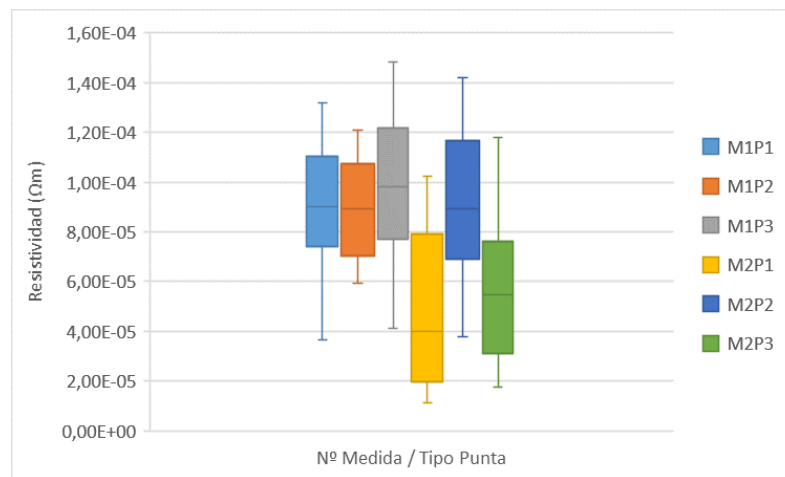


Figura 4-25.- Gráfico de las resistividades obtenidas en función del nº de la medida y del tipo de punta utilizada.

4.5.3.2 Comentarios del Ensayo 1

- 1) En la medida 1, independientemente del tipo de punta de prueba utilizada, los valores medios obtenidos son bastante similares. En la medida 2, los valores medios obtenidos difieren mucho entre sí. La diferencia entre los valores de la medida 1 y la medida 2 podría hacer pensar que la conexión no quedó suficientemente bien y generó una distribución de corriente desigual, pero por el contrario con la punta Tipo 2 los valores obtenidos en ambas

medidas son prácticamente iguales. Esto nos hace pensar que la punta de prueba tipo 2 permite obtener datos más repetitivos y establece un equilibrio entre el número de fibras con las que entra en contacto y la distribución de corriente por ellas.

- 2) Un aspecto que también destaca es la elevada dispersión de valores que se obtienen. Esto se puede ver con los valores de incertidumbre calculados para cada una de las mediciones. En este caso, al tener un número de muestras >10 , la incertidumbre se ha calculado a partir de la desviación estándar. Como se puede observar en todos los resultados, la incertidumbre es del mismo orden de magnitud que el valor medio encontrado, lo que indica la elevada dispersión.
- 3) Nuevamente, viendo los resultados de la medida 1 y de la medida 2, destaca el efecto tan relevante que tiene la conexión eléctrica cuando se analiza el comportamiento del material en la dirección de las fibras. Si bien es este ensayo la resistencia de contacto de los electrodos de prueba no interviene en el cálculo de la resistividad al utilizar el método de los 4 puntos, la conexión determina como se distribuye la corriente por el material y, por tanto, al resultado final. Para los cálculos, se está asumiendo que la corriente inyectada se está distribuyendo uniformemente por todo el material y claramente esto no es así.

4.5.4 Ensayo 2

En este ensayo sólo se utilizará la punta Tipo 2 para medir todos los potenciales, ya que es el tipo de punta que ha dado resultados más homogéneos en el ensayo anterior. En este caso, la diferencia con el Ensayo 1 es que se medirán los potenciales en ambas caras de la probeta.

Además, dada la dispersión de valores obtenidos en la medida 2 del ensayo anterior, se renuevan los electrodos de contacto y se vuelven a implementar las conexiones. Para tener un valor de referencia, se realiza la medida de la resistencia total del sistema siguiendo el procedimiento del apartado 4.3.2.1.

4.5.4.1 Resultados del Ensayo 2

Al igual que en los casos anteriores, se mide el valor de R_T con el Micro-Óhmetro Resistomat 2316.

Siguiendo el mismo proceso descrito anteriormente, el análisis de los valores obtenidos nos permite calcular la resistividad de la probeta para cada una de las situaciones planteadas.

- a) PG5; Puntas Tipo 2; Medida 1.

$$R_T = 54,68 \text{ m}\Omega$$

- i. Cara A.

$$\rho_x(PG5_{21A2}) = 1,39 \cdot 10^{-5} \pm 8,64 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

ii. Cara B.

$$\rho_x(PG5_{21B2}) = 1,41 \cdot 10^{-5} \pm 5,57 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

b) PG5; Puntas Tipo 2; Medida 2.

$$R_T = 53,77 \text{ m}\Omega$$

i. Cara A.

$$\rho_x(PG5_{22A2}) = 1,37 \cdot 10^{-5} \pm 5,02 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

ii. Cara B.

$$\rho_x(PG5_{22B2}) = 1,67 \cdot 10^{-5} \pm 5,96 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

c) PP; Puntas Tipo 2; Medida 1.

$$R_T = 48,62 \text{ m}\Omega$$

i. Cara A.

$$\rho_x(PP_{21A2}) = 2,27 \cdot 10^{-5} \pm 4,42 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

ii. Cara B.

$$\rho_x(PP_{21B2}) = 2,57 \cdot 10^{-5} \pm 2,94 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

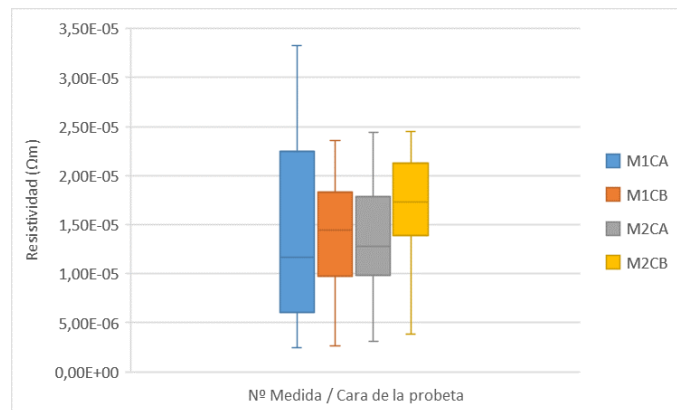


Figura 4-26.- Gráfico de las resistividades obtenidas en función del n° de la medida y de la cara de la probeta. Probeta PG5.

4.5.4.2 Comentarios del Ensayo 2

- 1) Para este ensayo se utilizaron electrodos de contacto completamente nuevos y, como se observa, los valores medios de las resistividades calculadas en todas las pruebas realizadas son claramente inferiores a los del Ensayo 1. En principio, al utilizar el método de los 4 puntos, este cambio no debería afectar ya que el efecto del contacto no interviene en el

cálculo de la resistividad, pero los resultados muestran que sí está afectando de forma significativa. Los valores obtenidos en este ensayo son un 80-85% inferiores a los del ensayo anterior. Este quiere decir que la corriente se está distribuyendo de mejor manera a través de toda la superficie de la probeta.

- 2) Hasta antes de este ensayo, cada vez que se rehacía una conexión se limpiaba la superficie de los electrodos y de la probeta, pero se mantenían los mismos electrodos de contacto. De esta forma se buscaba garantizar la mejor conexión posible entre ambos. Además, si bien no se disponía de un equipamiento específico para analizar la superficie de los electrodos de contacto, aparentemente éstos se encontraban en perfecto estado. El sistema utilizado para realizar las conexiones, buscaba aplicar una fuerza uniforme sobre toda la superficie de contacto y el utilizar goma rígida entre el electrodo de contacto y la estructura de sujeción de la probeta, permitía una mejor adaptabilidad a la superficie de la ésta. Después de los resultados obtenidos aquí, claramente no parece suficiente para garantizar un buen contacto y si se desea mantener una cierta repetitividad sería conveniente cambiar los electrodos de contactos para cada ensayo y medida.
- 3) Los resultados obtenidos en este ensayo muestran claramente la alta dependencia que existe en este tipo de análisis con respecto a las conexiones.
 - Se puede ver como todos los valores medios obtenidos son claramente inferiores a los obtenidos en el Ensayo 1.
 - Existe una alta coincidencia entre los valores medios obtenidos sobre ambas caras de la misma probeta y en las dos medidas realizadas.
 - La dispersión que existe entre estos valores, para cada una de las medidas realizadas, se ha reducido considerablemente con respecto al Ensayo 1. En este caso, la dispersión de los valores calculados es de un orden de magnitud inferior al valor medido obtenido.
- 4) Los resultados obtenidos en este ensayo, aunque muestran una menor dispersión, siguen mostrando diferencias significativas según la zona del material donde se mida. Esto indica que la distribución de la corriente, si bien parece mejor que en el Ensayo 1, no es uniforme por todo el material.
- 5) Después de todos los ensayos realizados hasta el momento en la dirección X, se ve claramente la alta dependencia que existe con la calidad de los contactos eléctricos con la probeta. Es importante destacar que el método de los 4 puntos busca precisamente evitar esta dependencia de los contactos en la medida, pero al ser el CFRP un material no continuo, dependiendo del número de fibras que entran en contacto con el electrodo de prueba y cómo están repartidos estos contactos sobre la superficie de la probeta, hacen que la distribución

de la corriente no sea uniforme por todo el material y eso afecta claramente a los resultados que se obtienen.

- 6) Comparando los resultados de la probeta de prepreg (PG5) y la de pultruido (PP) se aprecia algo destacable. Si bien el valor de la R_T es inferior en la PP, el valor de resistividad obtenido es superior. Si el pulido de la superficie de la probeta, el material del contacto y la presión son la misma, la distribución de corriente en un material y otro se está comportando diferente. Esto probablemente se debe al reparto de la resina sobre las fibras que en ambos casos es diferente por el proceso de fabricación de las mismas.

Adicionalmente a los comentarios realizados sobre este ensayo, el disponer de la resistencia total del sistema y del valor medio de la resistividad, obtenido tras las diferentes medidas realizadas, nos permite estimar el valor de la resistencia de contacto.

Si asumimos que la resistencia total del sistema (R_T) se puede expresar como:

$$R_T = R_M + 2 \cdot R_c \quad (4-3)$$

siendo R_M la resistencia total del material y R_c la resistencia de cada contacto, y que ambos contactos tienen un comportamiento similar, podemos proceder de la siguiente forma:

$$R_M = \rho_x \cdot \frac{a \cdot e}{l} \quad (4-4)$$

Sustituyendo los valores en (4-4) para las probetas analizadas, obtenemos los siguientes valores:

- Probeta PG5

$$R_{M-PG5} = 22,6 \cdot 10^{-9} \Omega$$

- Probeta PP

$$R_{M-PP} = 37,5 \cdot 10^{-9} \Omega$$

Y por último, incorporamos este resultado en (4-3), obtenemos el valor de la resistencia equivalente de cada contacto (R_c):

$$R_c = \frac{R_T - R_M}{2}$$

- Probeta PG5

$$R_{c-PG5} = 27,34 \cdot 10^{-3} \Omega$$

- Probeta PP

$$R_{c-PP} = 24,31 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Viendo estos resultados, queda claro que la resistencia del contacto es muy superior a la del material en la dirección de las fibras (X) y, por tanto, la parte más crítica desde el punto de vista térmico será esta transición. También podemos observar cómo, siendo ambas probetas similares de sección y el contacto con la probeta se ha realizado de igual manera, los valores de resistencia de contacto son similar en ambos casos.

4.5.5 Ensayos 3

Las conclusiones obtenidas de los ensayos previos nos permiten asumir que los resultados obtenidos en el Ensayo 2 serían los de mayor calidad que se podría llegar a obtener por un procedimiento industrial.

Tras el proceso de pulido utilizado hasta el momento para las superficies del material, se desea ver cómo afectaría a los resultados de la resistividad la mejora del contacto entre los electrodos de prueba y la probeta. Para conseguir esta mejora de la conexión, una de las maneras para más utilizadas y comentadas en la bibliografía es mediante la aplicación de pintura de plata en los extremos de la probeta. Esta técnica permitiría asegurar un mejor contacto con las todas las fibras del material.

Si bien esta mejora de la conexión no reflejaría la realidad de los procesos industriales, ya que por cuestiones de coste no es viable, sí nos permitirá estudiar cómo se comporta el material bajo estas nuevas condiciones. Además, si bien esta mejora en la conexión no debería afectar al valor de la resistividad de un material obtenida por el método de los 4 puntos, si se ha observado en el ensayo anterior que, en materiales no homogéneos con los CFRP, sí acaba afectado ya que la calidad del contacto determina como se distribuye la corriente a través del material.

Para evaluar cómo afecta a la obtención de la resistividad del material la aplicación de pintura de plata sobre la superficie de la probeta, se realizará la medida para cada una de las 3 direcciones. En este estudio sólo se preparará una probeta para la medida en cada dirección.

La resistividad volumétrica de la pintura de plata utilizada es de $1 \cdot 10^{-5} \Omega m$. Para mejorar la calidad del contacto, el fabricante de la pintura recomienda que, una vez pintada la superficie de la probeta, se le aplique temperatura [17].

Por tanto, para la dirección X, se van repetir las mediciones por el método de los 2 y 4 puntos, sobre una probeta donde se habrá aplicado pintura de plata en sus extremos. Además, con el fin de poder comparar mejor los resultados que se obtengan, se utilizará la misma probeta PG5 que se utilizó en los ensayos previos y no se moverán las conexiones a lo largo de todos los ensayos. Para validar que la calidad de la conexión se ha mantenido, se medirá la resistencia total del sistema al iniciar los ensayos y al finalizar.



Figura 4-27.- Detalle de la superficie de contacto de la probeta donde se ha aplicado la pintura de plata para la medida de la resistividad en la dirección X.

De la misma manera, se aplicará pintura de plata sobre una probeta para ver el comportamiento en las otras dos direcciones, transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras. Para estos dos casos se utilizará el método de los 2 puntos. De esta forma también se podrá comparar este valor respecto al obtenido en los ensayos previos, pudiendo valorar el efecto de la calidad de la conexión.

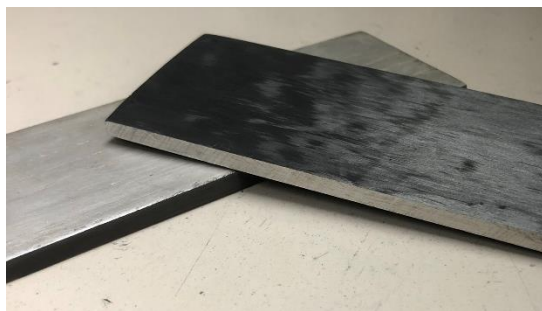


Figura 4-28.- Detalle de la superficie de contacto de las probetas donde se ha aplicado la pintura de plata para la medida de la resistividad en la dirección Y y Z.

4.5.5.1 Ensayo 3 – 1. Aplicación del método de los 2 puntos en la dirección de las fibras (X)

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el apartado 4.44.2.1, el valor de resistencia total medido es el siguiente:

- $R_T = 32,96 \text{ m}\Omega$ (Medido con Micro-Óhmetro Resistomat 2316)

Comentarios:

Este valor de resistencia total nos servirá de referencia para compararlo con las medidas que se vayan realizando durante todo el proceso y al finalizar todos los ensayos. De esta forma se podrá garantizar que la probeta ha mantenido las mismas condiciones, desde el punto de vista de la conexión eléctrica. Además, si se compara este valor con el medido antes de aplicar la pintura de plata, se observa que se ha reducido al menos un 50%. Esto evidencia claramente la mejora de la resistencia de contacto gracias a la aplicación de la pintura de plata, ya que como se pudo ver, es muy superior a la del material.

4.5.5.2 Ensayo 3 – 2. Aplicación del método de los 4 puntos en la dirección de las fibras (X)

En este nuevo ensayo se seguirá el procedimiento descrito en el apartado 4.5 para la obtención de la resistividad por el método de los 4 puntos. Se utilizará la misma probeta del apartado anterior, con contactos con pintura de plata, y sin mover las conexiones con los electrodos de prueba. De esta forma se mantienen las condiciones anteriores.

Para las medidas de los potenciales en los diferentes puntos de la probeta se utilizará la punta Tipo 2, como se ha venido haciendo hasta ahora. Con el objetivo de disponer del máximo de información y que, posteriormente, se pueda realizar una buena comparación, se realizarán medidas de los potenciales por ambas caras de la probeta.

Al igual que en ensayos anteriores y con la finalidad de que el análisis de los resultados sea más claro, los valores obtenidos de estas mediciones se pueden ver en el Anexo A.4. Aquí se muestran los resultados finales de las resistividades a partir de dichas medidas.

a) Puntas Tipo 2; Cara A.

$$\rho_x(PG5_{plata4hA2}) = 5,52 \cdot 10^{-6} \pm 1,98 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

b) Puntas Tipo 2; Cara B.

$$\rho_x(PG5_{plata4hB2}) = 3,07 \cdot 10^{-5} \pm 6,40 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

Comentarios:

El método de los 4 puntos permite obtener la resistividad de un material sin que afecte la resistencia de contacto. De hecho, en el apartado anterior se ha podido observar como la resistencia total que se ha medido ha decrecido de forma significativa. Este descenso en el valor de R_T debería deberse sólo a los contactos, pero como se puede observar también afecta a la resistividad del material. Es destacable la diferencia de valores obtenidos para cada una de las caras del material y con respecto a los valores obtenidos sin pintura de plata.

Para la cara A se observa una importante reducción del valor de la resistividad respecto del Ensayo 2, mientras que en la cara B, el valor obtenido es superior al de dicho ensayo. Esto hace indicar que la corriente no se está distribuyendo de manera uniforme aun habiendo aplicado la pintura de plata.

Resaltar que este ensayo se repitió en 3 ocasiones, pensando que el problema podía ser causado por un mal montaje de la probeta. En los 3 casos se obtuvieron valores similares.

Una de las justificaciones para este fenómeno puede ser que, después de aplicar la pintura de plata sobre las caras de la probeta, se haya facilitado más el contacto con las fibras de una cara que con respecto a la otra, de forma que se ha establecido un camino prioritario para la corriente. Como a la hora de calcular la resistividad se está teniendo en cuenta la sección total de la probeta, si realmente la sección efectiva es menor el resultado se ve alterado.

Así que el aplicar pintura de plata no es garantía de un mejor comportamiento del material. Vuelve a tomar relevancia la calidad del pulido superficial y cómo quedan expuestas las fibras de la probeta antes de realizar la conexión tanto si aplicamos pintura de plata como si no se aplica.

En algunas publicaciones que se han comentado en este capítulo, donde se utilizaba esta técnica para la mejora de la resistencia de contacto, no se hace referencia a esta validación de la distribución homogénea de la corriente. Se da por hecho que al aplicar la pintura de plata se mejora la calidad del contacto. Con los resultados presentados aquí se puede ver que eso no tiene porqué ser así.

4.5.5.3 Ensayo 3 – 3. Aplicación del método de los 4 puntos con electrodos completos en una cara de la probeta

Como se ha podido observar en los ensayos donde se ha realizado la medida de potenciales de manera puntual, la dispersión de los mismos es significativa tanto en una misma cara de la probeta, como si se comparan los valores entre ambas caras.

Existen trabajos recientes, como el de Kwok et al. [6] donde, para obtener la resistividad por el método de los 4 puntos, en lugar de utilizar medidas puntuales utilizan electrodos que van de un extremo al otro de la probeta para una determina coordenada. Además, sólo miden sobre una cara de la probeta.

Con este método de conexión y de medida de potenciales se está asumiendo que, en toda la sección transversal del material en ese punto, el potencial será el mismo. Tal y como hemos visto en los ensayos previos realizados en este trabajo, esto no es así. Evidentemente, al equipotencializar el material en la coordenada donde se va a realizar la medida, se obtendrá un valor promedio del potencial en esa coordenada. A partir de esas mediciones, se podrá calcular la resistividad por el método de los 4 puntos, evitando el efecto de la resistencia de los contactos.

En este ensayo se realizará el montaje que se muestra a continuación, para poder obtener la resistividad del material por el método de los 4 puntos a partir de los potenciales medidos sobre estos electrodos completos y de esta forma poder compararlos con los de medidas puntuales.

Tal y como se ha comentado, para poder comparar los resultados con el Ensayo 3 – 2, las conexiones con la probeta no se han tocado y sólo se han añadido los nuevos electrodos de medida. En el trabajo de G.A. Levin [18] se estudia la influencia del tamaño de los electrodos en la determinación del tensor de resistividades. En base a este trabajo se decidió utilizar como electrodo de medida de potencial un hilo de cobre de 0,75 mm de diámetro que va de lado a lado de la probeta.

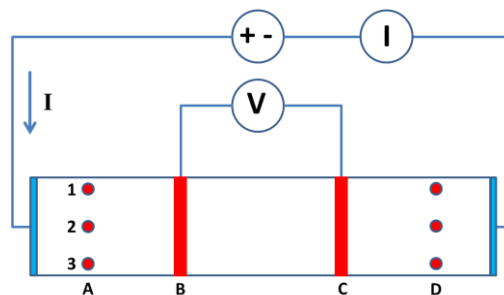


Figura 4-29.- Detalle del sistema de medida utilizando electrodos completos.

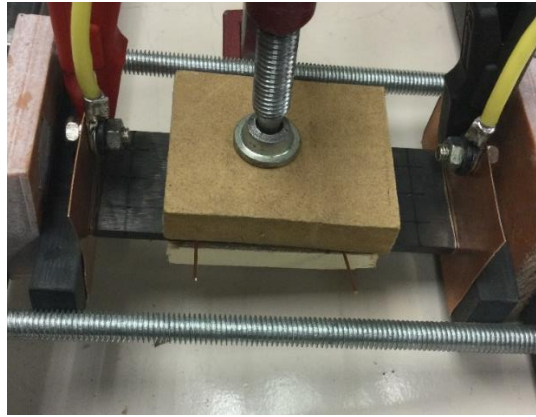


Figura 4-30.- Detalle del sistema de fijación de los nuevos electrodos.

Dado que algunos de los puntos sobre los que se han medido los potenciales de forma puntual siguen quedando accesibles (A_{1-3} y D_{1-3}), también se medirán en esta ocasión para así, poderlos comparar con las medidas del ensayo anterior. Los potenciales para las coordenadas B_{1-3} y C_{1-3} de la cara A serán los mismos al estar equipotencializados. Algunos puntos de la cara opuesta a la que se colocan los nuevos electrodos no son accesibles debido al sistema de fijación. Por eso, en la cara B de la probeta, sólo se podrán medir los potenciales entre los puntos A_{1-3} y D_{1-3} .

Una vez montados los nuevos electrodos, se vuelve a medir la resistencia total. El nuevo valor obtenido es: $R_T = 33,12 \text{ m}\Omega$. Por el valor obtenido, el sistema sigue estando en las mismas condiciones.

a) Cara A

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	1,32E-05	9,62E-06	7,25E-06	9,65E-06	6,27E-06	9,38E-07
2	-7,26E-06	3,94E-06	5,12E-06	9,65E-06	8,83E-06	8,44E-06
3	1,06E-06	6,95E-06	6,38E-06	9,65E-06	7,83E-06	5,24E-06

Tabla 4-25.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones $PG5_{plata4hA2'}$.

En esta ocasión, como se puede ver en la tabla anterior, aparece un valor negativo indicando que entre esos dos puntos la corriente fluye en sentido contrario al aplicado. Para el cálculo de la resistividad de esta probeta, ese valor se ha descartado.

$$\rho_x(PG5_{plata4hA2'}) = 7,07 \cdot 10^{-6} \pm 4,44 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

b) Cara B

PG5	A-D
1	2,77E-05
2	2,61E-05
3	3,74E-05

Tabla 4-26.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones $PG5_{plata4hB2'}$.

Como en esta ocasión el número de medidas que se pueden realizar es pequeño, para el cálculo de la incertidumbre se utilizará la expresión (4-2). Así que, el valor de resistividad que se obtiene para esta cara de la probeta, en estas condiciones es:

$$\rho_x(PG5_{plata4hB2r}) = 3,04 \cdot 10^{-5} \pm 5,65 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

Comentarios:

Como se puede observar de los resultados obtenidos, se sigue manteniendo la diferencia de comportamiento entre ambas caras de la probeta. Estos resultados, junto con el valor medido de R_T , valida que la probeta sigue estando en las mismas condiciones de trabajo y que las diferencias observadas serán debidas al efecto de los electrodos completos.

Además, el valor obtenido para la cara B de la probeta es prácticamente igual al anterior. Dado que en esta cara no se han puesto electrodos completos, el hecho de que se mantenga el valor obtenido, muestra como la elevada resistividad en Z con respecto a la dirección de las fibras (X) hace que no se produzca una la distribución de corriente a través de toda la sección del material. Es como si fuesen dos partes casi aisladas o separadas.

Respecto del valor de resistividad obtenido para la cara A del material se observa un incremento de un 28% con respecto al obtenido con medidas de potencial puntual. También se ha observado la aparición de algún valor negativo indicando que, en esa zona del material, la corriente fluye en sentido contrario. Este comportamiento muestra que, al forzar la unión con el uso de electrodos completos de puntos que no están al mismo potencial, se está modificando el comportamiento natural del material y eso afecta al valor de resistividad obtenido.

4.5.5.4 Ensayo 3 – 4. Aplicación del método de los 4 puntos con electrodos completos en ambas caras de la probeta, pero independientes entre sí

Tal y como se ha podido ver en el Ensayo 3 – 3, el poner un electrodo completo en una de las caras, modifica el comportamiento del material y, por tanto, los valores obtenidos de resistividad. Debido a estos resultados, se decide poner electrodos completos en ambas caras del material. Esta técnica se ha utilizado en varios trabajos [15], [19] y se quiere ver si el resultado final cambia y de qué manera, con respecto a los resultado previos obtenidos. Los electrodos de ambas caras se colocan en las mismas coordenadas aprovechando el mismo sistema de fijación.

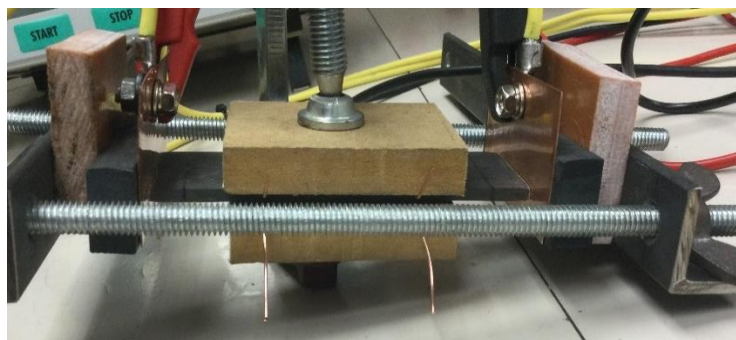


Figura 4-31.- Detalle del sistema de fijación de los electrodos completos de la cara A y B.

En esta ocasión, al tener acceso a todos los puntos de la probeta, ya que hay electrodos completos en ambas caras, se pueden medir todos los potenciales si bien en la coordenada B_{1-3} y C_{1-3} de ambas caras, el potencial será el mismo para todo el ancho de la probeta.

Nuevamente, después de la conexión de los electrodos completos, se vuelve a medir la resistencia total. El nuevo valor obtenido es: $R_T = 32,39 \text{ m}\Omega$. Todo hace indicar que el sistema sigue estando igual.

a) Cara A

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	1,07E-05	1,04E-05	6,94E-06	8,56E-06	5,97E-06	1,55E-06
2	-3,09E-06	4,54E-06	4,75E-06	8,56E-06	7,65E-06	5,53E-06
3	5,00E-07	5,84E-06	6,00E-06	8,56E-06	8,12E-06	5,91E-06

Tabla 4-27.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5_{plata4hA1''}.

Al igual que en el ensayo anterior y además coincidiendo en el mismo tramo, aparece un valor negativo, pero diferente. Entre estos dos puntos la corriente sigue fluyendo en sentido contrario al aplicado. Para el cálculo de la resistividad de esta probeta, ese valor se descarta.

$$\rho_x(PG5_{plata4hA1''}) = 6,47 \cdot 10^{-6} \pm 3,38 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

b) Cara B

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	3,96E-05	3,46E-05	3,12E-05	3,24E-05	3,03E-05	3,14E-05
2	2,38E-05	2,83E-05	2,44E-05	3,24E-05	2,25E-05	8,70E-06
3	2,34E-05	2,90E-05	2,39E-05	3,24E-05	2,44E-05	1,40E-05

Tabla 4-28.- Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5_{plata4hB1''}.

$$\rho_x(PG5_{plata4hB1''}) = 2,72 \cdot 10^{-5} \pm 7,18 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

Comentarios:

En este ensayo, al igual que en los previos, se sigue observando el comportamiento desigual de ambas caras. También se observa que lo que ocurre en una cara no afecta de forma significativa a la otra. Vemos como en este caso, con electrodos completos, la cara A tiene un valor similar al del ensayo 3 – 3. Por otro lado, la cara B ha cambiado su valor respecto al obtenido con medidas de potencial puntuales. Así que queda clara la diferencia, en la obtención de la resistividad, de utilizar electrodos completos o medidas puntuales de potencial.

Otro detalle destacable es que en la cara A, al comparar la resistividad obtenida a partir de los potenciales puntuales respecto de la obtenida con electrodos completos, esta segunda medida daba un valor superior. La cara B ha tenido el comportamiento opuesto. El valor de la resistividad con electrodos completos ha sido inferior al obtenido mediante los potenciales puntuales. Por tanto, no se puede sacar una conclusión clara y depende claramente de cómo se esté distribuyendo la corriente por el material, en definitiva, de la conexión entre el electrodo de inyección de corriente y la probeta.

4.5.5.5 *Ensayo 3 – 5. Aplicación del método de los 4 puntos con electrodos completos en ambas caras de la probeta y unidos entre sí*

Por último, aprovechado el montaje del ensayo 3 – 4, y visto que el potencial medido entre las coordenadas B-C de ambas caras era diferente, se decidió unir estos electrodos. Es decir, se unen los electrodos de ambas caras para las coordenadas B y C respectivamente. De esta forma se fuerza a que, en esas coordenadas concretas, ambas caras tengan el mismo potencial. En estas nuevas condiciones se desea observar cómo se comporta la probeta.

Al igual que en los casos anteriores, después de realizar la conexión entre los electrodos completos, se vuelve a medir la resistencia total. El nuevo valor obtenido es: $R_T = 32,58 \text{ m}\Omega$, de forma que seguimos garantizando las condiciones iniciales de las conexiones.

En este caso, a diferencia de los ensayos anteriores, se muestran aquí los valores de los potenciales medidos y no se calcula la resistividad del material. El motivo, como se puede ver a continuación, es la cantidad de tramos donde aparecen valores negativos, tanto en la cara A como en la cara B de la probeta.

a) Cara A

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	-35,74	5,05	-7,1
A2-B2	-38,36	5,05	-7,6
A3-B3	-30,97	5,05	-6,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	-0,3	5,05	-0,1
A2-C2	-7,4	5,05	-1,5
A3-C3	-1,54	5,05	-0,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	27,12	5,05	5,4
A2-D2	23,87	5,05	4,7
A3-D3	27,38	5,05	5,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	30,10	5,05	6,0
B2-C2	30,10	5,05	6,0
B3-C3	30,10	5,05	6,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	61,03	5,05	12,1
B2-D2	64,45	5,05	12,8
B3-D3	59,76	5,05	11,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	37,02	5,05	7,3
C2-D2	33,52	5,05	6,6
C3-D3	30,34	5,05	6,0

b) Cara B

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	49,57	5,05	9,8
A2-B2	32,81	5,05	6,5
A3-B3	26,29	5,05	5,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	78,54	5,05	15,6
A2-C2	58,41	5,05	11,6
A3-C3	53,48	5,05	10,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	76,94	5,05	15,2
A2-D2	60,51	5,05	12,0
A3-D3	65,94	5,05	13,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	30,1	5,05	6,0
B2-C2	30,1	5,05	6,0
B3-C3	30,1	5,05	6,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	25,27	5,05	5,0
B2-D2	27,95	5,05	5,5
B3-D3	40,2	5,05	8,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	-2,4	5,05	-0,5
C2-D2	-0,03	5,05	0,0
C3-D3	12,65	5,05	2,5

Comentarios:

A través de estos resultados se puede constatar que, el utilizar electrodos completos y además equipotencializarlos entre caras del material, no es una buena solución a no ser que se pueda garantizar una homogénea distribución de la corriente, y esto sólo se puede validar si se realiza una medida puntual de los potenciales sobre las superficies de la probeta.

4.5.5.6 Ensayo 3 – 6. Aplicación del método de los 2 puntos en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras

Por último, siguiendo los mismos procedimientos utilizados en el apartado 4.4 para la obtención de la resistividad por el método de los 2 puntos en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z), se ha medido la RT sobre probetas donde se ha aplicado pintura de plata en los puntos de conexión (ver Figura 4-28). Los valores obtenidos han sido los siguientes:

- Resistencia total medida en dirección transversal (Y), sobre la probeta PG4, utilizando el Micro-Óhmetro Resistomat 2316: $R_T = 8,545 \Omega$
- Resistencia total medida en dirección perpendicular (Z), sobre la probeta PG3, utilizando el Micro-Óhmetro Resistomat 2316: $R_T = 0,568 \Omega$

Comentarios:

Es destacable ver cómo ha cambiado la resistencia total del sistema tras aplicar la pintura de plata. En la dirección X y Z, el valor de la resistencia total se ha reducido de forma muy significativa, en torno a un 40%. En el caso de la dirección X, después de aplicar la pintura de plata, el valor de la R_T ha pasado de un valor de 54,68 mΩ con contactos convencionales a un valor de 32,96 mΩ con contactos donde se ha añadido la pintura de plata. En el caso de la dirección Z, se ha pasado de un

valor de 0,928 Ω a un valor de 0,51 Ω con la aplicación de la pintura de plata. Por el contrario, en el caso de la dirección Y, los valores de resistencia total medidos antes y después de aplicar la pintura de plata son más similares. En el primer caso se midió una resistencia total de 9,048 Ω y después de la aplicación de la pintura de plata el valor obtenido fue de 8.545 Ω .

Esta información puede resultar relevante en este tipo de estudios. Es especialmente destacable la poca variación en la dirección Y. Este aspecto, dada la geometría de las probetas, el pequeño espesor respecto a la longitud y en ancho de la probeta, así como la dirección de las fibras, puede condicionar el proceso utilizado para la medida en esta dirección transversal. Es de igual importancia, la calidad del pulido para que la aplicación de la pintura de plata sea realmente efectiva.

4.6 Evaluación de la resistividad del material en función del tamaño de la probeta

Para finalizar este estudio y ver cuál puede ser la mejor manera de obtener el tensor de resistividades de un material compuesto como el CFRP, se desea analizar si el tamaño de la probeta puede influir en los resultados de las resistividades obtenidas. Al disponer de una mayor longitud, habrá un mayor número de interacciones entre las fibras y se desea analizar si esto puede ayudar a una mejor homogeneización de la corriente por todo el material. Cabe recordar que, en un material compuesto con el CFRP, la resistividad en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z) está determinada por estas interacciones.

Este análisis puede resultar de gran interés ya que las dimensiones reales de una WTB son enormemente superiores a las de las probetas bajo estudio. Así que, cualquier variación en este sentido, podría ser significativo en el modelado del material de una pala completa. Este análisis solamente se realizará en la dirección de las fibras (X) al no disponer del equipamiento necesario para poder realizar las mediciones en la dirección transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras con probetas de mayor tamaño y garantizar una buena conexión.

4.6.1 Objetivos del ensayo

Como lo que se desea observar es si el tamaño de la probeta puede influir en el comportamiento del material, se van a reproducir algunos ensayos realizados previamente con probetas de menor tamaño y que corresponden a la dirección de las fibras (X). Con los resultados obtenidos podremos evaluar dos aspectos importantes. El primero es si esta mayor interacción entre las fibras afecta al valor que se obtiene de la resistividad del material en la dirección de las fibras. Debido a que no se dispone del equipamiento para poder realizar la medida de resistividad en las direcciones transversal (Y) y perpendicular (Z) a las fibras de forma directa, no se podrá analizar la evolución de sus valores con el tamaño de la probeta. De manera indirectamente, al tener una probeta de mayor tamaño y con mayor número de interacciones entre fibras, el análisis de los potenciales superficiales en las probetas sí nos dará información sobre si la corriente tiende a uniformizarse más o no por el material.

4.6.2 Metodología de los ensayos

La metodología a seguir en lo referente a la preparación de la probeta, pulido e implementación de las conexiones es la misma que la presentada en apartados anteriores. El cambio principal es el tamaño de la probeta utilizada. Para esta probeta no se implementan los contactos con pintura de plata, simplemente se realiza un pulido de calidad según lo indicado previamente en esta tesis.

La probeta que se utilizará para este estudio se ha obtenido del mismo material base que las probetas previamente utilizadas y su espesor corresponde con las indicadas como PG, es decir, es un laminado de CFRP fabricado a partir de láminas de prepreg. En principio, al haber sido obtenida del mismo material base, el tensor de resistividades debería ser el mismo. De esta forma, cualquier diferencia observada podrá asociarse al efecto del tamaño de la probeta.

Los puntos de medida se han distribuido de manera equidistante tanto en dirección X como en dirección Y, partiendo desde el punto central de la probeta que corresponde con el punto 9-C y la distancia elegida entre puntos ha sido de 10 mm. Dado que la probeta utilizada para estos ensayos tiene unas dimensiones de 184 mm de largo, 45 mm de ancho y 4,1 mm de espesor, nos permite disponer de 17 coordenadas diferentes en dirección X y 5 en dirección Y.

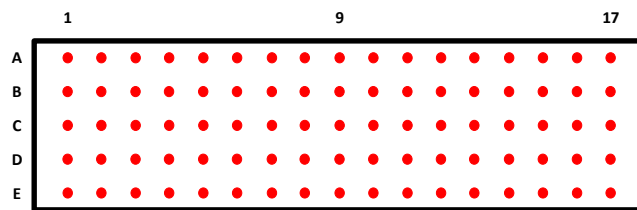


Figura 4-32.- Detalle de la localización de los puntos de medida y la nomenclatura a utilizar.

Otra diferencia introducida en este apartado es que se miden los potenciales de cada punto respecto del electrodo de referencia, el de potencial 0 V. A partir de estos valores se puede calcular fácilmente la diferencia de potencial entre puntos a la distancia deseada y, con éstos, calcular la resistividad equivalente del material. La intensidad inyectada para estos ensayos se ha mantenido constante gracias al control de la fuente de alimentación utilizada y es de 4,98 A.

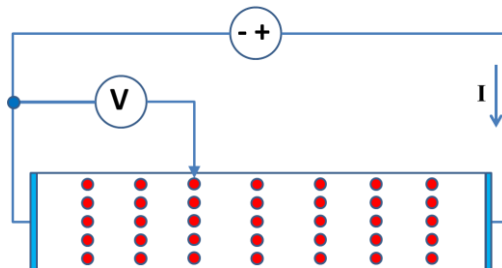


Figura 4-33.- Detalle del sistema de medida utilizando como referencia de potencial el electrodo de potencial 0 V.

4.6.3 Ensayos 4

Para esta probeta se utilizará una nomenclatura que permita diferenciar los resultados aquí obtenidos con los de las probetas más pequeñas. A esta probeta se la llamará *PGG* (Probeta Gruesa Grande), ya que el espesor es el mismo de las *PGx* previas, pero con un tamaño mayor.

Otro aspecto que se mantendrá durante todos los ensayos son los contactos entre los electrodos y la probeta. Se realizará una medida de la resistencia total antes y después de cada ensayo para validar que los contactos se mantienen estables y, por tanto, la misma distribución de corriente a través de la probeta.

Al igual que en ensayos anteriores, los valores obtenidos de estas mediciones se pueden ver en los anexos (Anexo A.5). Aquí se muestran los datos de resumen calculados a partir de dichas medidas.

4.6.3.1 Ensayo 4 – 1. Aplicación del método de los 4 puntos en la dirección de las fibras (X)

Para las medidas de los potenciales en los diferentes puntos de la probeta se seguirán utilizando las puntas Tipo 2. De la misma manera, para poder realizar una mejor comparación, se realizarán medidas de los potenciales por ambas caras de la probeta.

En esta ocasión, los valores de resistividades que se presentan se han calculado con diferentes distancias entre puntos con el fin de observar si este parámetro afecta al resultado final.

- a) Separación entre puntos 10 mm. Puntas Tipo 2. Cara A y Cara B.

El análisis de estos valores nos permite representar la resistividad de esta probeta para este ensayo de la forma:

$$\rho_x(PGG_{4hA10}) = 2,82 \cdot 10^{-5} \pm 1,81 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

$$\rho_x(PGG_{4hB10}) = 2,06 \cdot 10^{-5} \pm 1,19 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

- b) Separación entre puntos 20 mm. Puntas Tipo 2. Cara A y Cara B.

El análisis de estos valores nos permite representar la resistividad de esta probeta para este ensayo de la forma:

$$\rho_x(PGG_{4hA20}) = 2,93 \cdot 10^{-5} \pm 1,30 \cdot 10^{-5} (\Omega m)$$

$$\rho_x(PGG_{4hB20}) = 2,13 \cdot 10^{-5} \pm 9,79 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

- c) Separación entre puntos 40 mm. Puntas Tipo 2. Cara A y Cara B.

El análisis de estos valores nos permite representar la resistividad de esta probeta para este ensayo de la forma:

$$\rho_x(PGG_{4hA40}) = 3,12 \cdot 10^{-5} \pm 9,52 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

$$\rho_x(PGG_{4hB40}) = 2,18 \cdot 10^{-5} \pm 8,81 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

Utilizando Micro-Óhmetro Resistomat 2316 se ha medido la resistencia total del sistema antes y después de realizar todas las medidas. Los valores obtenidos han sido:

- **Antes:** $R_T = 93,92 \text{ m}\Omega$
- **Después:** $R_T = 92,74 \text{ m}\Omega$

En base a estos resultados, podemos considerar que las conexiones se han mantenido estables durante todo el ensayo.

En esta ocasión, con el fin de visualizar de una manera más clara como se distribuye la corriente sobre el material, se ha realizado una representación gráfica del mapa de potenciales sobre la superficie de la probeta. Estas diferentes representaciones se muestran a continuación.

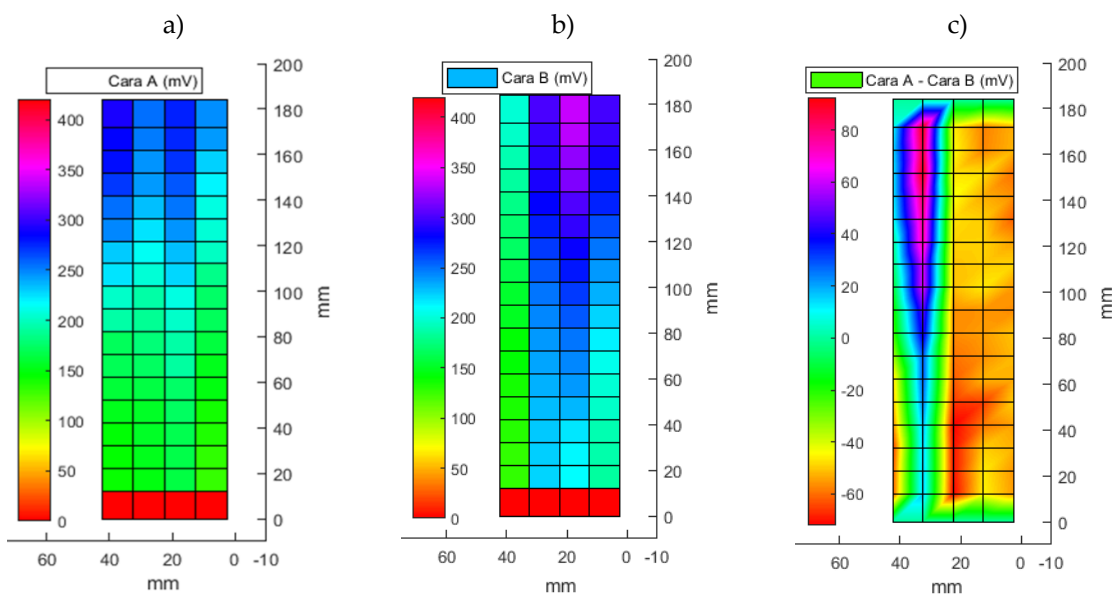


Figura 4-34.- Representación del mapa de potenciales en la probeta de CFRP. a) Potenciales sobre la cara A. b) Potenciales sobre la cara B. c) Diferencia de potencial entre la cara A y B para una misma coordenada.

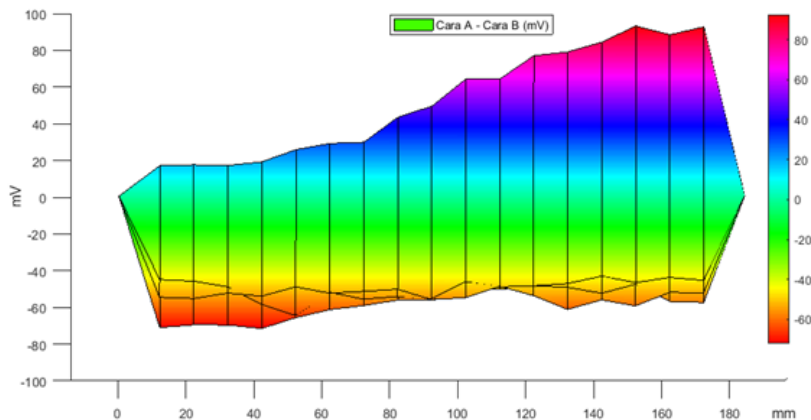


Figura 4-35.- Representación de la evolución de la diferencia de potencial entre las caras de la probeta de CFRP a lo largo de la misma.

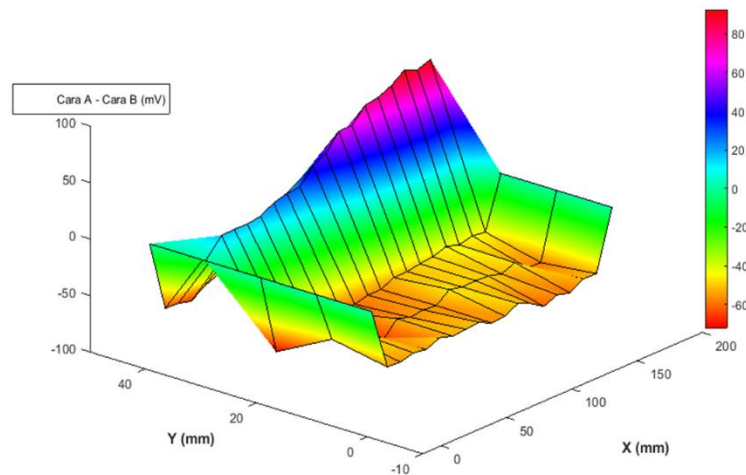


Figura 4-36.- Representación 3D de la evolución de la diferencia de potencial entre las caras de la probeta de CFRP.

Comentarios:

- 1) En primer lugar, destacar que los valores de resistividad obtenidos, si bien son del mismo orden de magnitud, son superiores a los obtenidos en el Ensayo 2 bajo las mismas condiciones, pero con probetas de menor tamaño. Esto hace pensar que, dada la dificultad para realizar las conexiones eléctricas con las probetas, a mayor sección mayor dificultad para que el electrodo toque todas las fibras del material. Evidentemente esto acaba afectando al resultado final.
- 2) También se observa que cuanto mayor es la distancia entre puntos donde se mira la diferencia de potencial mayor es el valor de la resistividad encontrado. Si bien la diferencia no es grande, si se observa esta tendencia. Al revés ocurre con la dispersión de valores, a mayor distancia entre puntos, menor dispersión. Hay que indicar que cuanto mayor es la distancia entre puntos, menos valores se obtienen y menor fiabilidad del resultado final.
- 3) Por lo comentado sobre el incremento en la dificultad de hacer un contacto de calidad a medida que aumenta la sección de la probeta, en los resultados se puede ver la distribución desigual de los potenciales y la diferencia de potencial que eso genera entre ambas caras de la probeta. También se observa que no por tener una probeta de mayor tamaño, eso favorezca la homogeneización de la corriente. La corriente tiende a ir por los caminos prioritarios donde existe menor resistividad.
- 4) Estas diferencias de potencial entre caras pueden llegar a ser peligrosas dependiendo del nivel de corriente que atraviese el material, pudiendo llegar a generar arcos eléctricos que dañarían el material y reducirían su vida útil. Nuevamente, vuelve a resaltarse la importancia de las conexiones eléctricas y la necesidad de que la corriente se distribuya de forma uniforme por toda la sección del material.

4.6.3.2 *Ensayo 4 – 2. Aplicación del método de los 4 puntos con electrodos completos en una cara de la probeta*

En esta ocasión se repite el Ensayo 3 – 3 donde, para una determinada coordenada X, se coloca un electrodo completo que va de lado a lado de la probeta. El electrodo utilizado, al igual que en este ensayo previo, consiste en un hilo de cobre de 0,75 mm de diámetro. También se realizarán las medidas por ambas caras de la probeta para poder comparar los resultados. Para este ensayo se elige una distancia entre puntos de 20 mm.

Vistos los resultados del ensayo anterior (Ensayo 4 – 1) y la dispersión de valores encontrados, es fácil de ver que, al colocar este electrodo completo y forzar un potencial único en esa coordenada, se está modificando el comportamiento natural del material. Por tanto, con los valores finales que se obtengan, se podrá ver que efecto tiene el forzar esta unión equipotencial sobre puntos del material que tienen potenciales diferentes.

a) Separación entre coordenadas de medida 20 mm. Cara A y Cara B.

El análisis de estos valores nos permite representar la resistividad de esta probeta para este ensayo de la forma:

$$\rho_x(PGG_{4hA20CF}) = 1,32 \cdot 10^{-5} \pm 4,64 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

$$\rho_x(PGG_{4hB20CF}) = 1,96 \cdot 10^{-5} \pm 7,81 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

Utilizando Micro-Óhmetro Resistomat 2316 se ha medido la resistencia total del sistema antes y después de realizar todas las medidas. Los valores obtenidos han sido:

- **Antes:** $R_T = 93,23 \text{ m}\Omega$
- **Después:** $R_T = 93,65 \text{ m}\Omega$

En base a estos resultados, podemos seguir considerando que las conexiones se mantienen estables durante todo el ensayo.

Comentarios:

- 1) Si se comparan los resultados obtenidos en el Ensayo 4 – 1 para la distancia entre puntos de medida de 20 mm con los obtenidos en este ensayo se observa que:
 - a. Para la cara A, que es donde se coloca el electrodo completo, la disminución del valor de resistividad. Los datos obtenidos se acercan a los obtenidos en el Ensayo 2 con la probeta más pequeña.
 - b. Para la cara B, dado que se siguen midiendo los potenciales de manera puntual, los valores se mantienen.
- 2) Dado que el electrodo completo se ha ido moviendo en cada medida y colocado sobre la coordenada deseada, al medir el potencial en el electrodo respecto al punto de referencia, el valor es único. Esto hace que la dispersión entre valores disminuya.

4.6.3.3 *Ensayo 4 – 3. Aplicación del método de los 4 puntos con electrodos completos en ambas caras de la probeta*

Este nuevo ensayo repite lo estudiado en el Ensayo 3 – 4 y Ensayo 3 – 5. Es decir, para una determinada coordenada X, se colocan dos electrodos completos que van de lado a lado de la probeta, uno por cada cara. En primer lugar, se miden los potenciales de ambas caras de forma independiente para, a continuación, unirlos y medir el potencial equivalente para esa coordenada. Como electrodos de medida de potencial se utilizan los mismos del apartado anterior, es decir, hilo cobre de 0,75 mm de diámetro.

- a) Potenciales medidos con separación entre coordenadas de medida 20 mm. Potenciales de cada cara medidos de forma independiente.

PGG	4	6	8	10	12	14	VT
Cara A	132,6	149,3	167,6	189,1	208,4	225,2	403,6
Cara B	157,9	168,7	182,1	204,1	219,2	236,5	403,6

El análisis de estos valores nos permite obtener la resistividad de esta probeta bajo estas nuevas condiciones de ensayo:

$$\rho_x(PGG_{4hA20CFS}) = 3,43 \cdot 10^{-5} \pm 3,29 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

$$\rho_x(PGG_{4hB20CFS}) = 2,91 \cdot 10^{-5} \pm 7,02 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

- b) Potenciales medidos con separación entre coordenadas de medida 20 mm. Potenciales medidos con los electrodos de cada cara unidos entre sí.

PGG	4	6	8	10	12	14	VT
AB	157,9	168,7	182,1	204,1	219,2	236,5	391,1

Comentarios:

- 1) El primer dato destacable es ver cómo ha aumentado el valor obtenido de la resistividad, incluso superando los valores obtenidos a partir de los potenciales puntuales. Por tanto, más que el valor en sí de la resistividad, se quiere destacar la influencia de los electrodos completos sobre el comportamiento del material y como esta influencia será tanto mayor cuanto peor sea la distribución de la corriente por la sección del mismo.
- 2) Al unir los electrodos de ambas este efecto se acentúa. Si comparamos los valores (AB), es decir, los valores obtenidos con los electrodos de ambas caras unidos, con el valor medio obtenido de los potenciales de cada cara (AB_p), se observa un comportamiento destacable y que merece la pena analizar.

PGG	4	6	8	10	12	14	VT
AB	157,9	168,7	182,1	204,1	219,2	236,5	391,1
AB_p	145,3	159,0	174,9	196,6	213,8	230,9	403,6

Como podemos observar en la tabla anterior, y sabiendo que la intensidad que circula a través de la probeta se mantiene constante, el potencial total cambia en función de cómo se encuentran los electrodos conectados, es decir, que esta conexión modifica la resistencia total de la probeta. Este comportamiento generó un nuevo ensayo para poder analizar la influencia de los electrodos sobre la probeta.

4.6.3.4 *Ensayo 4 – 4. Aplicación del método de los 4 puntos con electrodos completos de 10 mm de ancho en una cara de la probeta*

En este caso, se repite el ensayo con electrodo completo en la probeta, sólo por una cara y utilizando un electrodo que consiste en una lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor por 10 mm de ancho. Esto hace que el electrodo ocupe el espacio entre dos coordenadas de las marcadas en la probeta. Cuando en la medida se indica el potencial en la coordenada 4, el valor indica en que coordenada acaba el electrodo. Esto quiere decir que el electrodo ocuparía el espacio entre las coordenadas 3 – 4. Este ensayo sólo se realiza por la cara A de la probeta.

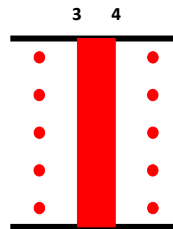


Figura 4-37.- Detalle de la colocación del electrodo de medida correspondiente al potencial del punto 4.

Este ensayo se plantea bajo dos situaciones diferentes:

- Poniendo sólo un electrodo en el punto de medida y se va moviendo de coordenada en coordenada:



Figura 4-38.- Detalle del montaje del electrodo completo de aluminio para una coordenada de la probeta.

El valor de resistividad obtenido es:

$$\rho_x(PGG_{4hA20CG}) = 2,58 \cdot 10^{-5} \pm 4,86 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

- Poniendo todos los electrodos en los puntos de medida de forma simultánea:

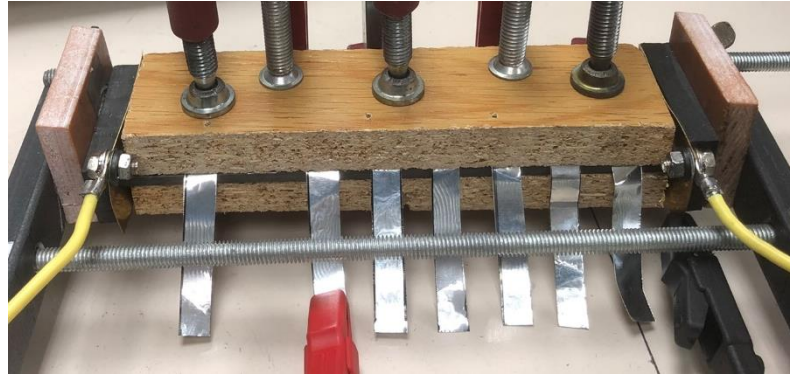


Figura 4-39.- Detalle del montaje con todos los electrodos de medida montados simultáneamente.

El valor de resistividad obtenido es:

$$\rho_x(PGG_{4hA20CGS}) = 2,90 \cdot 10^{-5} \pm 9,08 \cdot 10^{-6} (\Omega m)$$

Comentarios:

Nuevamente este ensayo nos muestra que, aunque no es demasiado elevada, existe una influencia de los electrodos de medida, debido a que están equipotencializando zonas del material que tenían potenciales diferentes.

4.6.3.5 Ensayo 4 – 5. Influencia de los electrodos de medida sobre la resistencia total del sistema

Para finalizar este estudio, se quiso realizar este ensayo que tiene por objetivo ver la influencia de los electrodos de medida sobre el comportamiento del sistema completo, es decir, electrodos y probeta. Este ensayo viene derivado de lo observado en los ensayos anteriores donde, manteniendo la intensidad constante, en función de la configuración de electrodos elegida para la medida, la resistencia total del sistema variaba. Este fenómeno no se había observado de forma tan clara con las probetas más pequeñas debido a que la resistencia total también lo era. En este caso la resistencia total tampoco tiene un valor muy grande pero sí superior.

Por tanto, lo que se va a realizar es medir la resistencia total del sistema con diferentes configuraciones y electrodos. Para ello, se utilizará el Micro-Óhmetro Resistomat 2316, sin mover ni los electrodos de inyección de corriente ni los puntos de medida.

A continuación, se detalla la secuencia de medidas realizadas:

1. Medida inicial sin ningún electrodo de contacto:

$$R_T = 93,87 \text{ m}\Omega$$

2. Medida con un único electrodo completo en el punto central de la probeta, en una de sus caras. El electrodo es un hilo de 0.75 mm de diámetro:

$$R_T = 92,33 \text{ m}\Omega$$

3. Medida con dos electrodos completos en el punto central de la probeta, uno por cada cara, pero independientes. El electrodo es un hilo de 0.75 mm de diámetro:

$$R_T = 91,08 \text{ m}\Omega$$

4. Medida con dos electrodos completos en el punto central de la probeta, uno por cada cara y unidos. El electrodo es un hilo de 0.75 mm de diámetro:

$$R_T = 84,38 \text{ m}\Omega$$

5. Medida con un único electrodo completo en el punto central de la probeta, en una de sus caras. El electrodo es una lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor y 10 mm de ancho:

$$R_T = 91,21 \text{ m}\Omega$$

6. Medida con 8 electrodos completos repartidos cada 20 mm sobre en una de las caras de la probeta. Cada electrodo es una lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor y 10 mm de ancho:

$$R_T = 90,30 \text{ m}\Omega$$

7. Medida final sin ningún electrodo de contacto:

$$R_T = 93,45 \text{ m}\Omega$$

Comentarios:

Analizando los resultados obtenidos se aprecia que el uso de electrodos completos en una sola cara de la probeta no tiene un efecto excesivamente significativo. Sí se notan cambios más importantes cuando se utilizan electrodos completos en ambas caras y sobre todo si éstos están unidos entre sí.

4.7 Discusión final de los resultados obtenidos

Para finalizar este capítulo y como complemento a todos los comentarios que acompañan de forma individual cada uno de los ensayos realizados, se quiere añadir algunas reflexiones y conclusiones finales.

- 1) El conocer la resistividad de un material es necesario si se desea simular su comportamiento mediante FEM o FDTD. Si este material es anisotrópico y no homogéneo con el CFRP UD, y además se quieren modelar estructuras grandes fabricadas con este tipo de material, como el caso de la estructura de una WTB, todavía es más importante conocer esta propiedad con la máxima calidad.

Después de todos los ensayos realizados, los resultados analizados, así como de las referencias consultadas y los datos que se muestran en ellas sobre los valores de resistividad del material, se puede decir que:

- Muestran ordenes de magnitud similares.
 - Que los valores encontrados para un compuesto no son extensibles para cualquier CRFP, ya que dependen del método y forma de fabricación, densidad de fibras, etc.
 - Que los datos obtenidos tienen una incertidumbre que hacen que los resultados que se puedan obtener de las simulaciones aporten información más cualitativa que cuantitativa.
 - Además, si lo que interesa es ver el comportamiento frente a corrientes tipo rayo, donde el efecto térmico sobre el material debido a corriente elevadas puede modificar el valor de la resistividad, tal y como se ha visto en los ensayos aquí presentados, es necesario realizar más estudios prácticos para que los modelos que se implementen puedan incorporar estos fenómenos y ser más representativos de la realidad.
- 2) La evidencia de que, en el estudio de materiales con baja resistividad, las conexiones eléctricas tienen un efecto muy destacable es algo muy estudiado, y todavía sigue habiendo la necesidad de encontrar mejores métodos que permitan estimar la resistencia del contacto. Esto es todavía más importante si cabe en el caso de los CFRP UD, ya que, la calidad de estas conexiones no sólo afecta a la resistencia del contacto sino a como se distribuye la corriente por el conjunto del material, dada la anisotropía del mismo. Por tanto, buscar nuevas maneras de realizar dichas conexiones (la calidad y forma del pulido de la superficie, material con el que realizar la conexión y como hacerla, ...) y así aumentar la reproducibilidad del comportamiento del material se muestra como la tarea más importante a resolver desde el punto de vista industrial.
- 3) Como se ha comentado en el desarrollo de este capítulo, a la hora de calcular la resistividad del material se ha venido utilizando la sección total del material. También se ha comentado que, si la distribución de la corriente no es homogénea, la sección efectiva del material cambia, es menor a la total y, por tanto, afecta a la calidad del resultado de la resistividad. Además, tal y como se comentó en el Capítulo 2, un CFRP se caracteriza por una determinada densidad de fibras, que en definitiva es el elemento conductor del material. Cada fabricante de palas, en función de su diseño, selecciona el material y la configuración adecuada desde el punto de vista estructural. Es por esto que cada fabricante tendrá un material compuesto diferente. La densidad de fibras de una lámina de prepreg o de un bloque de CFRP pultruido lo suministra el fabricante, pero cuando estas láminas o bloques de material se combinan para crear la estructura final de material compuesto, este valor cambia. Es decir, el volumen real que representan las fibras respecto del total de la estructura se ve modificado. Por tanto, también acaba afectando a la resistividad real del material utilizado.

- 4) Los ensayos que aquí se han presentado permiten ver que elementos son más sensibles en el análisis de los materiales compuestos y puede permitir a los fabricantes de estructuras con compuestos de carbono, definir un procedimiento de ensayo para conocer mejor las características del material que utilizan en sus aplicaciones, teniendo en cuenta sus métodos de trabajo. Además, mediante ensayos simples a realizar durante el proceso productivo, poder garantizar una trazabilidad del mismo a lo largo del tiempo. Este elemento se considera fundamental desde el punto de vista industrial ya que, vista la poca homogeneidad de este tipo de material, el poder asegurar unas mismas características a lo largo del tiempo, aseguran una mayor calidad del producto final fabricado.
- 5) Por último, pero no menos importante, cabe destacar la técnica de medida para la obtención de la resistividad de un CFRP. Si bien la medida de potenciales puntuales es mucho más laboriosa, se ha mostrado como la más realista y que menos influye en los resultados obtenidos. Además, permite determinar claramente como es la calidad del contacto con el material compuesto y si la distribución de corriente es más o menos uniforme. Este aspecto se ha demostrado de vital importancia.

4.8 Bibliografía

- [1] J. C. Watson and J. C. Serrano, "Composites materials for wind blades," *Wind Syst. Mag.*, pp. 46–51, 2010.
- [2] B. A. Newcomb, "Processing, structure, and properties of carbon fibers," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 91, pp. 262–282, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.
- [3] S. Beckwith, "Resin infusion technology: Part 3 - A detailed overview of RTM and VIP infusion processing technologies," *Sampe J.*, vol. 43, pp. 66–69, 2007.
- [4] G. Barra *et al.*, "Enhanced electrical properties of carbon fiber reinforced composites obtained by an effective infusion process," *2014 IEEE 9th Nanotechnol. Mater. Devices Conf. NMDC 2014*, pp. 88–91, Dec. 2014, doi: [10.1109/NMDC.2014.6997429](https://doi.org/10.1109/NMDC.2014.6997429).
- [5] Q. Zhao *et al.*, "Review on the Electrical Resistance/Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polymer," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: [10.3390/app9112390](https://doi.org/10.3390/app9112390).
- [6] N. Kwok and H. T. Hahn, "Resistance Heating for Self-healing Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 13, pp. 1635–1654, 2007, doi: [10.1177/0021998306069876](https://doi.org/10.1177/0021998306069876).
- [7] J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto, and N. Hu, "Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method," *NDT E Int.*, vol. 68, pp. 1–12, Dec. 2014, doi: [10.1016/J.NDTEINT.2014.07.001](https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2014.07.001).
- [8] R. J. Hart and O. I. Zhupanska, "The role of electrical anisotropy and effective conducting thickness in understanding and interpreting static resistance measurements in CFRP composite laminates," *J. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 7, pp. 867–882, 2020, doi: [10.1177/0021998319870860](https://doi.org/10.1177/0021998319870860).
- [9] N. A. Rachman, A. Risdiyanto, U. Khayam, and Suwarno, "Analysis of surface roughness and contact pressure at copper connector using nickel and silver plating for EV battery," in *2013 Joint International Conference on Rural Information Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT ICeV-T)*, 2013, pp. 1–6, doi: [10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741527](https://doi.org/10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741527).
- [10] J. C. Abry, S. Bochard, A. Chateauminois, M. Salvia, and G. Giraud, "In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 925–935, May 1999, doi: [10.1016/S0266-3538\(98\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00132-8).
- [11] S. A. Jawad *et al.*, "Electrical properties of laminated epoxy-carbon fiber composite," *Polym. Int.*, vol. 32, no. 1, pp. 23–31, 1993, doi: <https://doi.org/10.1002/pi.4990320106>.
- [12] G. Toray, "Zoltek PX35." <https://zoltek.com/products/px35/> (accessed Apr. 20, 2019).
- [13] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, and B. F. Sørensen, "Materials for Wind Turbine Blades: An Overview," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, 2017, doi: [10.3390/ma10111285](https://doi.org/10.3390/ma10111285).
- [14] C. E. de Metrología, "Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Edición digital. NIPO: 706-10-001-0," 2021. <https://www.cem.es/es/divulgacion/documentos/evaluacion-datos-medicion-guia-expresion-incertidumbre-medida-edicion>.
- [15] A. Todoroki, M. Tanaka, and Y. Shimamura, "Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 5, pp. 619–628, Apr. 2002, doi: [10.1016/S0266-3538\(02\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00019-2).

- [16] R. Abid, A. Haddad, H. Griffiths, D. Clark, and C. Stone, "Electrical characterization of aerospace graded carbon fiber reinforced plastic composites under low current DC and impulse energizations," 2013.
- [17] RS-Pro, "Pintura conductora de plata. Características." <https://es.rs-online.com/web/p/barnices-para-electronica/1863600> (accessed Jan. 20, 2019).
- [18] G. A. Levin, "On the theory of measurement of anisotropic electrical resistivity by flux transformer method," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, no. 2, pp. 714–718, 1997, doi: 10.1063/1.364135.
- [19] L. Shen, J. Li, B. M. Liaw, F. Delale, and J. H. Chung, "Modeling and analysis of the electrical resistance measurement of carbon fiber polymer-matrix composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 11–12, pp. 2513–2520, 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.12.020.

Capítulo 5

5 Estudio de los materiales compuestos de CFRP UD con conexiones superficiales

5.1 Introducción

En el capítulo anterior de esta tesis se dedicó todo el esfuerzo al estudio sobre el comportamiento anisotrópico de los CFRP UD, de las dificultades que tiene el obtener la resistividad del material en cada una de sus direcciones y que aspectos se deben tener en cuenta para obtener estos valores con la máxima calidad. Con todos los ensayos y resultados obtenidos, quedó demostrado lo delicado del proceso. En especial, la importancia que tiene el realizar una buena conexión eléctrica en este tipo de materiales y que implicaciones tiene el no hacerlo correctamente.

Tal y como indica la normativa de protección contra el rayo en aerogeneradores [1], en el proceso de fabricación de una WTB, es recomendable equipotencializar las diferentes partes conductoras que la constituyen. Es por esto que se suele realizar la conexión entre el spar cap de CFRP y el LPS. Los spar caps de la viga de la WTB son la parte estructural donde se suele encontrar los compuestos de CFRP. Su espesor no suele ser uniforme a lo largo de la viga y, por tanto, la forma de conseguir este espesor variable es colocando más o menos laminados de CFRP según la zona de la WTB.

Al mismo tiempo, resulta fácil entender que cuanto menor sea la densidad de corriente a través del material, menos sufrirá térmicamente y menos probabilidad de que se produzca delaminación en el mismo. Por tanto, todo lo que facilite la distribución de la corriente por el compuesto de CFRP ayudará a obtener una mejor solución, desde el punto de vista de la protección contra el rayo.

Es por esto que dónde se hagan estas conexiones, como se hagan y cuantas se lleven a cabo, condicionará el reparto de la corriente y, por tanto, los efectos derivados de ello. A esta situación hay que añadirle lo visto en el capítulo anterior, donde se pudo determinar que el valor de la resistividad del material en la dirección perpendicular a las fibras (Z) era la peor de las 3 existentes en estos materiales, y eso originaba diferencias de potencial significativas entre las caras de un laminado.

Además, si añadimos que, según el punto de la viga, el espesor de material compuesto de CFRP será diferente (habrá más o menos capas de prepreg, más o menos laminados de pultruido) y que tendremos capas intermedias de material aislante para ayudar a unificar toda la estructura, todavía se dificulta más la distribución de corriente.

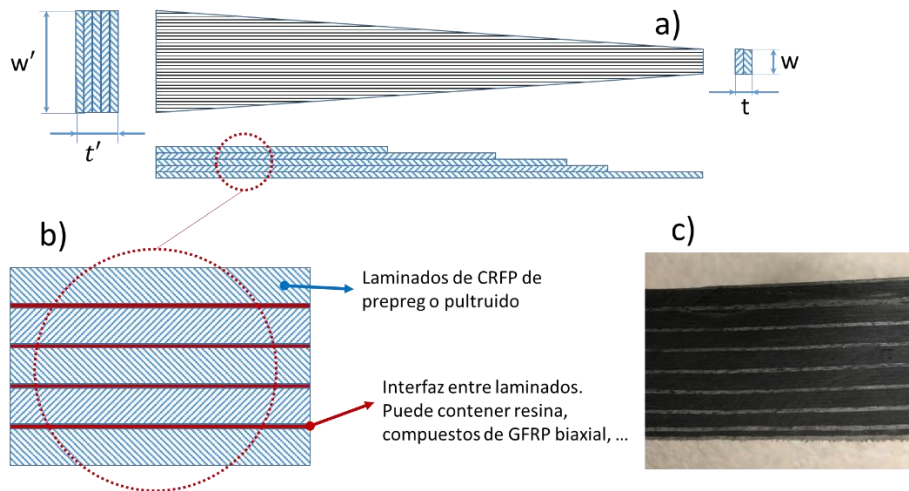


Figura 5-1.- Representación de la estructura de spar cap de CFRP. a) Se representa como varía el ancho y el espesor del spar cap en función de la longitud del mismo. b) Vista ampliada de la sección de la estructura con sus elementos constitutivos. c) Imagen de la sección real de un spar cap.

A través de lo mostrado en la Figura 5-1 queda claro que la transferencia de corriente entre laminados, ya sea fabricados con prepreg o con pultruido, será mínima o nula y depende de la composición de la interfaz entre laminados. Por tanto, la manera de resolver las conexiones entre el spar cap de CFRP y el LPS, y como se realice la conexión con cada uno de los laminados, determinará la distribución de corriente por todos y cada uno de ellos. Esta distribución de corriente será la causante de las diferencias de potencial que pueden aparecer a lo largo de toda la estructura. Si las diferencias de potencial son elevadas, podrían ser causantes de arcos internos en el material compuesto de CFRP y causar daños significativos.

Dado que en el capítulo anterior se ha trabajado de manera intensa la obtención de la resistividad en cada una de las direcciones ortogonales del material y se ha analizado la distribución de la corriente y potenciales sobre los diferentes tipos de laminados, se ha creído oportuno dedicar este capítulo a estudiar el comportamiento de estos materiales compuestos de CFRP cuando la inyección de corriente es superficial. Este planteamiento se debe a que una de las formas de realizar las conexiones sobre una estructura de CFRP como la que tiene una WTB es de forma superficial. Es evidente que existen diferentes formas de hacerlo y que la mejor forma de distribuir la corriente a través del CFRP es en la dirección de las fibras, que es donde la resistividad es menor y el material sufre menos térmicamente. Esto no siempre es posible o viene condicionado por el diseño de cada fabricante.

Por esto, se desea realizar el estudio del comportamiento del compuesto de CFRP cuando los contactos eléctricos y la inyección de corriente se hace de forma superficial. Esta otra visión puede dar lugar a otro tipo de modelado y ayudará a predecir mejor cómo se distribuirá la corriente en el material. También, cómo serán los potenciales sobre las superficies de los laminados bajo estas

condiciones de trabajo. Al mismo tiempo, se podrá realizar una comparación entre el comportamiento de material cuando se inyecta la corriente en la dirección de las fibras y cuando se hace de forma superficial.

5.2 Efectos sobre los compuestos de CFRP UD al inyectar la corriente de forma superficial

A partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior de esta tesis, podemos ver que la resistividad del CFRP UD en la dirección perpendicular a las fibras, es decir, a través del espesor del material (dirección Z), es varios ordenes de magnitud superior a la que tiene el material en la dirección de las fibras (X). Este comportamiento coincide con el visto en los trabajos consultados y además, este valor dependerá del método de fabricación del material compuesto [2]–[5]; no tendrá el mismo valor de resistividad en dirección Z un laminado de carbono fabricado con láminas de prepreg, donde existen un espacio entre estas láminas con mayor presencia de resina, que un laminado de carbono fabricado por pultrusión, donde la distribución de fibras y resina en todo el material será más uniforme. Esta afirmación se certifica a partir de lo que mostró en los ensayos realizados en el Capítulo 4 de esta tesis.

Si el conexionado eléctrico entre el laminado de CFRP y el sistema LPS de la WTB se hace de forma superficial, las variables que acaban determinando el espesor útil por donde se conduce la corriente inyectada son: la resistencia de contacto, la resistividad del material del contacto y la relación entre las resistividades en X y Z del material [4], [6]–[11]. Si el electrodo superficial por donde se inyecta la corriente en el material cubre todo el ancho de éste, la resistividad en la dirección transversal a las fibras (Y) resulta menos determinante. Claramente, el efecto de la frecuencia también debe ser tenido en cuenta dado el carácter transitorio de las corrientes de rayo [12]–[14].

Este punto de vista permite definir la resistividad superficial de un material a partir de su resistividad volumétrica (ρ_v) y del espesor (e') de la capa de material analizada [15].

$$\rho_s = \frac{\rho_v}{e'} \quad (5-1)$$

Pero es precisamente este espesor (e') el que no se conoce en el caso de trabajar con laminados de CFRP UD y es de vital importancia para determinar la densidad de corriente por el material y como se distribuye.

Estos trabajos que hablan del espesor efectivo (e') fundamentan sus estudios en las mismas bases del Método de Montgomery que se comentó en el capítulo 3 y que parten de trabajos [16]–[19] donde se analiza la resistividad de materiales isotrópicos y semiconductores pero donde la geometría de las muestras, especialmente cuando son muy delgadas, pueden afectar al resultado. Posteriormente a estos trabajos, y con la aparición de nuevos materiales interesantes, pero anisotrópicos, se intentan extender estos estudios y encontrar factores de corrección según la geometría de la muestra [3], [13].

Las ventajas de estos métodos es que se realizan medidas superficiales y mediante factores de corrección podemos determinar el tensor de resistividades del material. En estos métodos, la ayuda

de herramientas FEM permite validar los resultados experimentales. Tal y como se comentó con el Método de Montgomery, algunos de estos estudios requieren de unas geometrías específicas. Eso ha dado lugar a no poder profundizar en su estudio. Pero si ha permitido ver la importancia que tiene el conocer el comportamiento del material cuando se inyectan corrientes de forma superficial.

5.3 Ensayos superficiales

Dado que para estos ensayos todos los contactos se van a realizar de forma superficial, cabe recordar que el pulido de estas superficies se ha hecho según lo indicado en el Capítulo 3 y que también ha servido en el Capítulo 4 para la medida de la resistividad en la dirección perpendicular a las fibras (Z).

5.3.1 Ensayo S1

Este primer ensayo tiene por objetivo medir la resistencia total (R_T) de las probetas PGx utilizadas en el capítulo anterior cuando se aplican los contactos de forma superficial. Estas probetas estaban hechas a partir de láminas de prepreg. Los contactos superficiales utilizados cubren la totalidad del ancho de la probeta.

Mediante este ensayo también se desea evaluar el comportamiento respecto a la intensidad con el fin de comprobar si existe linealidad en el mismo.

La probeta utilizada es la PG4 y dispone de las siguientes medidas:

Probeta Gruesa	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)
PG4	0,0943	0,0348	0,0044

Tabla 5-1.- Medidas de la probeta utilizada para el Ensayo S1.

El montaje utilizado para este ensayo es el siguiente:

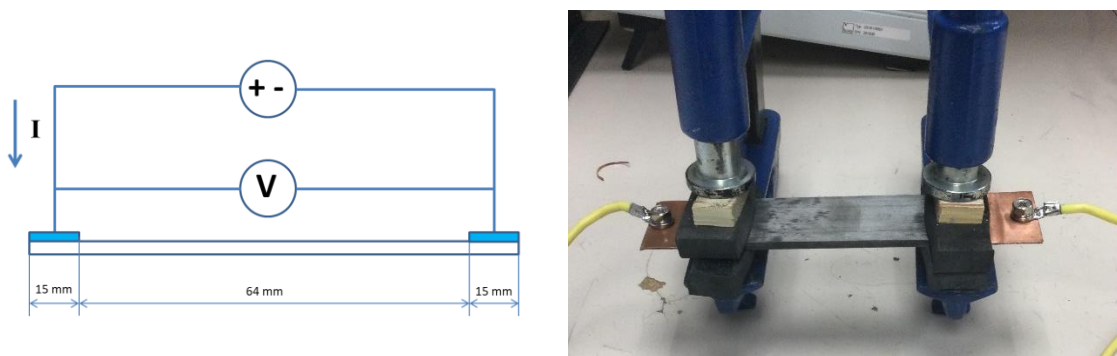


Figura 5-2.- A la izquierda se muestra el esquema del ensayo con contactos superficiales. A la derecha la imagen real del montaje realizado.

5.3.1.1 Resultados del Ensayo S1

En las condiciones mostradas en la Figura 5-2 se realizó la medida de la R_T . Estos valores medidos de R_T incluyen la resistencia del material y la resistencia de los contactos. Los valores obtenidos fueron:

PG4	Micro-Óhmetro	R _r
Medida 1	Resistomat 2316	153,2 mΩ
	Keithley 2100	151 mΩ

Tabla 5-2.- Valores de R_r medidos con diferentes micro-óhmetros para el Ensayo S1.

A continuación, se realizó el ensayo variado la corriente inyectada para observar el comportamiento de la probeta bajo estas nuevas condiciones. La corriente se inyectó con valores decrecientes.

Todos los valores obtenidos en el desarrollo de este ensayo se encuentran en el Anexo A.6. Aquí se muestra la gráfica con la evolución de las mediciones.

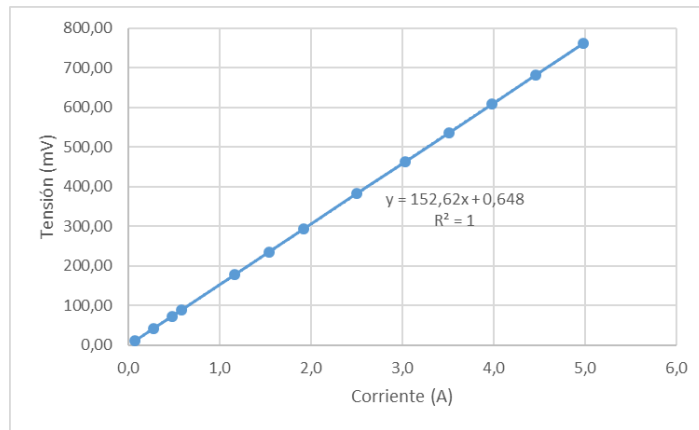


Figura 5-3.- Evolución Tensión-Corriente para el Ensayo S1.

5.3.1.2 Comentarios del Ensayo S1.

Después de los resultados obtenidos podemos concluir que:

- El valor de R_r medido por diferentes procedimientos, cuando los contactos son superficiales, es ligeramente inferior al obtenido para la misma probeta en dirección X. Este valor únicamente sirve como referencia, pero no es comparable al medido anteriormente ya que ha cambiado la resistencia de los contactos, no se conoce la sección efectiva de conducción de la probeta para determinar la resistencia equivalente del material, y la longitud entre contactos también ha variado.
- A nivel térmico, la probeta se ha mantenido estable. Al iniciar el ensayo la superficie de la probeta estaba a 22,2 °C y al finalizar, la superficie había alcanzado una temperatura máxima de 28,1 °C. Este valor máximo se encontraba en los alrededores de los electrodos de inyección de corriente.
- Para los valores de corriente aplicados, se observa un comportamiento lineal del conjunto, es decir tanto del material como de las conexiones.

5.3.2 Ensayo S2

En este siguiente ensayo, se repitió el procedimiento del anterior y tomando la misma probeta (PG4), pero en esta ocasión se aplicaron electrodos superficiales en ambas caras. En estas nuevas condiciones se volvió a medir la resistencia total (R_T) del sistema. Los contactos superficiales de ambos extremos y de ambas caras cubrían la totalidad del ancho de la probeta.

El nuevo montaje para este ensayo es el siguiente:

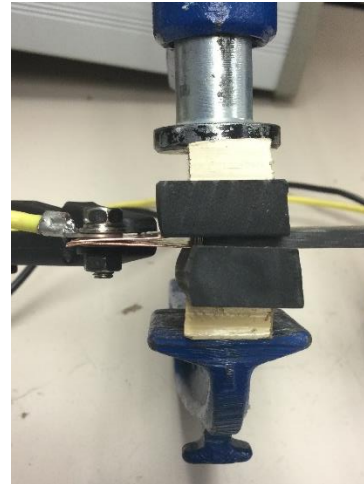
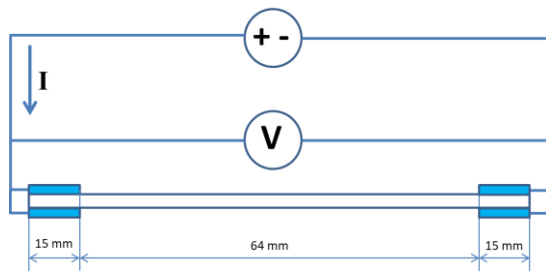


Figura 5-4.- A la izquierda se muestra el esquema del ensayo con contactos superficiales en ambas caras. A la derecha la imagen de la conexión en ambas caras de la probeta.

5.3.2.1 Resultados del Ensayo S2

En las condiciones mostradas en la Figura 5-4 se realizó la medida de la R_T . Estos valores medidos de R_T incluyen la resistencia del material y la resistencia de los contactos por ambas caras. Los valores obtenidos fueron:

PG4	Micro-Óhmetro	R_T
Medida 1	Resistomat 2316	73,8 mΩ
	Keithley 2100	72 mΩ

Tabla 5-3.- Valores de R_T medidos con diferentes micro-óhmetros para el Ensayo S1.

A continuación, se realizó el ensayo variando la corriente inyectada para observar el comportamiento de la probeta bajo estas nuevas condiciones. La corriente se inyectó con valores decrecientes.

Todos los valores obtenidos en el desarrollo de este ensayo se encuentran en el Anexo A.6. Aquí se muestra la gráfica con la evolución de las mediciones.

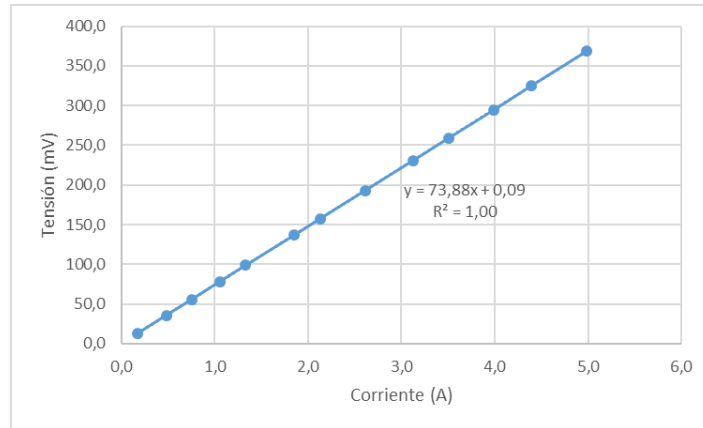


Figura 5-5.- Evolución Tensión-Corriente para el Ensayo S2.

5.3.2.2 Comentarios del Ensayo S2.

Después de los resultados obtenidos podemos concluir que:

- Si comparamos el valor de R_T medido en este ensayo con el del ensayo anterior, observamos que es prácticamente la mitad. Esto nos hace pensar que, como la resistividad en la dirección perpendicular a las fibras (Z) es la más alta, la corriente no penetra en todo el material. Es decir, el espesor (e) de la probeta no es efectivo en su totalidad. Por tanto, la profundidad efectiva (e') es inferior al espesor total (e). Al inyectar corriente por ambas caras, la corriente se reparte como si tuviésemos dos probetas independientes de espesor efectivo (e') y el comportamiento equivalente es como si tuviésemos dos probetas en paralelo con una resistencia total R_T como las del Ensayo S1.

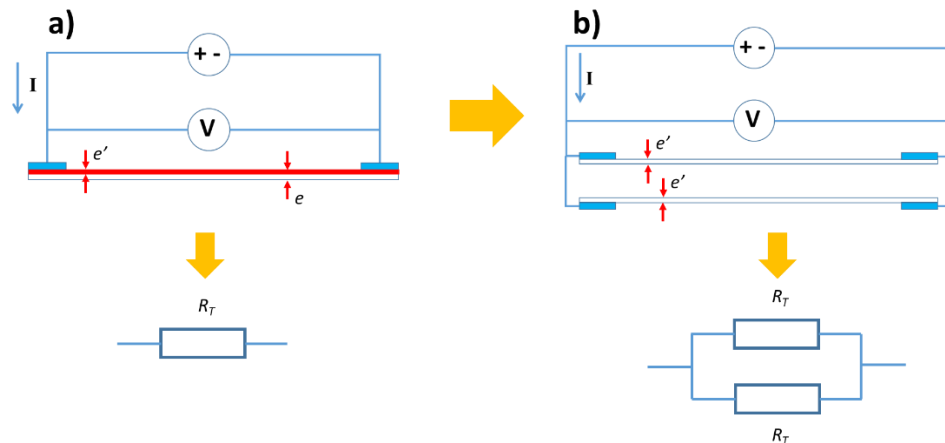


Figura 5-6.- a) Esquema del Ensayo S1 donde se representa el espesor efectivo (e'). b) Representa el comportamiento equivalente del Ensayo S2, con la inyección de corriente por ambas caras de la probeta.

El resultado es como tener las dos caras de la probeta desacopladas eléctricamente y la corriente se reparte por cada una de ellas de forma independiente.

- A nivel térmico, la probeta se ha mantenido igualmente estable. Al iniciar el ensayo se midió la superficie de ambas caras y el valor máximo en la superficie era de 22,6 °C. Al finalizar el ensayo, se repitió la medida de temperatura y el valor máximo encontrado fue de 26,8 °C,

pero era similar en ambas caras. Nuevamente, este valor máximo se encontraba en los alrededores de los electrodos de inyección de corriente.

- Para los valores de corriente aplicados, se observa un comportamiento lineal del conjunto, es decir tanto del material como de las conexiones.

5.3.3 Ensayo S3

En este nuevo ensayo se desea estudiar el comportamiento de una probeta de mayor tamaño que las utilizadas hasta ahora, colocando contactos superficiales y analizando la distribución de potenciales en ambas caras del material. Por tanto, primero se montarán los contactos superficiales en una cara y se mirarán los potenciales en ambas caras, y a continuación, se montarán los contactos superficiales en la otra cara y se repetirán las mediciones por ambas caras del material.

Las dimensiones de la probeta utilizada y la distribución de puntos donde se medirán los potenciales, se muestran en la Figura 5-7. El espesor de esta probeta corresponde al del material identificado en el capítulo anterior como PFX, que está hecho a partir de 3 láminas de prepreg y su espesor, una vez pulido, es de 1,3 mm. Dado que se realizarán más ensayos con probetas de estas mismas dimensiones, pero con otros espesores y materiales, a esta probeta se le dará el nombre de PFG.

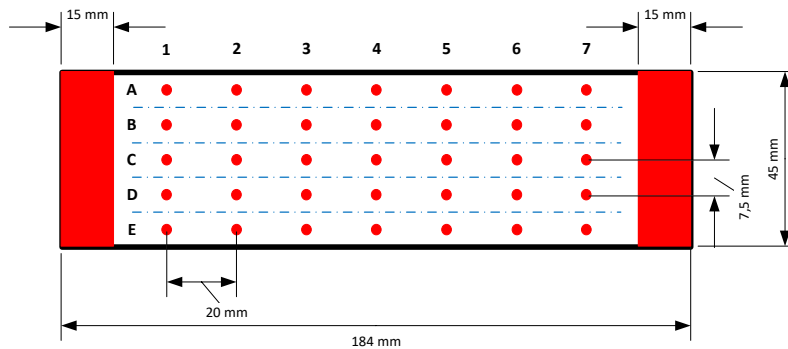


Figura 5-7.- Esquemas de las dimensiones de la probeta y distribución de los puntos de medida.

El esquema de inyección de corriente y de medida de potenciales es similar al utilizado hasta ahora, sólo teniendo en cuenta que la inyección de corriente es superficial.

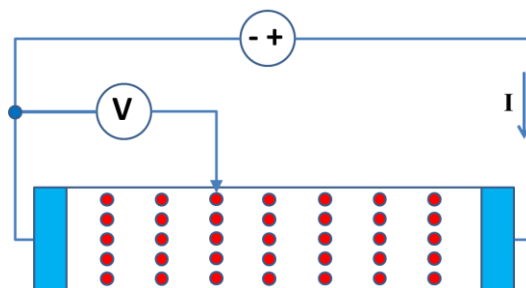


Figura 5-8.- Esquema del sistema de medida utilizado en el Ensayo S3.

5.3.3.1 Resultados del Ensayo S3

En las condiciones mostradas en la Figura 5-8 se realizó la medida de la R_T . En este caso sólo se utilizó el micro-óhmetro Resistomat 2316 y los valores obtenidos se muestra en la siguiente tabla.

PFG	Micro-Óhmetro	R_T
Cara A	Resistomat 2316	223,7 mΩ
Cara B	Resistomat 2316	266,2 mΩ

Tabla 5-4.- Valores de las mediciones de la R_T realizadas en la probeta PFG.

Gracias al control de corriente de la fuente de alimentación utilizada, se pudo mantener la corriente constante durante todas las mediciones. La corriente inyectada en estos ensayos fue de **4,98 A**. Este valor permite mantener estable térmicamente la probeta y obtener unos potenciales adecuados para ser medidos correctamente. Los valores de las mediciones realizadas por ambas caras tanto con los electrodos superficiales montados en la cara A y en la cara B de la probeta, se pueden consultar en el Anexo A.6.

A continuación, se muestran estos resultados de forma gráfica para facilitar su análisis.

- Probeta PFG con los electrodos en la cara A.

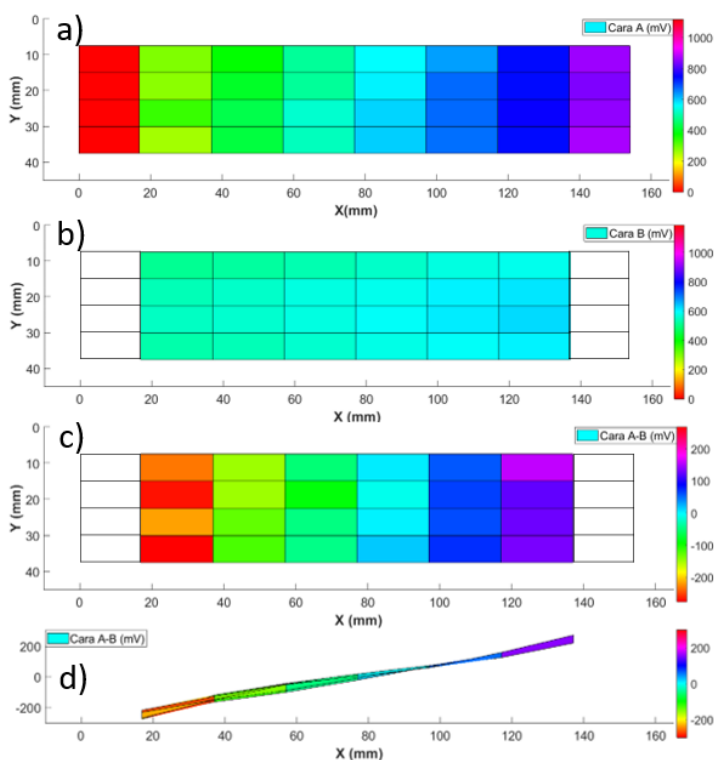


Figura 5-9.- Valores del Ensayo S3 con los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras vistos de perfil, a lo largo de la probeta.

- Probeta PFG con los electrodos en la cara B.

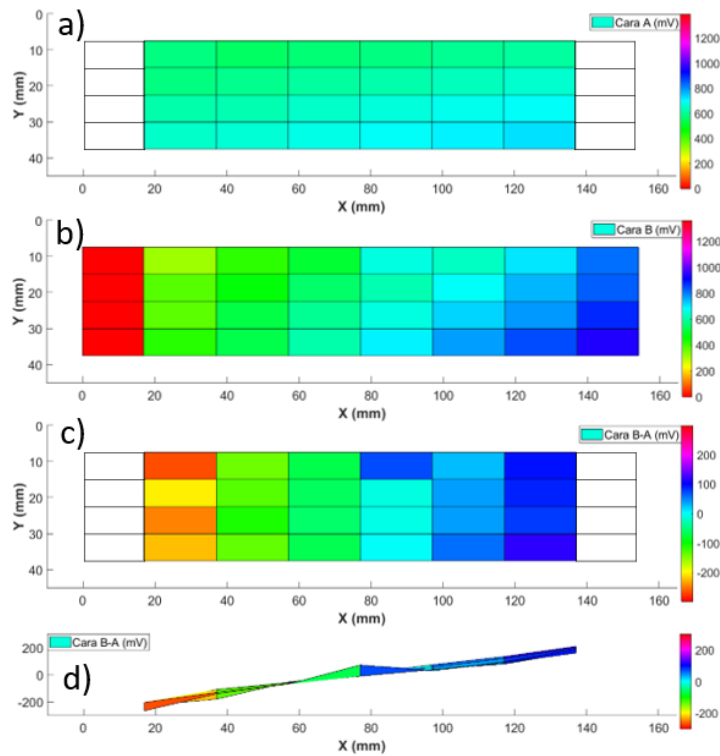


Figura 5-10.- Valores del Ensayo S3 con los electrodos superficiales en la Cara B. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (B). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (A). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (B-A). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

5.3.3.2 Comentarios del Ensayo S3

De este ensayo se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Se observa una mayor uniformidad de los potenciales que cuando se midieron inyectando corriente en la dirección de las fibras (X). La conexión superficial permite acceder a un mayor número de fibras expuestas en la superficie tras el pulido. Entre los potenciales de la cara A y de la cara B se observan algunas diferencias. La primera es un mayor valor de R_T al colocar los contactos en la cara B. Esto hace pensar que la conexión superficial no es tan buena y de ahí también que exista mayor variabilidad en los potenciales medidos para una misma coordenada en X.
- Los potenciales medidos en la cara opuesta a donde se inyecta la corriente se mantienen bastante uniformes, es decir, tienen un valor similar. Esto hace pensar que no están directamente afectados por la corriente inyectada por la cara contraria.
- Este comportamiento se puede asimilar a del estudio de la resistividad de un terreno donde la corriente tiende a fluir por una capa más cercana a la superficie por donde se inyecta la corriente. Dado que la otra cara de la probeta está flotante y ofrece una alta resistividad, la corriente fluye del electrodo positivo (+I) al electrodo negativo (-I) por la parte más

superficial del material. Esto origina una distribución de potenciales simétricos, pero invertidos, alrededor de cada electrodo.

La superficie de la cara donde no hay electrodos está toda ella a un mismo potencial por ser conductora. En el punto medio aproximadamente, la diferencia de potencial entre ambas caras es prácticamente nula y en los extremos tenemos una diferencia de potencial similar, pero de polaridad opuesta en cada extremo [4]. Este efecto está influenciado por el espesor del material, la resistividad en la dirección perpendicular (Z) y por la separación entre los electrodos.

- En ambos casos, los valores de diferencia de potencial en los extremos se mantienen muy similares, sólo afectados por la mayor irregularidad en la inyección de corriente por la cara B que por la cara A.

5.3.4 Ensayo S4

En el ensayo anterior se ha validado el comportamiento simétrico de la probeta al inyectar la corriente por cada una de las caras mediante contactos superficiales. Las diferencias observadas se asocian más a la calidad del contacto superficial tal y como se justificó. Por tanto, ahora se desea observar el comportamiento del material en las mismas condiciones, pero variando el espesor de las probetas y con distinto tipo de material, es decir, con CFRP fabricado con prepreg y por pultrusión.

Las probetas para este ensayo tienen las mismas dimensiones de la probeta anterior (184 mm de largo – X, y 45 mm de ancho – Y), la distribución de los puntos para la medida de potenciales es también igual, así como el tamaño de los electrodos (ver Figura 5-7). La diferencia radica en el espesor y en el tipo de material. Se desea observar como varía el comportamiento en función de estos dos últimos parámetros.

Nombre probeta	Tipo	Nº de capas	Espesor total pulido
PFG	Prepreg	3	1,3 mm
PMG	Prepreg	5	2,4 mm
PGG	Prepreg	8	4,4 mm
PPG	Pultruido	-	3,7 mm

Tabla 5-5.- Detalle del tipo y espesor del material utilizado para este ensayo.

Dada la simetría observada en el Ensayo 3, en esta ocasión sólo se inyectará corriente por una de las dos caras de la probeta y el valor de la corriente inyectada será el mismo que en ensayos anteriores, es decir, **4,98 A**. El esquema de medida utilizado es el que se muestra en la Figura 5-8.

5.3.4.1 Resultados del Ensayo S4

En primer lugar, se muestra una tabla con los valores de la R_T medida para cada una de las muestras.

Nombre probeta	Micro-Óhmetro	R_T
PFG	Resistomat 2316	223,7 mΩ / 266,2 mΩ
PMG	Resistomat 2316	238,9 mΩ
PGG	Resistomat 2316	303,2 mΩ
PPG	Resistomat 2316	78,9 mΩ

Tabla 5-6.- Valores de la R_T medida para cada una de las probetas utilizadas.

Al igual que en el caso anterior, se muestran los resultados de las tres probetas restantes de forma gráfica. Todos los valores medidos se encuentran en el Anexo A.6.

- **Probeta PMG**

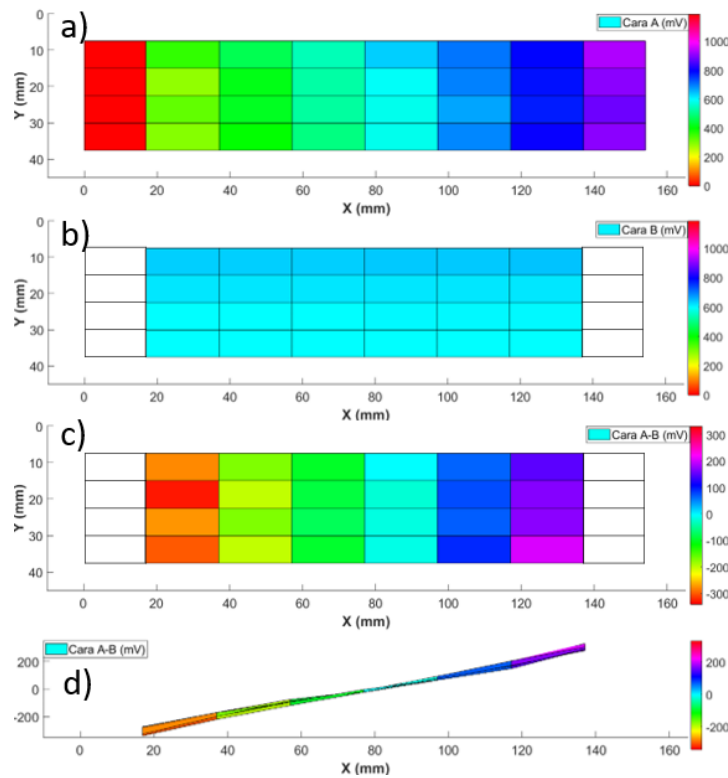


Figura 5-11.- Valores del Ensayo S4 con la probeta PMG y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

- **Probeta PGG**

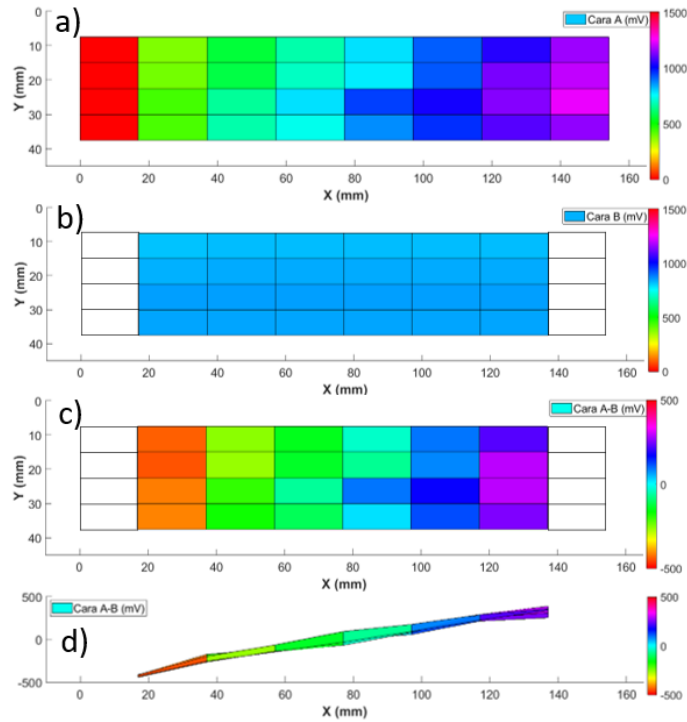


Figura 5-12.- Valores del Ensayo S4 con la probeta PGG y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

- **Probeta PPG**

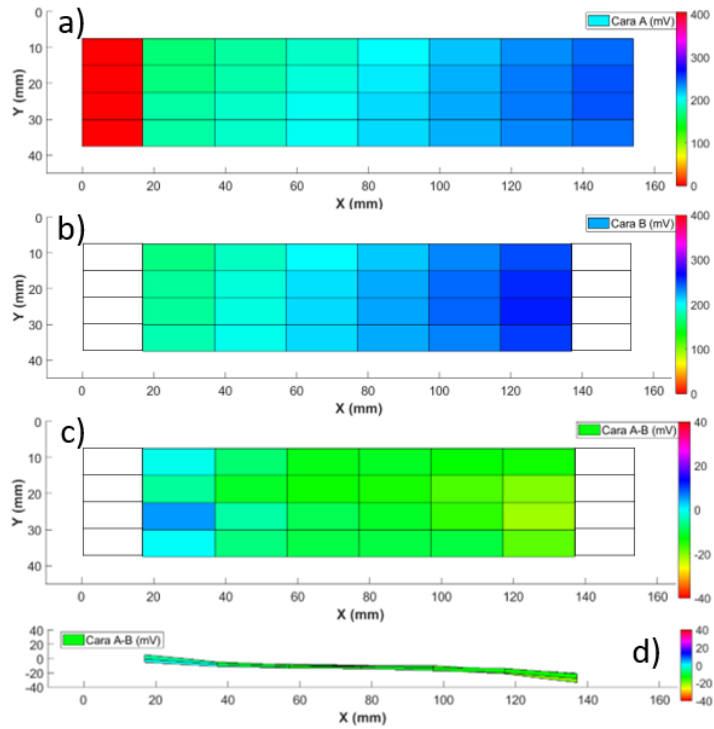


Figura 5-13.- Valores del Ensayo S4 con la probeta PGG y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

5.3.4.2 *Comentarios del Ensayo S4*

De estos ensayos se observan algunos aspectos interesantes:

- Si miramos sólo las probetas de prepreg (PFG, PMG y PGG), vemos que la R_T aumenta con el espesor. Si tomamos como referencia los valores obtenidos en el Capítulo 3 sobre la resistividad del material en la dirección perpendicular a las fibras (Z), esta aumentaba con el espesor del material. Por tanto, al penetrar menos la corriente, el espesor efectivo disminuye y aumenta la resistencia del conjunto. Aquí estamos asumiendo que la resistencia de contacto de los electrodos es prácticamente igual, ya que tanto el proceso de pulido como la presión aplicada es la misma en todos los casos.
- Para la misma corriente inyectada (4,98 A), si tenemos un mayor valor de R_T , los potenciales superficiales en la cara de los electrodos aumentan con el espesor y al final, esto genera que la diferencia de potencial entre ambas caras aumenta con el espesor. También es cierto que a medida que aumenta el espesor del material, el potencial de la cara opuesta a la inyección de corriente tiene un potencial más uniforme en toda la superficie, evidenciando que la corriente penetra menos en el material. En el caso de la probeta PGG se puede considerar que está aislada una cara de la otra, para la probeta PMG la influencia es muy leve, pero existe, y en la probeta PFG la influencia es mayor.
- Si bien la diferencia de potencial entre caras aumenta con el espesor, el comportamiento en las 3 probetas es similar, es decir, tal y como se justificó en el Ensayo S3. Vemos que en el punto central de la probeta el potencial es prácticamente nulo y en los extremos tenemos potenciales similares pero invertidos de signo, en un lado respecto del otro.
- En todas ellas se siguen observando mayor uniformidad en los potenciales que cuando se inyectaba corriente en la dirección de las fibras (X).
- Por último, destacar el comportamiento totalmente diferente que se observa en la probeta de material de CFRP pultruido (PPG). Ya se había observado en el capítulo anterior que la resistividad en la dirección de las fibras (X) entre las probetas de espesor (PG) y las de pultruido (PP) era similar. En el caso de la dirección perpendicular a las fibras (Z), esto no era así y había una diferencia muy significativa en ambos tipos de material. Pues bien, esta diferencia de resistividad en la dirección Z da lugar a que prácticamente no exista diferencia de potencial entre ambas caras, comparadas con las probetas de prepreg. Este comportamiento, claramente beneficia a la protección del material ya que se distribuye mejor la corriente por todo el compuesto. Es por ello que en los últimos años han aparecido muchos trabajos donde se estudia la resistividad de materiales compuestos de CFRP donde se añaden aditivos conductores a la resina para mejorar dicha resistividad en Z [20].

- Para la probeta de material pultruido, queda clara la influencia de una cara sobre la otra dada esta menor resistividad en Z y, por tanto, la diferencia de potencial vendrá condicionada por la densidad de fibras del laminado de material pultruido.
- En el caso del material con láminas de prepreg, el comportamiento es como si fueran dos capas de material aisladas, y este efecto se intensifica a medida que se incrementan el número de láminas. Falta ver como se ve afectado por la separación entre electrodos.

5.3.5 Ensayo S5

Después del análisis del ensayo anterior, una de las variables que puede afectar al comportamiento del material, en concreto al espesor efectivo, es la separación entre electrodos. Con la idea de evaluar esto, se repiten los ensayos anteriores, pero con probetas más grandes. En este caso sólo se puede evaluar este comportamiento con probetas de material de prepreg, ya que no se dispone de material pultruido con las nuevas dimensiones.

Para este ensayo, también se repetirá la inyección de corriente por ambas caras de manera simultánea y así analizar también si el tamaño de las mismas afecta al comportamiento observado en el Ensayo S2. La corriente aplicada sigue siendo la misma (4,98 A) que en los casos anteriores. Tal y como se mencionó, este valor de corriente permite mantener un equilibrio térmico en el material y una amplitud suficiente para la medida de potenciales.

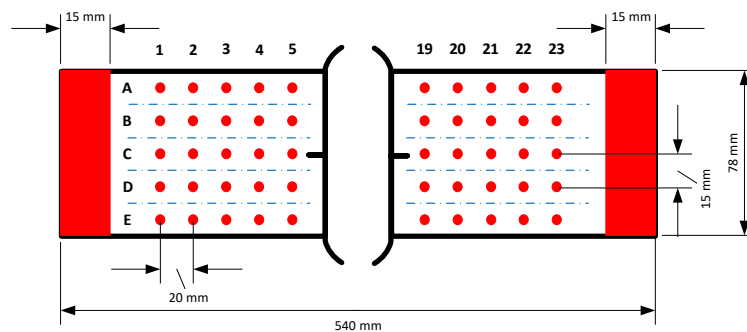


Figura 5-14.- Dimensiones de las probetas del Ensayo S5 con el detalle de los puntos de medida de potenciales.

La distribución de los puntos se ha realizado partiendo del punto central de la probeta hacia los extremos con separación de 20 mm en X y 15 mm en Y. Entre los electrodos de inyección de corriente y lo primeros puntos de medida se deja una separación de 35 mm para facilitar la medición de los potenciales. En total se han tomado potenciales en 115 puntos por cada cara (23 en X y 5 en Y).

Aunque los espesores son los mismos que en los ensayos anteriores, al cambiar el tamaño se utiliza una nueva nomenclatura.

Nombre probeta	Tipo	Nº de capas	Espesor total pulido
PFE	Prepreg	3	1,3 mm
PME	Prepreg	5	2,4 mm
PGE	Prepreg	8	4,4 mm

Tabla 5-7.- Detalle del tipo y espesor del material utilizado para este ensayo.

El esquema de medida utilizado es el mismo de la Figura 5-8, donde el potencial de referencia es el más cercano a los puntos de la coordenada 1 en dirección X.

5.3.5.1 Resultados del Ensayo S5

Como siempre, se muestra una tabla con los valores de la R_T medida para cada una de las muestras.

Nombre probeta	Micro-Óhmetro	R_T
PFE_1c	Resistomat 2316	216,2 mΩ
PME_1c	Resistomat 2316	233,7 mΩ
PGE_1c	Resistomat 2316	243,7 mΩ

Tabla 5-8.- Valores de la R_T medida para cada una de las probetas utilizadas con los electrodos sólo en una cara.

Nombre probeta	Micro-Óhmetro	R_T
PFE_2c	Resistomat 2316	148,1 mΩ
PME_2c	Resistomat 2316	118,2 mΩ
PGE_2c	Resistomat 2316	113,1 mΩ

Tabla 5-9.- Valores de la R_T medida para cada una de las probetas utilizadas con los electrodos en ambas caras.

Y a continuación se mostrarán las medidas de los potenciales superficiales representados de forma gráfica. Todos los valores de las mediciones realizadas se encuentran en el Anexo A.6.

- **Probeta PFE con electrodos en una cara**

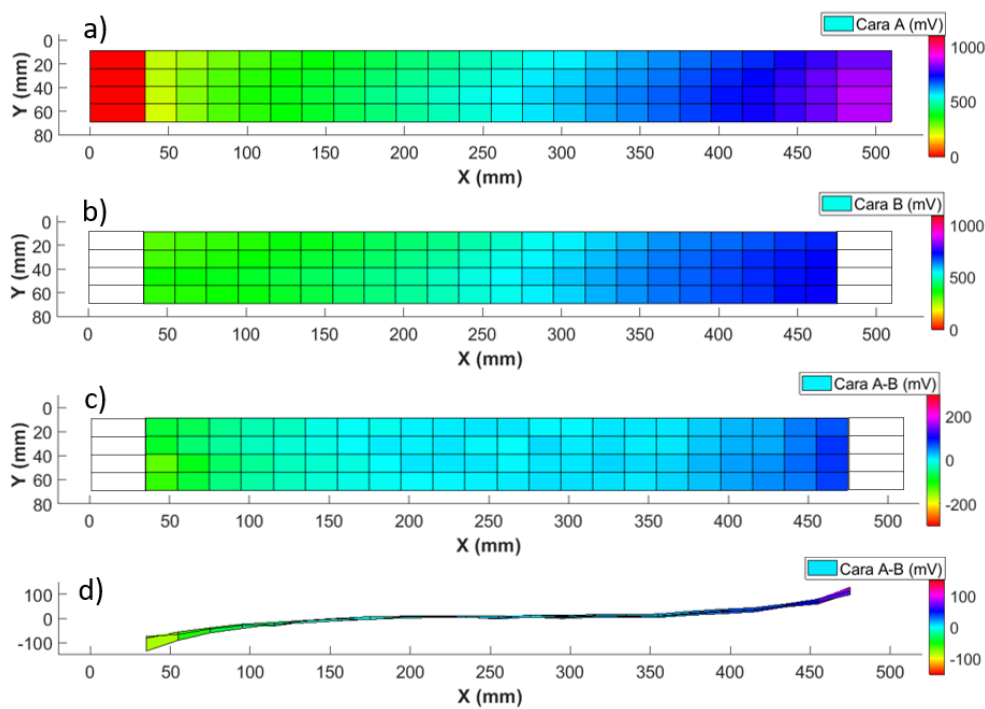


Figura 5-15.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PFE y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

• **Probeta PME con electrodos en una cara**

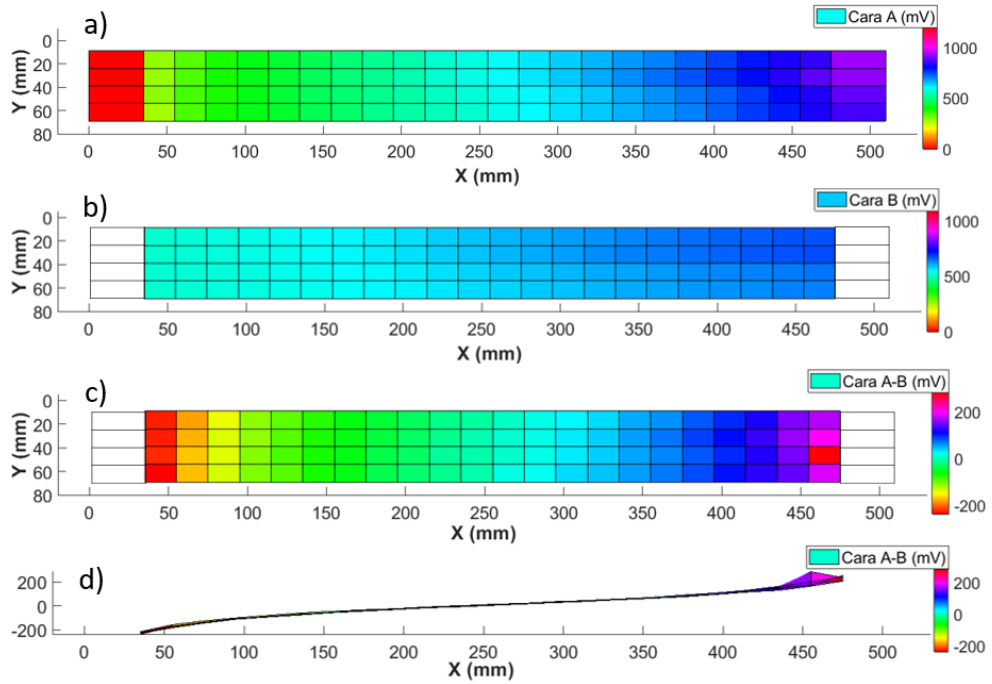


Figura 5-16.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PME y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

• **Probeta PGE con electrodos en una cara**

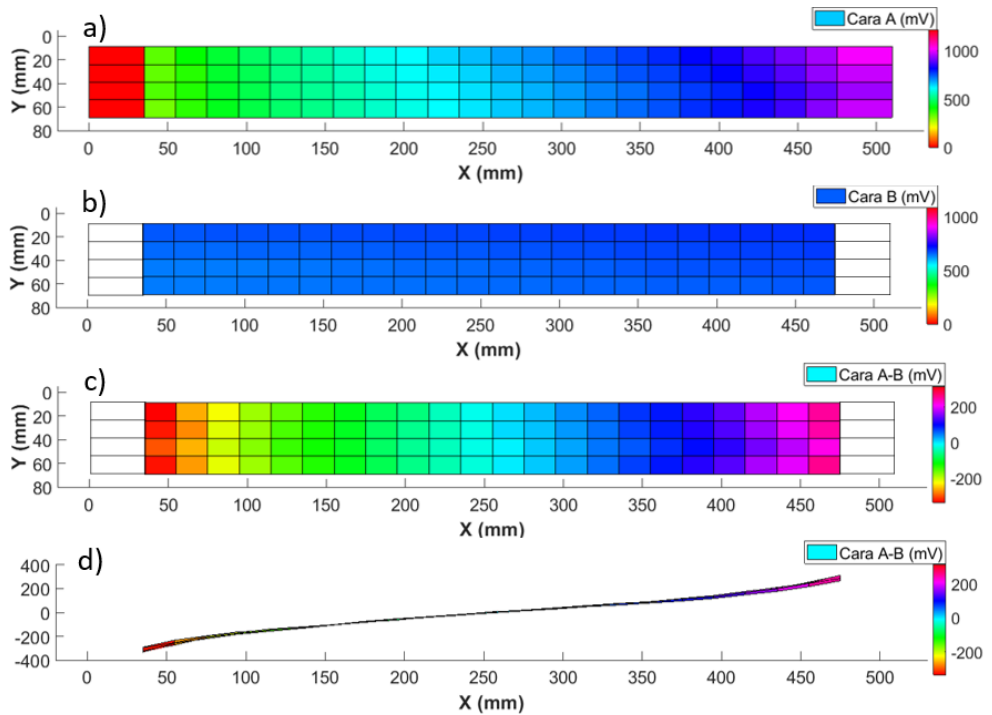


Figura 5-17.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PGE y los electrodos superficiales en la Cara A. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara de los electrodos (A). b) Potenciales medidos en la cara contraria de los electrodos (B). c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

Después de estos ensayos se observaba que, por la cara donde se inyectaba la corriente de manera superficial, la distribución de potenciales se mantenía bastante uniforme tanto en la dirección de las fibras (X) como transversal a ellas (Y). Por esto, para los ensayos de inyección de corriente por ambas caras se decidió medir en menos puntos.

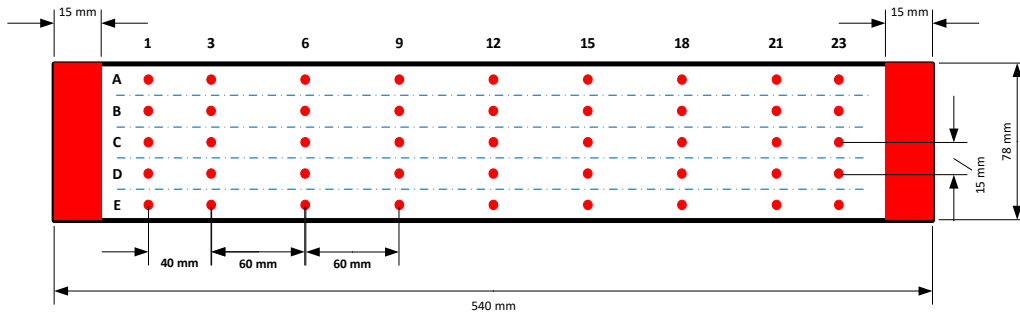


Figura 5-18.- Esquema de la distribución de los puntos de medida de potencial al inyectar la corriente por ambas caras de la probeta.

Como se puede observar en la Figura 5-18, los electrodos de inyección de corriente y los primeros puntos de medida se dejan a la misma separación de 35 mm para facilitar la medida de los potenciales. Los siguientes puntos se encuentran a 40 mm y el resto se toman a 60 mm. De esta forma se mantiene la simetría por ambos extremos de la probeta.

- **Probeta PFE con electrodos en ambas caras**

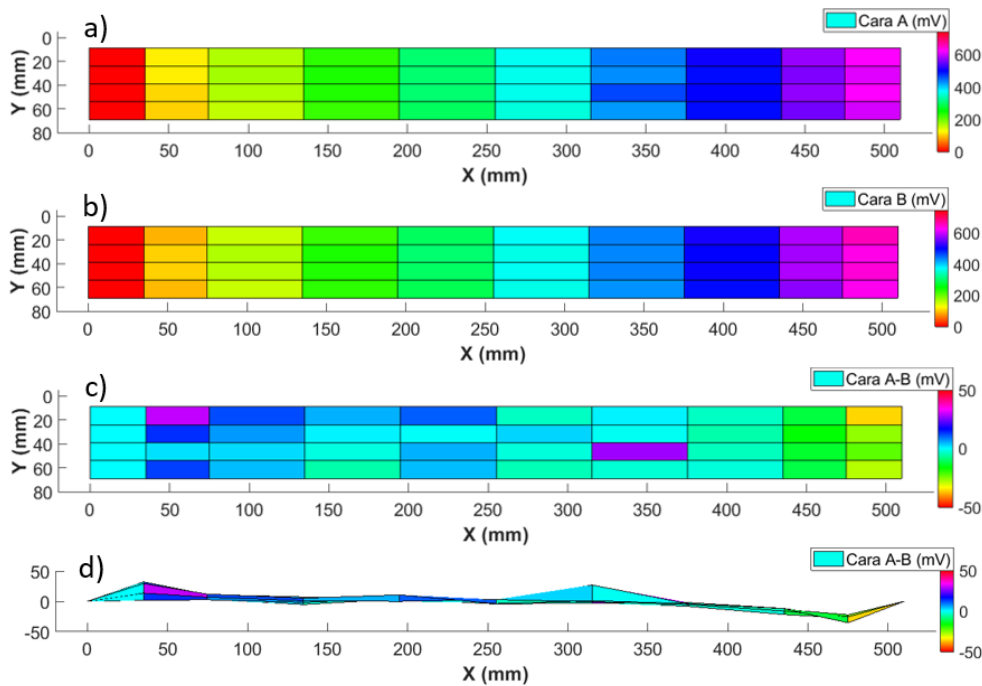


Figura 5-19.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PFE y los electrodos superficiales en ambas caras. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara A. b) Potenciales medidos en la cara B. c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

• **Probeta PME con electrodos en ambas caras**

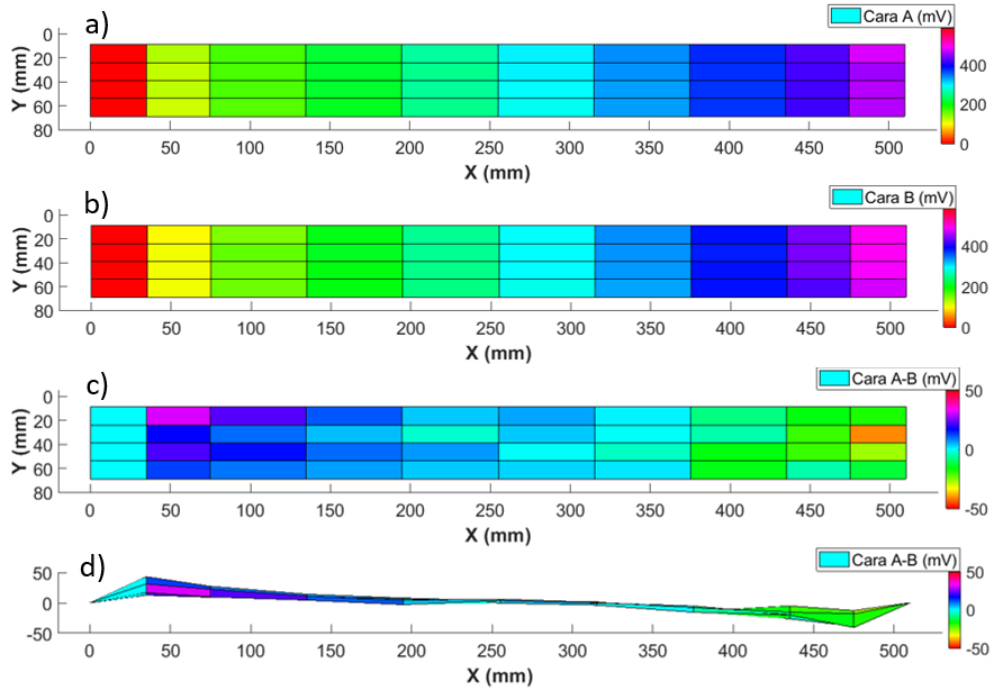


Figura 5-20.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PME y los electrodos superficiales en ambas caras. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara A. b) Potenciales medidos en la cara B. c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

• **Probeta PGE con electrodos en ambas caras**

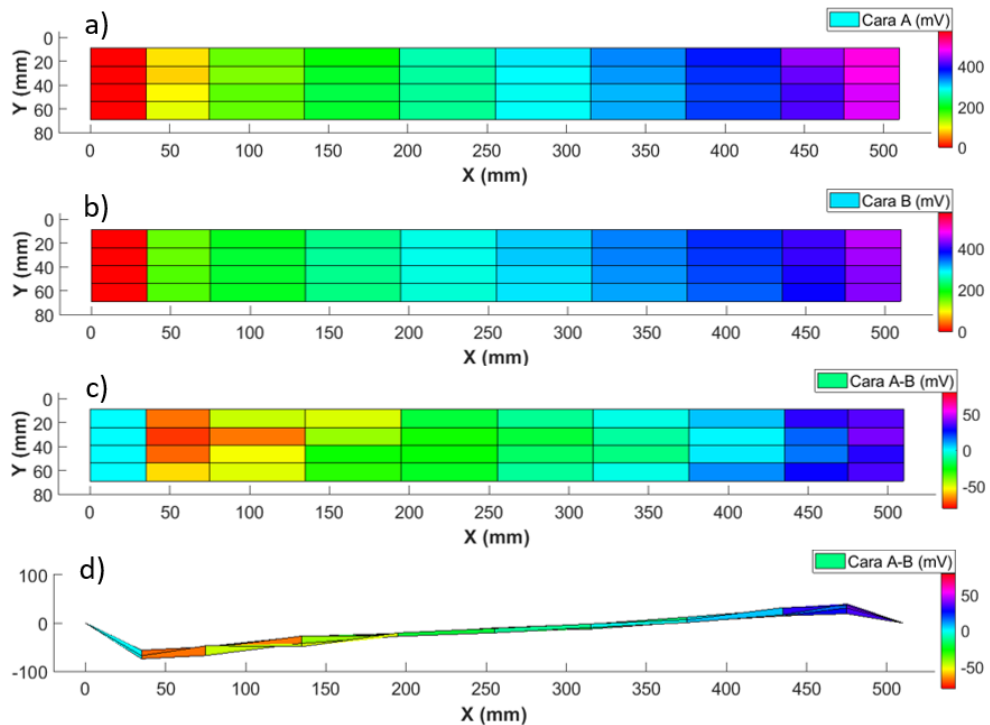


Figura 5-21.- Valores del Ensayo S5 con la probeta PGE y los electrodos superficiales en ambas caras. La corriente inyectada es de 4,98 A. a) Potenciales medidos en la cara A. b) Potenciales medidos en la cara B. c) Diferencia de potenciales entre ambas caras (A-B). d) Diferencia de potencial entre ambas caras visto de perfil, a lo largo de la probeta.

5.3.5.2 Comentarios del Ensayo S5

A partir de estos resultados, podemos establecer diferentes análisis y comparativas con los ensayos previos. En primer lugar, miramos los resultados cuando se inyecta corriente por una sola cara de la probeta.

- Según se comentó en la introducción de este capítulo, al utilizar electrodos completos, es decir, que cubren todo el ancho de la probeta, podemos realizar un análisis en 2D [21]. Por tanto, para la misma corriente inyectada, ver como penetra en el material (dirección Z). Al aumentar el tamaño de la probeta, tanto en largo como en ancho, pero inyectar la misma corriente, la densidad de corriente disminuye. De ahí también la reducción del valor la R_T para un mismo espesor.
- A modo de resumen se muestra la tabla de los valores más representativos, así como su evolución de forma gráfica.

Probeta	I_T (A)	R_T (mΩ)	V_T (mV)	Max V_d (mV)	$V_T / \text{Max } V_d$ (%)
PFG	4,98	223,7	1120	275,2	24,6
PMG	4,98	238,9	1190	340,2	28,6
PGG	4,98	303,2	1510	442,1	29,3
PPG	4,98	78,9	393	33,5	8,5
PFE	4,98	216,2	1098	136,1	12,4
PME	4,98	233,7	1203	254,3	21,1
PGE	4,98	243,7	1219	333,1	27,3

Tabla 5-10.- Resumen de los valores más significativos de las diferentes probetas estudiadas.

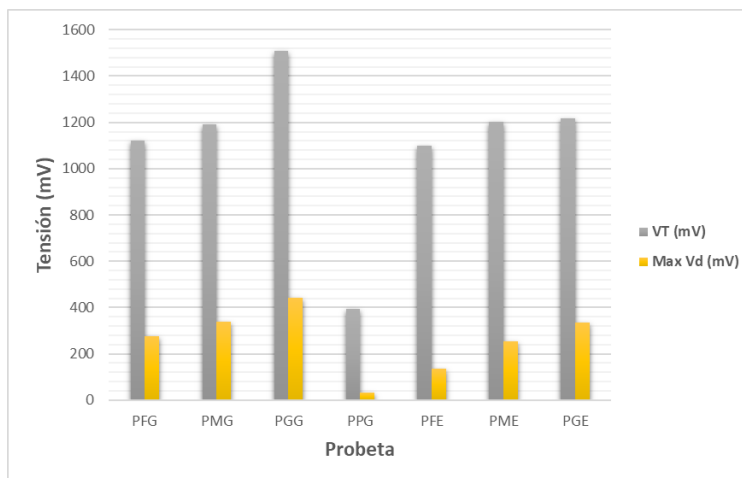


Figura 5-22.- Comparativa de la evolución de la máxima diferencia de potencial (Max V_d) respecto del total de tensión medida en extremos de los electrodos superficiales para cada una de las probetas ensayadas.

- El comportamiento que se observa en las probetas PxE (las de mayor tamaño) respecto a las PxG es similar en cuanto a la tendencia, es decir, a medida que aumenta el espesor, aumenta la diferencia de potencial. Pero si se compara la diferencia de potencial entre caras para un mismo espesor de laminado, cuanto mayor es el tamaño, menor es la diferencia de potencial entre las caras, siendo el potencial total aplicado similar. Esto hace pensar que, al aumentar la distancia entre electrodos, la corriente puede penetrar más en el material y uniformiza los potenciales.

- Si se observa la evolución de la diferencia de potencial entre caras, se puede observar que, en las probetas de mayor tamaño (PxE), la transición del potencial negativo al potencial positivo es más suave y, por tanto, la zona donde la diferencia de potencial es nula es mayor. Esta situación queda especialmente claro en la Figura 5-15 d) que corresponde a la probeta de menor espesor (PFE). A medida que incrementa el espesor, esta transición se hace más brusca.
- Si observamos la ratio ($V_T / \text{Max } V_d$), vemos que para las probetas de menor tamaño (PxG) el valor se mantiene, mientras que en las probetas de mayor tamaño (PxE) esta ratio aumenta claramente con el espesor.
- Sigue siendo evidente que la mayor diferencia de potencial se da en las zonas cercanas a los electrodos por donde se realiza la inyección de corriente y se va reduciendo a medida que nos vamos separando. Además, casi siempre coincide con la zona cercana al electrodo de potencial 0 V. En la zona central de la probeta la diferencia de potencial es prácticamente nula.

Si analizamos los datos obtenidos cuando se inyecta corriente por ambas caras de la misma probeta de forma simultánea, se destacan los siguientes aspectos:

- En primer lugar, vemos la evolución de la R_T medida con electrodos en una cara y en las dos. Vemos que para la probeta de espesor medio (PME) y la más gruesa (PGE), la ratio es prácticamente de la mitad, mientras que en la más fina (PFE) el porcentaje es mayor. Esto corrobora lo visto en estos ensayos, donde en la probeta PFE se observaba cierta influencia sobre la cara opuesta a la inyección de corriente al inyectar por una sola cara, mientras que en la probeta PGE se observaba cierta independencia. La probeta PME parece estar un poco en el límite, donde la influencia de la cara de inyección sobre la opuesta es mínima.

R_T	1 cara (m Ω)	2 caras (m Ω)	2c/1c (%)
PFE	216,2	148,1	68,5
PME	233,7	118,2	50,6
PGE	243,7	113,1	46,4

Tabla 5-11.- Evolución de la RT para cada probeta al disponer de contactos superficiales en una cara o en ambas.

- Otra forma de validar este desacoplamiento entre ambas caras de la probeta PGE, es observado la evolución de la diferencia de potencial a lo largo de la misma. Se puede ver un comportamiento similar al observado cuando sólo se inyectaba corriente por una cara. En el caso de las probetas PFE y PME, se observa un comportamiento similar al observado en la probeta de material pultruido (PPG), es decir, donde existe una influencia del potencial de una cara sobre la otra.
- Queda claro que, al inyectar corriente por ambas caras de la probeta, la diferencia de potencial entre ambas caras se reduce significativamente en todos los casos.

5.3.6 Ensayo S6

Hasta este momento, todos los ensayos de inyección de corriente superficial que se han realizado, han sido inyectado corriente continua. En este ensayo se desea analizar el comportamiento de las probetas de material compuesto de CFRP frente a impulsos de corriente y comparar su comportamiento frente a conductores metálicos de diferentes materiales y geometrías.

Es destacable la inexistencia de trabajos publicados donde se estudie la distribución de corriente en una WTB con el LPS incorporado [22]. Obviamente, disponer de la viga de una WTB que incorpore CFRP no es fácil y está estrechamente ligado a los diseños propios de cada fabricante. Pero el fin para la protección de una WTB es poder entender cómo se distribuirá la corriente de un rayo que impacta sobre los receptores y se distribuye a través del LPS, formado por el conductor bajante y las uniones equipotenciales con la estructura de material compuesto de CFRP integrado en la viga.

También son pocos los trabajos que modelan los compuestos de CFRP frente a impulsos de corriente que circulan a través del material [3], [13], [23]–[26]. La mayor parte de trabajos existentes con impulsos de corriente van principalmente orientados a evaluar el comportamiento del material frente a impactos directos y como estos pueden dañar el material [27], [28]. Además, una gran parte de ellos suelen orientarse a compuesto de CFRP con fibras en varias direcciones.

Los trabajos que analizan el comportamiento de los compuestos de CFRP frente a la frecuencia suelen utilizar probetas de pequeño tamaño y suelen concluir con que el material tiene un comportamiento prácticamente resistivo [29], despreciando los efectos inductivos y capacitivos.

Por eso, en este ensayo se utilizarán las probetas de mayor tamaño de que se dispone y se las someterá a impulsos de corriente. De esto forma se podrá validar el comportamiento de este material bajo estas condiciones.

Para este ensayo las probetas utilizadas son las siguientes:

Nombre probeta	Tipo	Nº de capas	Espesor total
PFE	Prepreg	3	1,3 mm
PME	Prepreg	5	2,4 mm
PGE	Prepreg	8	4,4 mm
PFA	Aluminio	--	1,3 mm
PGA	Aluminio	--	3,5 mm

Tabla 5-12.- Descripción de las probetas utilizadas para los ensayos de impulsos de corriente superficial.

Todas las probetas indicadas en la Tabla 5-12 tienen el mismo tamaño y sólo cambia el espeso y el tipo de material. El tamaño utilizado ha sido el de las probetas más grandes disponibles (PxE) y que corresponden con **540 mm** de largo (dirección de las fibras – X) y **78 mm** de ancho (dirección transversal a las fibras –Y).

En este ensayo también se han querido incluir dos materiales utilizados habitualmente para realizar los bajantes del LPS.

Nombre probeta	Tipo	Características
PCC	Cobre	Conductor multifilar $\varnothing 10,5 \text{ mm}$
PBC	Cobre	Conductor multifilar de banda 32 mm ancho x 3 mm espesor

Tabla 5-13.- Descripción de los conductores utilizados para los ensayos de impulso de corriente.

La longitud utilizada de estos conductores para los ensayos es la misma que la de las probetas anteriores, es decir, **540 mm**. De esta forma se facilitará la comparación entre el comportamiento de todas las probetas.

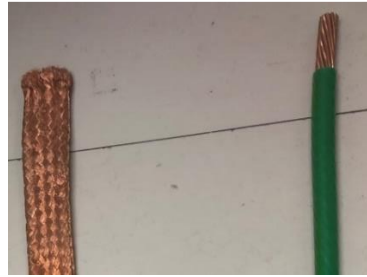


Figura 5-23.- Detalle de los tipos de conductores incluidos en este ensayo.

Para acabar de completar la información sobre este ensayo, se incluye el esquema utilizado para la medida. En él se puede observar que se mide la tensión total sobre la probeta, incluidas las conexiones. La corriente inyectada corresponde con un impulso de onda normalizada 8/20 μs .

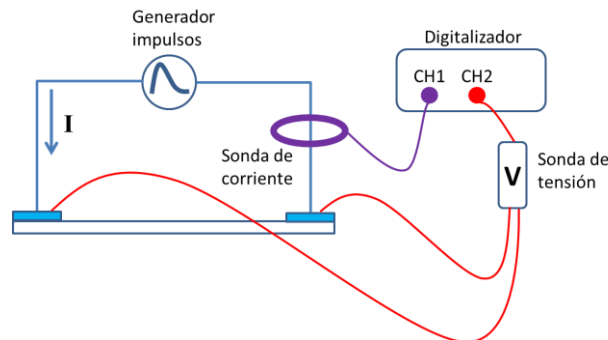


Figura 5-24.- Esquema del montaje para el ensayo de impulsos de corriente.

Para la correcta medición del impulso de corriente y de la tensión sobre la probeta se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Sonda de corriente: Current Monitor Pearson 310.
- Sonda de tensión: High Voltage Probe P6015.
- Digitalizador: Picoscope 4224.

5.3.6.1 Resultados del Ensayo S6

A continuación, se mostrarán las formas de onda de tensión y corriente sobre cada una de las probetas. Para todos estos ensayos se intenta mantener la misma amplitud del impulso de corriente con el objetivo de facilitar la comparación entre cada una de las probetas. El valor elegido para el pico de corriente está alrededor de 1,1 kA.

Al finalizar los ensayos se mostrarán los valores de la R_T de cada probeta y la impedancia de pico (Z_P). Este valor de impedancia es la relación entre la tensión de pico (V_P) y la corriente de pico (I_P) medidas. En algunos estudios de puestas a tierra, donde se analiza el comportamiento del terreno frente a corriente tipo rayo, se utiliza este valor para comparar el comportamiento transitorio frente al de corriente continua [30], [31].

- Comparativa de las probetas de material conductor.

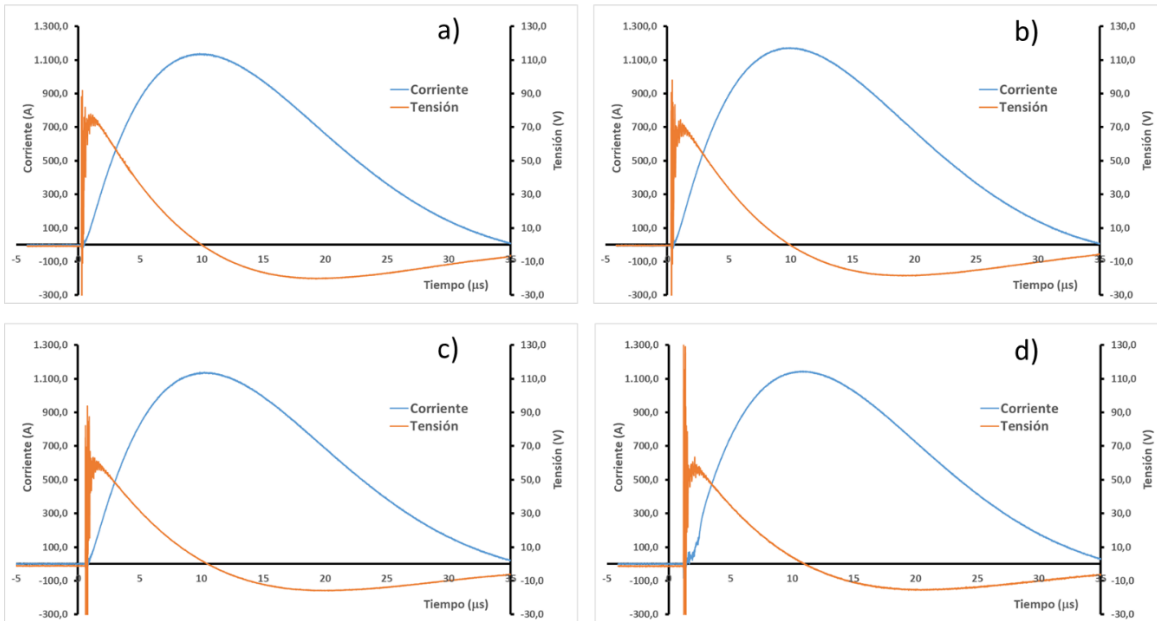


Figura 5-25.- Formas de onda de la tensión y corriente medidas. La amplitud de la corriente de pico aplicada es algo superior a 1,1 kA. a) Probeta PBC. b) Probeta PCC. c) Probeta PFA. d) Probeta PGA.

- Comparativa de las probetas PFE y PME con contactos superficiales en una cara y en las dos.

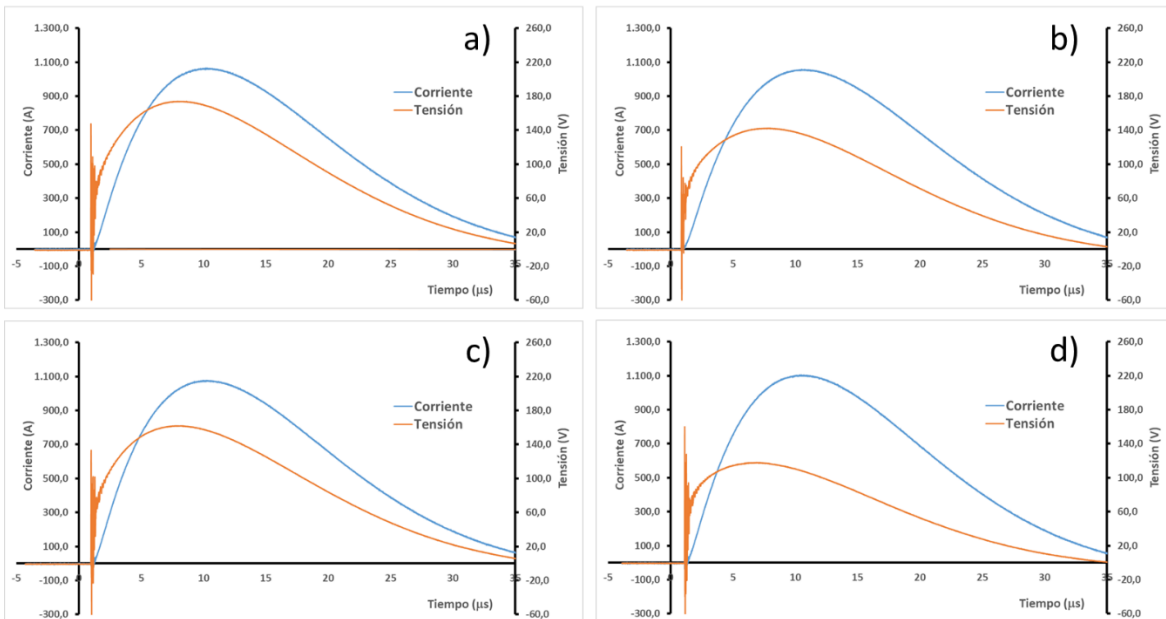


Figura 5-26.- Formas de onda de la tensión y corriente medidas. La amplitud de la corriente de pico aplicada es algo superior a 1,1 kA. a) Probeta PFE con contactos superficiales en una cara. b) Probeta PFE con contactos superficiales en ambas caras. c) Probeta PME con contactos superficiales en una cara. d) Probeta PME con contactos superficiales en ambas caras.

- Comparativa de las probetas PFE y PGE con contactos superficiales en una cara y en las dos.

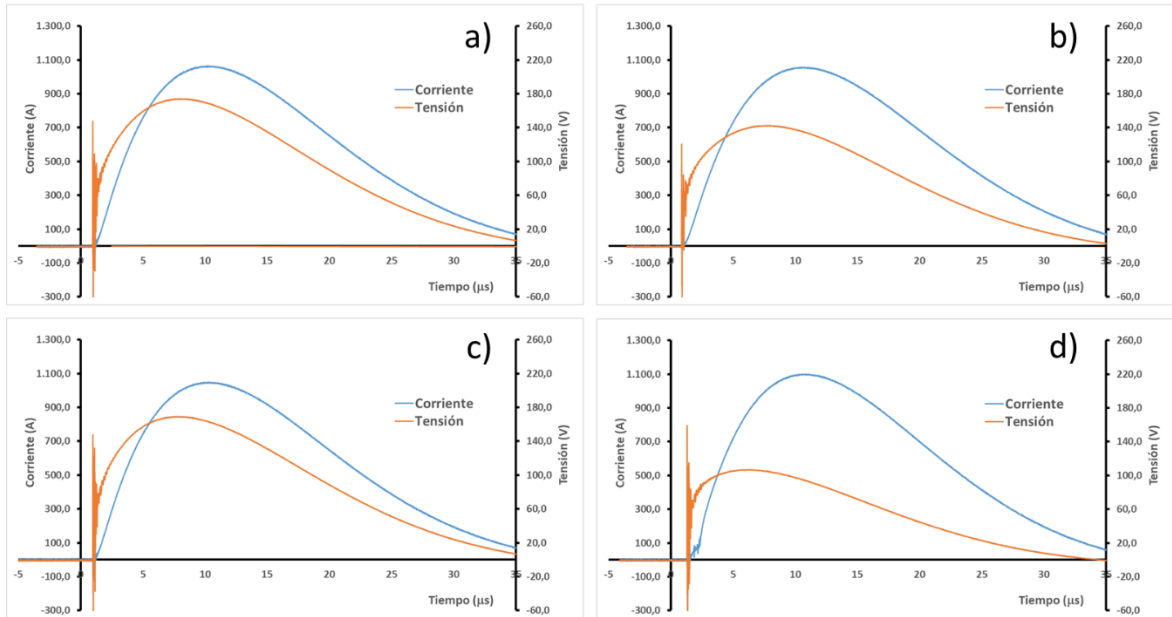


Figura 5-27.- Formas de onda de la tensión y corriente medidas. La amplitud de la corriente de pico aplicada es algo superior a 1,1 kA. a) Probeta PFE con contactos superficiales en una cara. b) Probeta PFE con contactos superficiales en ambas caras. c) Probeta PGE con contactos superficiales en una cara. d) Probeta PGE con contactos superficiales en ambas caras.

Una vez finalizado el ensayo del impulso de corriente, se procede a medir la R_T de cada una de las probetas. Para ello se utiliza el micro-óhmetro Resistomat 2316. También se calcula la Z_P de cada probeta.

Probeta	R_T (m Ω)	Z_P (m Ω)	R_T/Z_P (%)
PBC	2,3	66,6	3,5
PCC	1,7	61,2	2,8
PFA	4,7	53,3	8,8
PGA	5,9	51,7	11,4
PFE_1c	218,2	163,6	133,4
PFE_2c	146,5	135,2	108,4
PME_1c	229,6	150,8	152,3
PME_2c	116,6	107,2	108,8
PGE_1c	240,4	162,0	148,4
PGE_2c	111,2	96,3	115,5

Tabla 5-14.- Tabla de valores de R_T y Z_P de cada una de las probetas ensayadas.

5.3.6.2 Comentarios del Ensayo S6

Una vez finalizados los ensayos con impulso de corriente se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Dado que para todas las probetas se ha mantenido tanto la configuración del ensayo como el impulso de corriente (amplitud y forma de onda), esto nos permite comparar el comportamiento de cada una de ellas. El primer aspecto destacable es el comportamiento mucho más resistivo que tiene un laminado de compuesto de CFRP frente a las diferentes probetas de material conductor (aluminio y cobre).

- Todas las probetas de material conductor tienen un comportamiento similar y, frente al impulso de corriente, se observa su tendencia hacia un comportamiento inductivo. Evidentemente el pico de tensión varía en función de la R_T de cada probeta. Aquí también cabe destacar la repercusión que puede tener el efecto pelicular en el comportamiento de estos materiales con el aumento de la frecuencia asociada a los impulsos de corriente.
- Si se analiza el comportamiento de las probetas de material compuesto de CFRP, se observa este comportamiento mucho más resistivo, pero varía en función de si se ha realizado la conexión de los electrodos superficiales en una cara o en ambas caras, y en función del espesor de la probeta.
- Al conectar sólo electrodos superficiales en una cara de la probeta, el comportamiento es muy similar en todas las probetas y el cambio en la amplitud de la tensión está asociado a su diferente valor de R_T .
- En el caso de la probeta más delgada (PFE), tanto con los electrodos en una cara como en las dos, el comportamiento es similar. Varía la amplitud del pico de tensión puesto que también varía el valor de la R_T . Al aumentar el espesor de la probeta, se observa que el comportamiento inductivo se intensifica al colocar los contactos superficiales en ambas caras.
 Esto hace pensar que, cuanto mayor es el espesor, más desacopladas están ambas capas del material compuesto. Por tanto, es como si tuviéramos dos conductores paralelos por los que circula una corriente y esto intensifica el acoplamiento magnético entre ambos. Este desacoplamiento entre capas del material ya se había observado al aplicar corriente continua, pero sólo destacaba el efecto resistivo.
- En la Tabla 5-14 podemos ver a través de la ratio entre la R_T y la Z_P como en las probetas de material metálico, prevalece el efecto inductivo frente al resistivo, mientras que en las de material compuesto de CFRP, prevalece el comportamiento resistivo, aunque cuanto más desacopladas están las capas del material, más significativo es el efecto inductivo.
- Por último, se observa que para todas las probetas de CFRP, el valor de Z_P es inferior al de R_T . A priori no tendría sentido. Pero dado que se está midiendo la resistencia total de la probeta incluidos los contactos, hace pensar que esta última, varíe su valor cuando se aplican impulso. Este fenómeno debería ser estudiado con mayor detenimiento.

5.3.7 Ensayo S7

Con el objetivo de seguir profundizando en el comportamiento de los compuestos de CFRP frente a impulso de corriente se plantea un nuevo ensayo. En esta ocasión se proponen dos nuevas situaciones.

La primera es que los electrodos de inyección de corriente no cubran todo el ancho de la probeta. Esta situación tiene que ver con que la sección de la viga de una WTB no es uniforme y su ancho varía a lo largo de toda ella. Por tanto, se desea analizar el efecto de la conductividad en la dirección transversal a las fibras (Y) cuando se inyecta corriente de forma superficial.

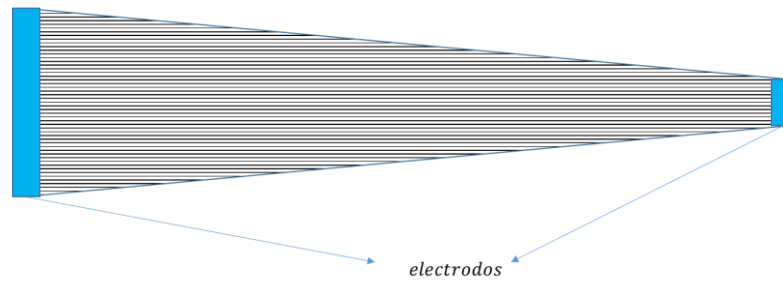


Figura 5-28.- Representación de un tramo de spar cap de CFRP comprendido entre dos electrodos de equipotencialización con conexión superficial.

El segundo aspecto que se desea estudiar es el comportamiento de la misma probeta de CFRP frente a diferentes impulsos de corriente, uno más lento y otro más rápido. De esta forma se podrá analizar la linealidad de su comportamiento y la existencia o no de efecto pelicular con el aumento de la frecuencia.

Para llevar a cabo este ensayo se utilizará una probeta de CFRP fabricada con láminas de prepreg y con espesor de 2,62 mm después de pulirla, es decir, correspondiente al material utilizado hasta ahora e identificado como PMx. Las dimensiones de la probeta, de los electrodos y la ubicación de los mismos se puede ver en la Figura 5-29

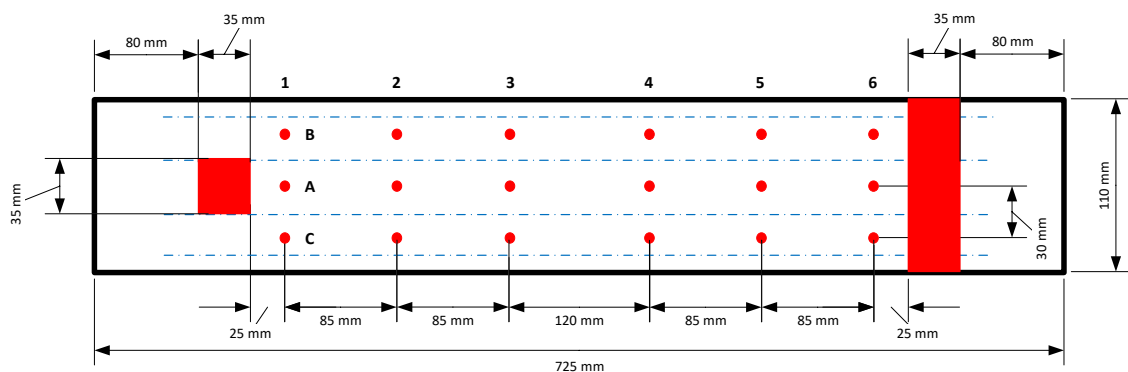


Figura 5-29.- Esquema de la probeta utilizada para el Ensayo S7.

Sobre esta configuración de la probeta se inyectarán los impulsos de corriente y se medirán diferentes potenciales, tanto en la dirección longitudinal (X) como transversal (Y).

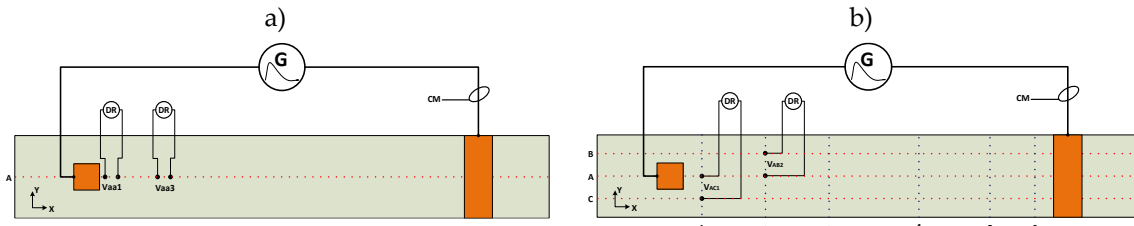


Figura 5-30.- Esquema del sistema de medida. a) Tensiones sobre el eje longitudinal (V_{AAX}). b) Tensiones en dirección transversal (V_{ABX} y V_{ACX}).

Para poder registrar cada una de las tensiones indicadas, se repite el ensayo manteniendo la amplitud del impulso y moviendo los electrodos de medida de potencial a cada una de las posiciones indicadas. El impulso de corriente se mide mediante una sonda (CM) Pearson Modelo 110^a. Para la medida de los potenciales se fabricó una sonda ad hoc con dos electrodos separados 30 mm. El electrodo positivo es el que se posiciona con la coordenada indicada para cada medida. Ambas señales, la de tensión y la de corriente son registradas con un digitalizador (DR) Picoscope modelo 4424.

Tal y como se ha indicado se aplican dos tipos de impulso. El primero, más lento, tiene un tiempo de frente 13 μ s y un valor de pico de 280 A.

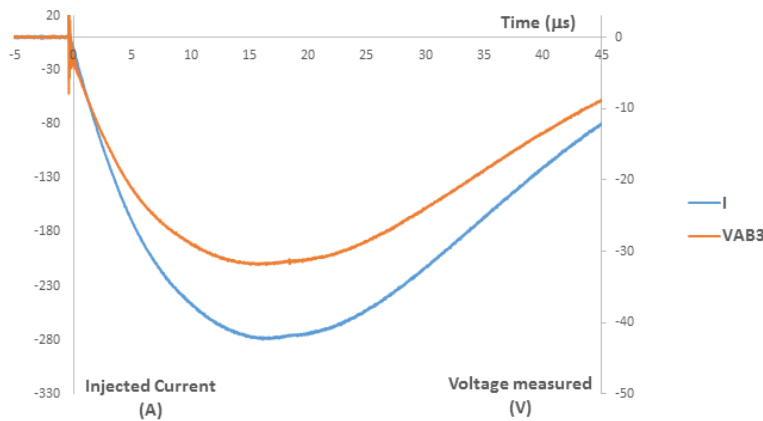


Figura 5-31.- Impulso de corriente aplicado para la forma de onda lenta y tensión medida en el punto V_{AB3} .

Para el impulso más rápido se aplica un tiempo de frente de 3 μ s y un valor de pico de 460 A.

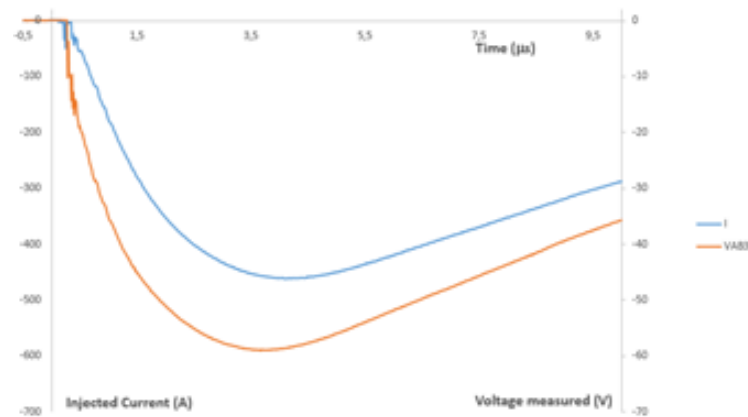


Figura 5-32.- Impulso de corriente para la forma de onda rápida y tensión medida en el punto V_{AB3} .

Con los valores de pico de tensión y de corriente se calcula la impedancia de pico (Z_P). Todos las medidas realizadas y valores calculados se encuentran en el Anexo A.6.

5.3.7.1 Resultados del Ensayo S7.

A continuación, se muestra, de forma gráfica, los resultados obtenidos de este ensayo. Primero por separado para cada uno de los tipos de impulso aplicados y luego, una comparativa para destacar las diferencias entre ambos casos.

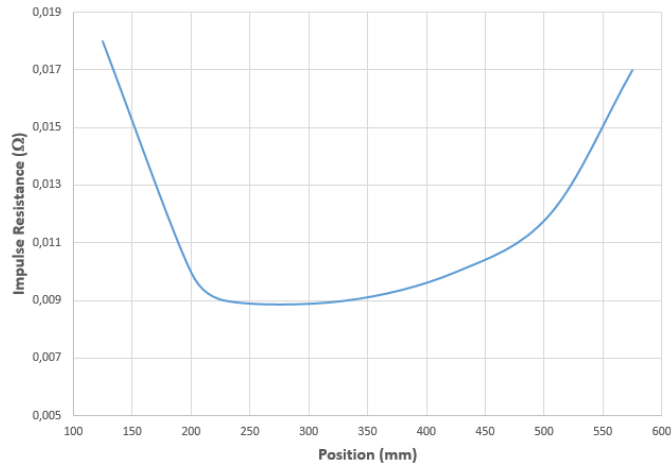


Figura 5-33.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección de las fibras para el impulso con tiempo de frente lento.

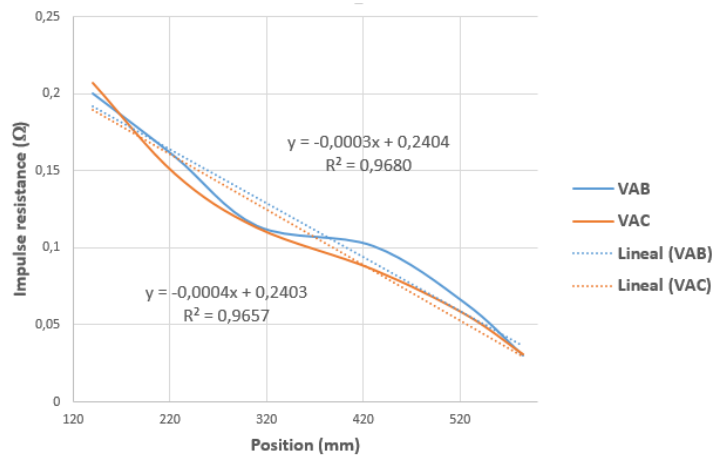


Figura 5-34.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección transversal a la fibras (AB y AC) para el impulso con tiempo de frente lento.

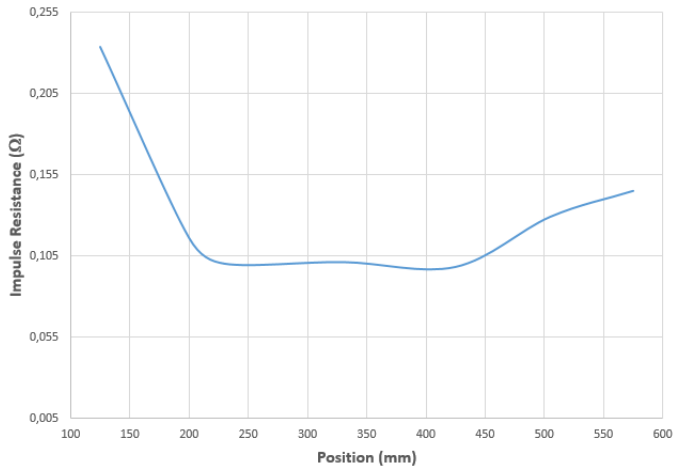


Figura 5-35.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección de las fibras para el impulso con tiempo de frente rápido.

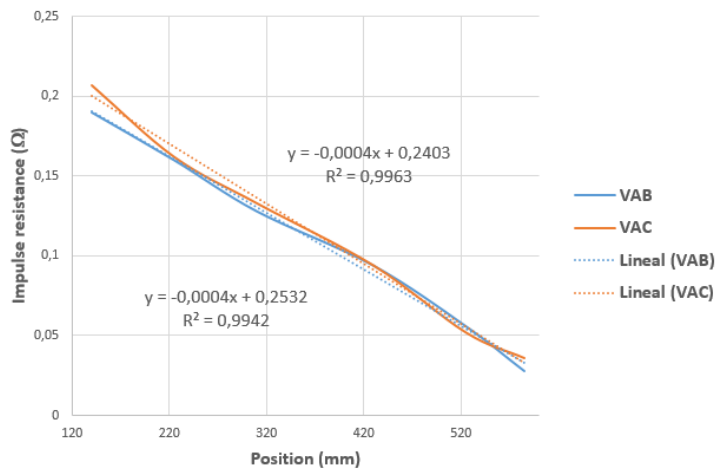


Figura 5-36.- Distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección transversal a la fibras (AB y AC) para el impulso con tiempo de frente rápido.

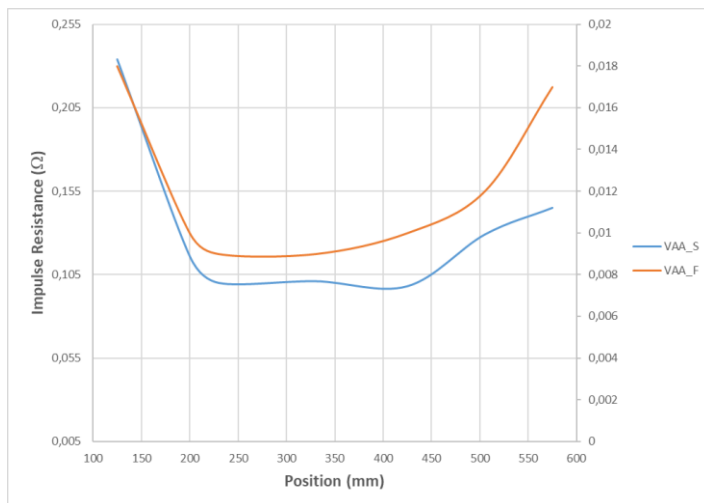


Figura 5-37.- Comparativa de la distribución del valor obtenido de Z_P a lo largo de la probeta en la dirección de las fibras para los impulsos aplicados (S – frente lento; F – frente rápido).

5.3.7.2 Comentarios del Ensayo S7.

Después de los resultados obtenidos se observan algunos comportamientos que vale la pena destacar:

- En primer lugar, la alta linealidad mostrada por los valores de Z_F para las zonas paralelas a la zona de inyección de corriente. Si bien es algo superior para el impulso con el tiempo de frente rápido, en ambos casos es bastante alto. Además, observando su valor se observa como la corriente derivada en dirección transversal a las fibras es mínima, de ahí el valor tan bajo.
- Si se analiza el comportamiento a través de la zona central de la probeta, por donde circula la corriente, se observa una mayor concentración de potencial alrededor de los electrodos que en la zona central de la probeta.

Observando el electrodo por donde se inyecta la corriente, se puede ver un comportamiento bastante similar con ambos frentes de onda. No es así en el electrodo de retorno donde, si bien el potencial es superior al existente en la zona central, difiere de forma significativa entre el tiempo de frente lento, donde la concentración es más suave, mientras que para el frente rápido es más parecido al del electrodo de inyección de corriente.

Este fenómeno puede estar asociado al efecto pelicular de la probeta y, lo corroboraría, el mayor valor existente en la zona central de la probeta para el frente rápido, indicando que el espesor efectivo de conducción de la probeta se ve reducido al aumentar la frecuencia asociada al impulso aplicado.

- Como último elemento destacable, también se observa un mayor desfase entre la tensión e intensidad aplicada en la probeta en el caso del frente de onda rápido. Este comportamiento se puede asociar aun mayor efecto de la autoinducción en el comportamiento de la probeta.

5.4 Discusión final de los resultados obtenidos

Después de todos los ensayos realizados inyectado corriente de forma superficial, se puede concluir algunos aspectos relevantes, especialmente para la fabricación de las WTB y por consiguiente para su modelado.

- Lo primero a destacar es que la implementación de los contactos superficiales resulta menos crítica que cuando se desea inyectar corriente en la dirección de las fibras (X). Es decir, la misma técnica de pulido que se ha realizado en todos los casos permite obtener, en el caso de las conexiones superficiales, un comportamiento más homogéneo en las distribuciones de potenciales sobre todas las probetas ensayadas. Esto lo hace claramente ventajoso en la fabricación de WTB donde se dispone de estructuras de material compuesto de mayor tamaño.

- Evidentemente la fase de pulido del material compuesto de CFRP es siempre compleja y delicada ya que se debe realizar en unas condiciones óptimas para los operarios que las realicen, ya que el polvo que se desprende es elevadamente tóxico.
- Por otro lado, está claro que la estrategia a seguir desde el punto de vista de equipotencializar la viga de la WTB con el LPS varía en función del material compuesto de CFRP utilizado. Esto se deriva de que el espesor efectivo en cada uno de los materiales (prepreg o pultruido) varía considerablemente. En el caso de laminados de CFRP fabricados a partir de prepreg, el espesor o el número de láminas superpuestas determina, de forma muy significativa, la distribución de la corriente. Así que la diferencia de potencial que podría originar descargas en el interior del material viene determinada por el número de capas. Así que podría determinarse cuando es necesario realizar una conexión para facilitar la distribución de la corriente por el material, minimizando este riesgo.
- Tal y como se ha observado con el material compuesto de CFRP fabricado a partir de láminas de prepreg, si el espesor del material es suficiente para poder considerar ambas caras del laminado como aisladas, al inyectar corriente por ambas caras se potencia el efecto inductivo del laminado. Esto, utilizado de forma adecuada, podría permitir regular la impedancia equivalente de la viga de CFRP frente a la impedancia del bajante del sistema LPS. Así se podría regular que parte de la corriente del rayo se deriva por cada circuito y así mejorar el comportamiento del conjunto.
- En el caso del material pultruido, las técnicas de fabricación difieren. En este caso se dispone de perfiles de material compuesto de CFRP de un determinado espesor y estos se van combinando para conseguir la estructura final. Entre un perfil y otro de material de pultruido habrá algún tipo de material aislante (resina, fibra de vidrio, ...) que, si bien es necesario para dar la estructura final a la viga, aísla eléctricamente un perfil de otro. Por tanto, nuevamente la estrategia de equipotencialización será determinante.
- A partir del todo el conocimiento adquirido en estos ensayos y con la ayuda de herramientas de simulación como FEM o FDTD, podrían realizarse estudios sobre la configuración más óptima a la hora de fabricar una estructura de material compuesto de CFRP y cuál sería la mejor solución para facilitar la distribución de la corriente por el material, según el camino y desarrollo seguido en la fabricación de la WTB.

5.5 Bibliografía

- [1] “UNE-EN IEC61400-24:2019 - Aerogeneradores. Parte 24: Protección contra el rayo.,” 2020.
- [2] A. Todoroki, M. Tanaka, and Y. Shimamura, “Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 5, pp. 619–628, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00019-2.
- [3] M. Ueda, T. Yamaguchi, T. Ohno, Y. Kato, and T. Nishimura, “FEM-aided identification of gauge factors of unidirectional CFRP through multi-point potential measurements,” *Adv. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 37–55, 2019, doi: 10.1080/09243046.2017.1423531.
- [4] P. Scholle and M. Sinapius, “Measurement of two-dimensional electrical potential fields in {CFRP} using four-probe resistance scans,” *J. Phys. Commun.*, vol. 5, no. 12, p. 125005, 2021, doi: 10.1088/2399-6528/ac2e54.
- [5] Y. Hirano, T. Yamane, and A. Todoroki, “Through-thickness electric conductivity of toughened carbon-fibre-reinforced polymer laminates with resin-rich layers,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 122, pp. 67–72, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2015.11.018.
- [6] N. Angelidis, C. Y. Wei, and P. E. Irving, “The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 10, pp. 1135–1147, Oct. 2004, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2004.03.020.
- [7] S. J. Joo, M. H. Yu, E. B. Jeon, and H. S. Kim, “In situ fabrication of copper electrodes on carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) for damage monitoring by printing and flash light sintering,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 142, pp. 189–197, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2017.02.011.
- [8] N. Kwok and H. T. Hahn, “Resistance Heating for Self-healing Composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 13, pp. 1635–1654, 2007, doi: 10.1177/0021998306069876.
- [9] A. A. M. Laudani *et al.*, “Estimation of Contact Resistivity in Lightning Protection Equipotential Bonding Joints of Wind Turbine Blades,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 4, pp. 1163–1178, 2021, doi: 10.1109/TEM.2021.3059365.
- [10] O. Vryonis, A. A. M. Laudani, T. Andritsch, I. O. Golosnoy, and A. S. Vaughan, “Lightning Protection of Wind Turbine Blades—How Supersizing Has Created New Challenges for Nanodielectrics Research,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 37, no. 6, pp. 6–20, 2021, doi: 10.1109/MEI.2021.9580820.
- [11] E. J. Zimney, G. H. B. Dommett, R. S. Ruoff, and D. A. Dikin, “Correction factors for 4-probe electrical measurements with finite size electrodes and material anisotropy: a finite element study,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 7, pp. 2067–2073, Jun. 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/7/037.
- [12] R. D. Chippendale, “Modelling of the thermal chemical damage caused to carbon fibre composites,” University of Southampton, 2013.
- [13] R. J. Hart and O. I. Zhupanska, “The role of electrical anisotropy and effective conducting thickness in understanding and interpreting static resistance measurements in CFRP composite laminates,” *J. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 7, pp. 867–882, 2020, doi: 10.1177/0021998319870860.

- [14] H. C. Kim and S. K. See, "Electrical properties of unidirectional carbon-epoxy composites in wide frequency band," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 23, no. 7, pp. 916–921, Jul. 1990, doi: 10.1088/0022-3727/23/7/026.
- [15] T. Blythe and D. Bloor, *Electrical Properties of Polymers*. Cambridge University Press, 2008.
- [16] A. Uhlir, "The potentials of infinite systems of sources and numerical solutions of problems in semiconductor engineering," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 34, no. 1, pp. 105–128, 1955, doi: 10.1002/j.1538-7305.1955.tb03765.x.
- [17] F. M. Smits, "Measurement of sheet resistivities with the four-point probe," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 37, no. 3, pp. 711–718, 1958, doi: 10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x.
- [18] L. J. van der Pauw, "A METHOD OF MEASURING SPECIFIC RESISTIVITY AND HALL EFFECT OF DISCS OF ARBITRARY SHAPE," in *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*, pp. 174–182.
- [19] L. J. van der Pauw, "A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape," *Philips Res. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 1958.
- [20] Q. Zhao *et al.*, "Review on the Electrical Resistance/Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polymer," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: 10.3390/app9112390.
- [21] J. B. Park, T. K. Hwang, H. G. Kim, and Y. D. Doh, "Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 1, pp. 57–66, Nov. 2006, doi: 10.1088/0964-1726/16/1/006.
- [22] J. Montanyà *et al.*, "Fast current impulse test for wind turbine blades," *EUROEM*, 2008.
- [23] D. Romero, J. Montanyà, and J. Vinck, "Test and simulation of lightning current distribution on a wind turbine blade," 2014, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973406.
- [24] D. Romero, J. A. Rey, J. Montanya, R. Horta, and G. Tobella, "Investigation of potential distribution on a CFRP coupon under impulse current. Test results and FDTD simulation," 2016, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791453.
- [25] J. Montanyà, D. Romero, R. López, and G. Tobella, "Experimental determination of potential distribution on a CFRP laminate and thermal images of DC and impulse currents: evaluation of connections," 2015.
- [26] R. Abid, A. Haddad, H. Griffiths, D. Clark, and C. Stone, "Electrical characterization of aerospace graded carbon fiber reinforced plastic composites under low current DC and impulse energizations," 2013.
- [27] Y. Hirano, S. Katsumata, Y. Iwahori, and A. Todoroki, "Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 10, pp. 1461–1470, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2010.06.008.
- [28] T. Ogasawara, Y. Hirano, and A. Yoshimura, "Coupled thermal–electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 8, pp. 973–981, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2010.04.001.
- [29] E. J. Kim, J. H. Park, I. K. Paik, and C. S. Chae, "Polyurethane based sizing agent for CFRP applications," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, vol. 707, no. 1, pp. 59–65, 2020, doi: 10.1080/15421406.2020.1743455.

- [30] R. Zeng, J. He, Y. Gao, W. Sun, and Q. Su, "Measuring electrode arrangement for grounding resistance measurement of grounding system in vertical-layered soil," in *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, 2000, vol. 3, pp. 1469–1474 vol.3, doi: 10.1109/ICPST.2000.898187.
- [31] Y. Chen and P. Chowdhuri, "Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of rod-type ground electrodes," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 4, pp. 420-426(6), 2003, [Online]. Available: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd_20030246.

Capítulo 6

6 Aportaciones y trabajos asociados al estudio experimental

Todas las aportaciones y publicaciones vinculadas a esta tesis van encaminadas a conocer mejor el comportamiento de los materiales compuestos de CFRP, su uso en la fabricación de las WTB, los ensayos necesarios para la obtención de información de calidad que facilite el modelado de una WTB y del LPS, y el uso de diferentes herramientas software como soporte a dicho modelado.

Algunos de los estudios experimentales en los que se participó son anteriores al inicio de esta tesis y sirvieron para mostrar la necesidad de profundizar en ciertos aspectos del comportamiento de los compuestos de CFRP [1], [2]. Los resultados de estos estudios se presentaron en diferentes foros y congresos tal y como se citarán a continuación. Estos trabajos previos marcaron el camino para el desarrollo experimental presentado en esta tesis.

Quizás la aportación más relevante de este trabajo ha sido el desarrollo de una patente que permite aportar una solución para evaluar la calidad de las conexiones realizadas en los compuestos de CFRP. Este aspecto es uno de los más críticos como se ha podido detallar a lo largo de todo este trabajo.

Por tanto, en este capítulo se resumirán las aportaciones más relevantes en las que el doctorando ha participado y las conclusiones derivadas de ellos.

6.1 Fast current impulse test for wind turbine blades [1]

6.1.1 Introducción

Este trabajo se presentó en el marco del European Electromagnetic Conference (EUROEM-2008) y fue el primer trabajo presentado por nuestro grupo en el ámbito de la protección contra el rayo en aerogeneradores. La presentación de este trabajo coincide con el proceso de finalización del borrador de lo que hoy es la norma IEC-61400-24 [3]. A día de hoy sigue siendo de los pocos trabajos presentados sobre el ensayo de distribución de corriente para impulsos tipo rayo con una WTB real que superaba ligeramente los 60 m de longitud. En este caso la viga correspondía con un prototipo donde se estaba poniendo a prueba la tecnología de los compuestos de CFRP.

Entre los diferentes ensayos propuestos por la norma para validar el LPS de una WTB que incorporara laminados de CFRP, el de distribución de corriente sobre la viga de una WTB a tamaño real puede ser de los más complejos y costosos.

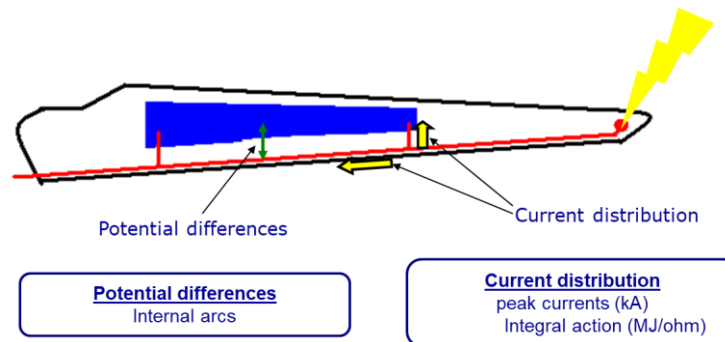


Figura 6-1.-Esquema de una WTB con las conexiones equipotenciales y la distribución de corriente. Causas de los posibles fallos.

El objetivo de los fabricantes es cumplir con máximo nivel de protección (LPL I) adaptado de la norma IEC 62305-1.

Current parameters		Symbol	Unit	LPL			
				I	II	III	IV
First positive short stroke	Peak current	I	kA	200	150	100	
	Charge	Q_{SHORT}	C	100	75	50	
	Specific energy	W/R	MJ / Ω	10	5,6	2,5	
	Time parameters	T_1 / T_2	$\mu s / \mu s$	10/350			
First negative short stroke ^a	Peak current	I	kA	100	75	50	
	Average steepness	di/dt	kA / μs	100	75	50	
	Time parameters	T_1 / T_2	$\mu s / \mu s$	1/200			
Subsequent short stroke	Peak current	I	kA	50	37,5	25	
	Average steepness	di/dt	kA / μs	200	150	100	
	Time parameters	T_1 / T_2	$\mu s / \mu s$	0,25 / 100			
Long stroke	Charge	Q_{LONG}	C	200	150	100	
	Time parameter	T_{LONG}	s	0,5			
Flash	Charge	Q_{FLASH}	C	300	225	150	

^a First negative stroke concerns only calculations and not testing.

Tabla 6-1.- Tabla de valores máximos de los parámetros del rayo según los diferentes niveles de protección [3].

Conseguir aplicar los picos de corriente y energía específica indicados en la Tabla 6-1 sobre una WTB de tamaño real no es posible, ya que las características del generador de impulsos necesario serían inviables. Sí es posible realizar ensayos aplicando valores reducidos sobre una WTB real y extrapolarlos.

Para que esta extrapolación refleje el comportamiento real se debe cumplir algunos requisitos como que los materiales utilizados para la fabricación de la WTB no deben mostrar saturación, desde el punto de vista electromagnético, para los valores indicados en la Tabla 6-1. Ensayos realizados en el sector aeronáutico permite aceptar esta afirmación [4]. Otro aspecto relevante a tener en cuenta es el comportamiento en las conexiones y si este es lineal o no debido a la densidad de corriente.

6.1.2 Características del ensayo con la WTB real

Dadas las grandes dimensiones de una WTB real, el campo magnético originado por la corriente que circula por el conductor de retorno podría afectar a las medidas. Para minimizar este efecto existen diferentes soluciones. La utilizada en este trabajo consistió en montar un conjunto de conductores alrededor de la estructura a ensayar a modo de coaxial. La distancia entre estos conductores de retorno y la viga debe de mantenerse constante y cuanto mayor sea menor será su influencia. Teniendo en cuenta que la viga no tiene una sección uniforme, mantener los criterios anteriores no resulta fácil. Otra alternativa consiste en utilizar un gran plano de masa debajo del elemento a ensayar e intentar que esta distancia se uniforme a lo largo de toda ella. En el caso de la viga de una WTB esto es complicado ya que la sección de la misma no es uniforme.

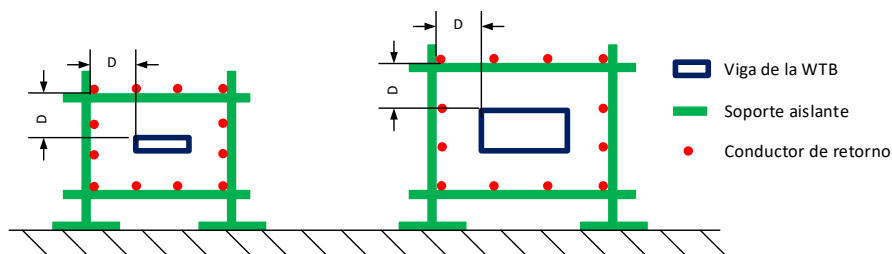


Figura 6-2.- Diferentes secciones de la viga donde la distancia con los conductores de retorno se mantiene constante.

6.1.3 Resultados del ensayo

Ante la imposibilidad de conseguir los picos de corriente indicados por la norma sobre una WTB de tamaño real, se intentó mantener la forma de onda. Para la primera descarga de retorno se consiguió la forma de onda 10/350. Para la descarga subsecuente no fue posible y se intentó aplicar una forma de onda donde el frente fuese lo más rápido posible para acercarse al comportamiento de di/dt indicado en la norma.

- **Formas de onda correspondientes a la primera descarga de retorno.**

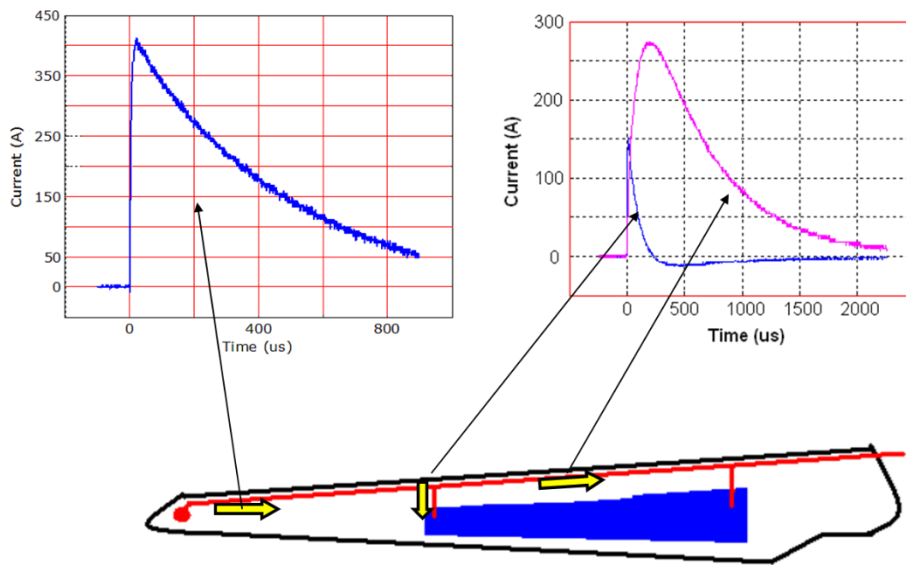


Figura 6-3.- Formas de onda y valores de la corriente total inyectada, de la corriente que circula por el bajante y de la corriente derivada por uno de los spar caps.

A partir de estas mediciones, se extrapolaron los resultados con el fin de relacionarlos con los valores indicados por la norma. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

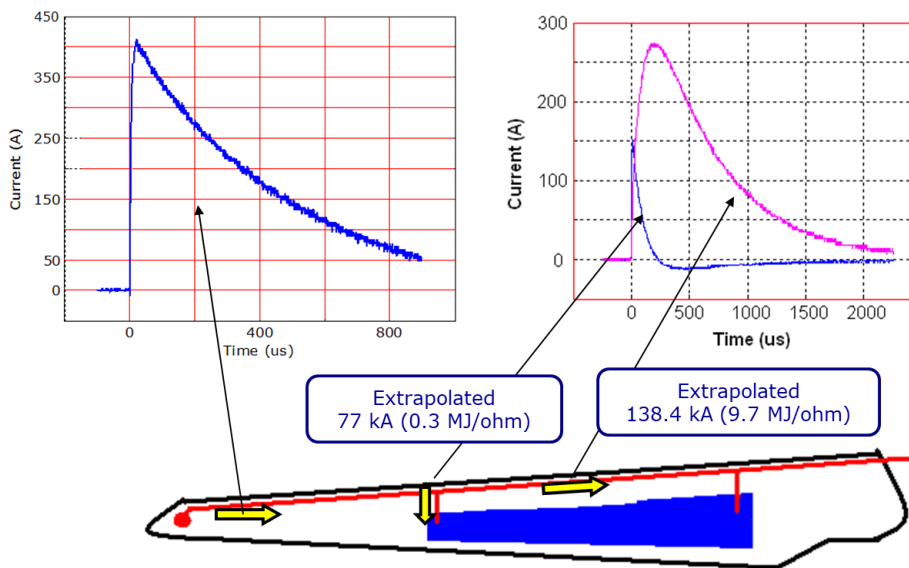


Figura 6-4.- Valores de las mediciones extrapolados a los valores de la norma para la primera descarga de retorno en el nivel de protección LPL I.

- **Formas de ondas correspondientes a la descarga subsecuente.**

En este caso, ante la imposibilidad de conseguir la forma de onda indicada en la norma, se consiguió aplicar una onda oscilante, donde el objetivo era que el frente de onda de la primera oscilación fuese lo más rápido posible y así poder obtener conclusiones con di/dt grandes.

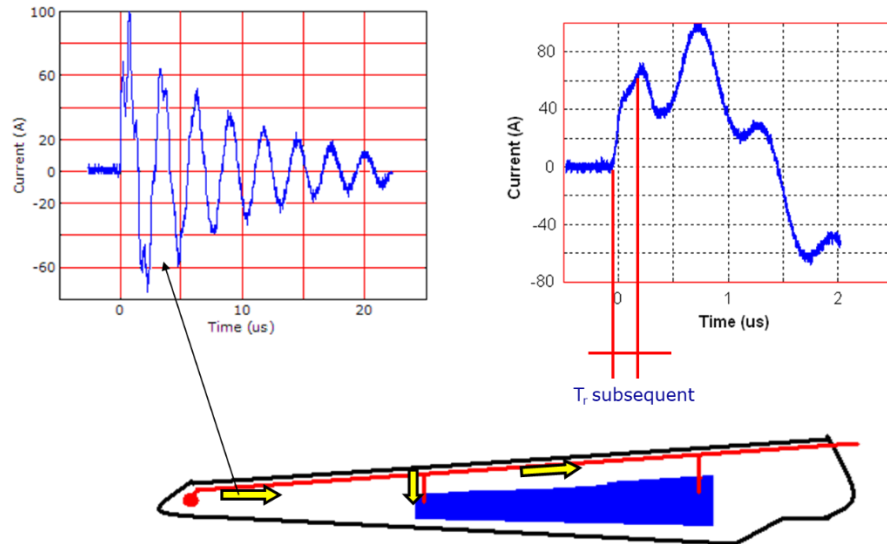


Figura 6-5.- Forma de onda de corriente inyectada en la con un frente de onda rápido.

A partir de estas mediciones se realizó la extrapolación para determinar la diferencia de potencial entre el bajante del LPS y el spar cap de CFRP.

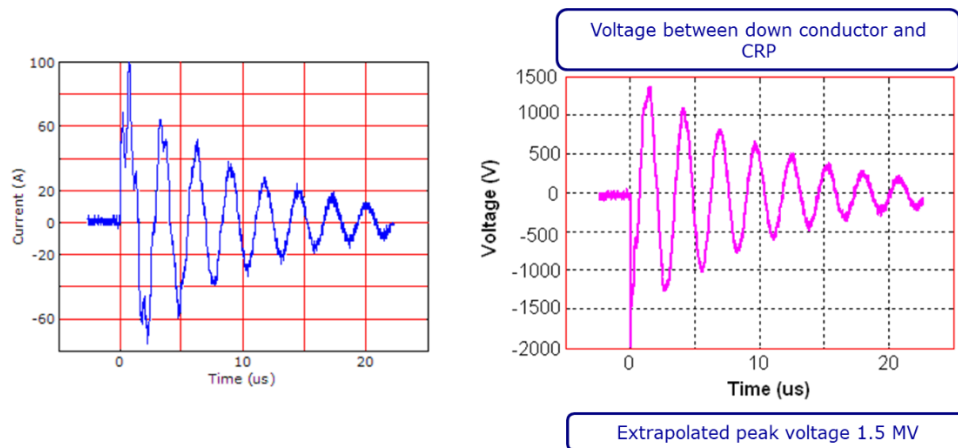


Figura 6-6.- Diferencia de potencial entre el bajante y el spar cap de CFRP extrapolado a los valores de la norma para el nivel de protección LPL I.

6.1.4 Conclusiones

De este estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones y reflexiones:

- Los fabricantes esperan conseguir el nivel máximo de protección LPL I indicado en la norma, pero existe una imposibilidad de conseguir dichos valores de forma práctica. Una vía para certificar la validez de los diseños es trabajar con valores reducidos y extrapolar dichos valores a los indicados en la norma.
- Los ensayos con palas completas, si bien son costosos y complejos, aportan una información fundamental para la creación de modelos, como vía alternativa para la validación de los diseños de protección implementados.

- Los valores de la primera descarga de retorno permiten evaluar los efectos derivados de la energía que deben soportar los laminados de CFRP y las conexiones. En este caso se observa como la primera parte del impulso de corriente, correspondiente con la alta frecuencia, circula por el laminado de CFRP, mientras que en el resto predomina la corriente por el conductor bajante del LPS.
- La descarga subsecuente, dada su elevada di/dt , es la causante de fuertes sobretensiones transitorias, pero no es claro que esta duración tan corta pueda llegar a ocasionar arcos entre el bajante y el spar cap. La distancia entre estos dos elementos puede ser crítico en el diseño del sistema de protección [4]. Los valores de pico de tensión obtenidos después de la extrapolación muestran valores elevados. Estos deben ser revisados y validados con nuevos ensayos.

6.2 Test and simulation of lightning current distribution on a wind turbine blade [2]

6.2.1 Introducción

Este trabajo surge tras la experiencia y los resultados obtenidos en [1]. En ese trabajo se había realizado un ensayo de distribución de corriente sobre el prototipo de una viga de CFRP de tamaño real y que superaba ligeramente los 60 m de longitud. Ante la imposibilidad de poder aplicar los parámetros del rayo correspondientes a LPL I [3] sobre una estructura de estas dimensiones, se realizaron ensayos con parámetros reducidos para, a continuación, realizar una extrapolación a los valores máximos correspondientes.

La norma IEC 61400-24: 2019 no especifica demasiado sobre el ensayo de distribución de corriente para la evaluación del LPS de una WTB y, ante la dificultad y el elevado coste que supone este ensayo en una WTB real, se hace especialmente importante la ayuda de modelos numéricos.

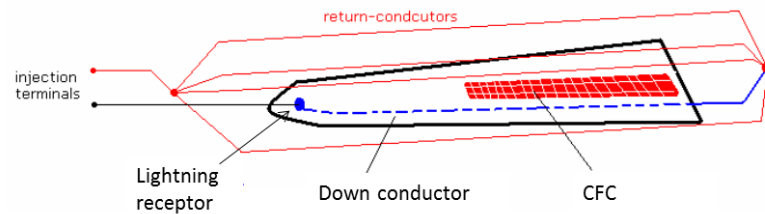


Figura 6-7.- Esquema del montaje para el ensayo de distribución de corriente.

Es por esto que, en este trabajo, se quiso realizar una primera aportación sobre el modelado numérico como herramienta fundamental en este campo. Gracias a disponer de mediciones, obtenidas sobre una viga de CFRP real, se inició el estudio de las diferentes técnicas para el desarrollo de modelos. Otro de los aspectos que se quiso estudiar en este trabajo fue la dependencia de los resultados con respecto al número de conductores utilizados para el retorno de corriente, la altura de la viga respecto del plano de tierra, el efecto de la resistencia de contacto y la densidad de corriente en los mismos.

6.2.2 Modelos planteados

Para modelar la viga de la WTB junto con el LPS se plantaron dos vías. La primera fue plantear modelos de baja frecuencia (LFM), es decir, modelos de línea de transmisión divididos en segmentos con circuitos en pi. La longitud de los segmentos a utilizar se estable en base a la longitud total del sistema a estudiar, de las frecuencias a aplicar sobre el modelo y del error aceptable para dicho estudio.

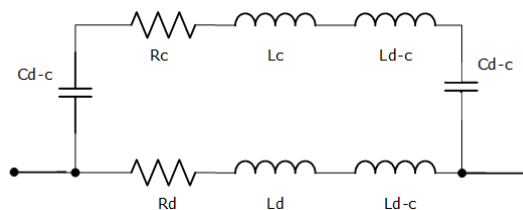


Figura 6-8.- Ejemplo del modelo de baja frecuencia representando el acoplamiento del circuito en Pi entre los segmentos c y d.

La parte resistiva del modelo se caracteriza a partir de las dimensiones y material del elemento (bajante o viga). La resistencia de contacto entre el bajante y la viga juega un papel determinante en este modelo. Otro de los aspectos que debería incorporar los modelos de baja frecuencia es el fenómeno del efecto pelicular presente en el bajante del LPS y que, como se observa en la Figura 6-10, determina que la parte inicial del impulso de corriente circule principalmente por el laminado de CFRP.

La obtención de los acoplamientos magnéticos, así como la autoinductancia de los elementos requieren de otras técnicas para conocer su valor. El retorno de corriente puede jugar un papel importante [4], [5]. Para este trabajo se utilizó FEM para la obtención de dichos parámetros.

Por otro lado, se utilizó un modelo de alta frecuencia o modelo electromagnético (EMM), utilizando para su resolución el método de los momentos (MoM) a través del software Feko [6]. El método de los momentos se resuelve en el dominio de la frecuencia. Al igual que otros métodos electromagnéticos, requiere de un mallado discreto de la superficie a analizar y unos elevados recursos de computo.

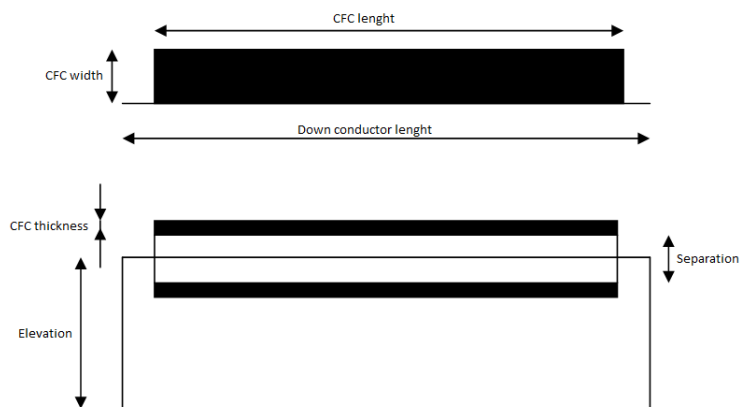


Figura 6-9.- Esquema del modelo electromagnético.

Por último, a partir de una probeta de material compuesto de CFRP, se obtuvo la resistividad del material para poder realizar las simulaciones. El procedimiento seguido corresponde con los indicados en el Capítulo 3.

6.2.3 Resultados del estudio

Partiendo de las formas de onda medidas en [1], se realizaron diversas simulaciones con el fin de ajustar la resistencia del contacto entre el laminado de CFRP y el bajante. El valor que mostraba mejor coincidencia entre ambas señales fue de 200 mΩ. Una vez conseguida la mejor aproximación posible entre las formas de onda reales y las obtenidas por simulación se realizó un comparativo entre las medidas reales y los diferentes modelos presentados. En esta comparativo no sólo se analizó el valor de pico de la corriente (I_P) por cada elemento si no la también la energía específica (AI).

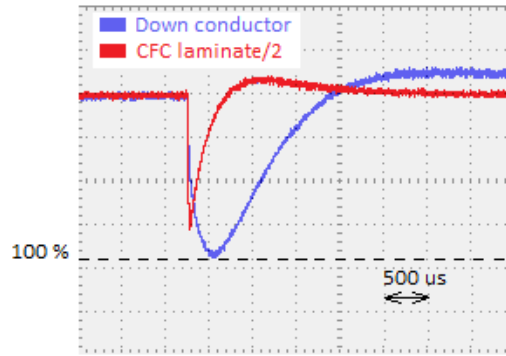


Figura 6-10.- Formas de onda de corriente obtenidas en [1].

A partir de aquí se realizó una comparativa entre la forma de onda real y la de los diferentes modelos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

	<i>Real</i>	<i>LFM</i>	<i>EMM</i>
Bajante	$I_p = 100 \%$ $AI = 100 \%$	$I_p = 87 \%$ $AI = 90 \%$	$I_p = 96 \%$ $AI = 64 \%$
Laminado de CFRP	$I_p = 84 \%$ $AI = 9.4 \%$	$I_p = 76 \%$ $AI = 9.3 \%$	$I_p = 75 \%$ $AI = 8.4 \%$

Tabla 6-2.- Tabla de valores de I_p y AI para cada uno de los modelos estudiados.

A partir del modelo electromagnético se analizó la dependencia de los resultados en función de varios parámetros:

- **Dependencia de la altura de la viga respecto del plano de tierra en el caso de no disponer de conductores de retorno.**

Se realizaron simulaciones con alturas de 0,5 m, 1 m, 2 m y 5 m. Las diferencias en el pico de corriente a través de los spar caps de CFRP era $< 5\%$.

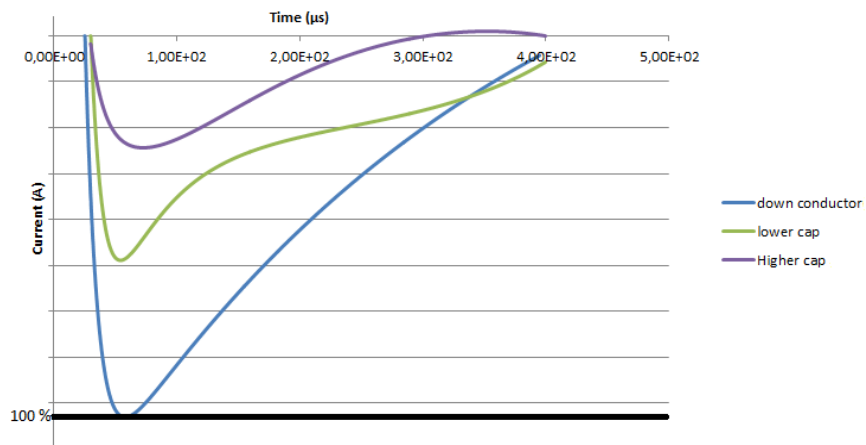


Figura 6-11.- Corrientes a través de bajante del LPS y de los dos spar caps de la viga de CFRP para una elevación respecto del plano de tierra de 0,5 m.

- **Dependencia con el número de conductores para el retorno de corriente y de la distancia de estos con respecto de la viga.**

Para este análisis se realizaron simulaciones con 4 y 8 conductores de retorno, a 1 m y 2 m de separación respecto de la viga.

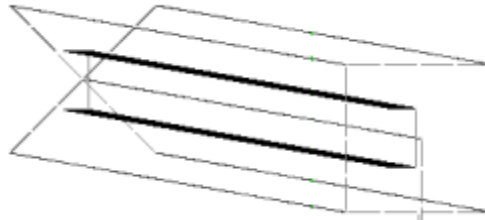


Figura 6-12.- Modelo EMM con 4 conductores de retorno y 1 m de separación respecto de la viga.

La diferencia entre los valores obtenidos de este análisis fue mínima, lo que hace pensar que este aspecto no es tan determinante para los ensayos con una pala de dimensiones reales.

- **Dependencia de la resistencia de contacto entre el bajante y el spar cap de CFRP.**

Dada de lo complejo que resulta el determinar la resistencia de contacto en la equipotencialización entre el bajante del LPS y el laminado de CFRP, se quiso estudiar como variaba la distribución de corriente entre ambos elementos en función de este valor. Se realizaron simulaciones suponiendo una resistencia de contacto nula y se fue aumentando este valor hasta una resistencia de contacto de 200 mΩ.

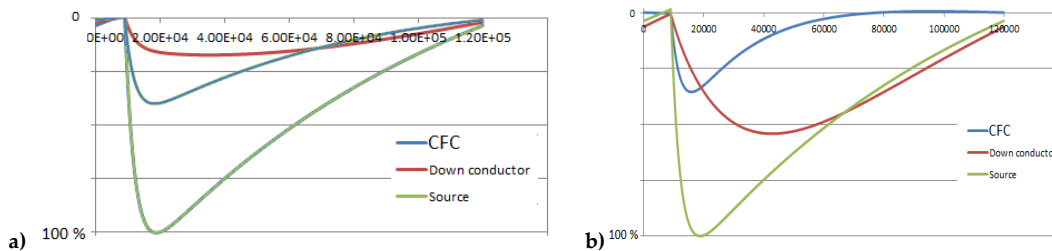


Figura 6-13.- Resultados de la distribución de corriente obtenidas con el modelo EMM. a) Considerando la resistencia de contacto nula. b) Con una resistencia de contacto de 200 mΩ.

Aquí se puede observar que la resistencia del contacto es uno de los parámetros más afecta al resultado de la distribución de corriente y a los efectos derivados de esta distribución. Un valor pequeño de la resistencia del contacto incrementa la energía específica que debe soportar el laminado de CFRP. Pero un elevado valor de esta resistencia, reduce esta energía específica pero aumenta las diferencias de potencial, pudiendo originar descargas en el material. El valor de pico de la corriente se mantiene prácticamente constante.

- **Distribución de corriente en la superficie de contacto entre el laminado de CFRP y el electrodo de equipotencialización.**

Por último se realizó un pequeño estudio sobre como era la distribución de corriente en la superficie de unión para la equipotencialización entre el laminado de CFRP y el electrodo unido al bajante del LPS.

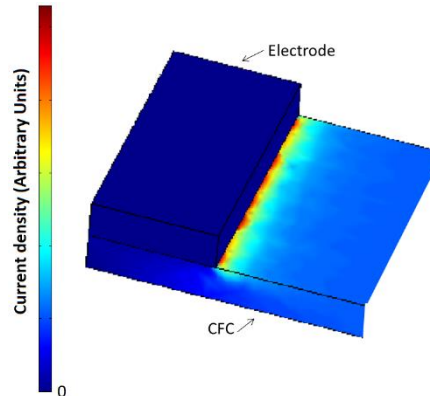


Figura 6-14. – Simulación FEM de la densidad de corriente en la zona de equipotencialización del electrodo unido al bajante y el laminado de CFRP.

En esta simulación se puede observar como la mayor densidad de corriente se concentra en el extremo final del electrodo, indicando que la corriente fluye por el electrodo metálico hasta el extremo donde se transfiere al laminado de CFRP.

6.2.4 Conclusiones

Este estudio permitió iniciar el camino hacia las diferentes maneras de modelar un WTB completa desde el punto de vista de los elementos que intervienen en la protección contra el rayo. Los aspectos más relevantes que se obtuvieron de este estudio son:

- Los resultados obtenidos a partir del modelo EMM sugieren que el tema de los conductores de retorno, la separación de los mismos y la altura con respecto al plano de tierra, en el caso de no utilizarlos no son tan críticos. Para el ensayo real con la pala completa, un buen plano de masa debajo de la viga puede ser suficiente para unos resultados de calidad. Este aspecto debería validarse con un ensayo real donde se compararn ambos métodos.
- La resistencia de contacto si resulta importante sobre como se distribuye la corriente entre los spar caps de CFRP y el bajante del LPS. Por otro lado resulta complicado determinar este valor con calidad ya que está estrechamente relacionado con proceso de fabricación empleado, los materiales utilizados y su dependencia con la alta frecuencia. Se debe estudiar como varía el valor de esta resistencia de contacto cuando se le aplica corriente continua y cuando se aplica un impulso de corriente.
- El modelo LMF puede resultar de gran utilidad, reduciendo significativamente el tiempo de computación, pero la resistencia del conductor bajante debe incluir el efecto pelicular asociado con las altas frecuencias

6.3 LIGHTPRO. Technology for wind turbines design with atmospheric lightning protection

6.3.1 Introducción

Este proyecto fue propuesto por la empresa DENA Desarrollos S.L. (INGESCO) y en el cual participó nuestro grupo de investigación y de forma particular el doctorando que presenta esta tesis. El objetivo de este proyecto era investigar sobre la viabilidad y el desarrollo de un generador de impulsos de 2,5 MV que fuese modular y portable.

Dado el crecimiento que estaba teniendo la industria eólica, los aerogeneradores y la aparición de la norma de protección contra el rayo, IEC 61400-24, esta empresa, que dispone de un laboratorio de alta tensión, veía que disponer de un generador de impulsos de alta tensión que pudiera desplazarse a las plantas de fabricación de WTB podría facilitar a los fabricantes la realización de los ensayos necesarios para la validación de sus diseños. Sería una herramienta que reduciría los tiempos de I+D+I, así como los costes.

Por tanto, este generador se convirtió en el primer diseño de un generador de impulsos de tensión, modular y portable, y que podía alcanzar los 2,5 MV. Ello permitía a la empresa disponer de una infraestructura que la diferenciaba de la competencia y ofrecer un servicio inexistente hasta la fecha.

Este proyecto fue financiado por el programa EEA GRANTS, bajo el marco del *Enviromental and Climate Change Research and Technology* y por los proyectos CDTI.

6.3.2 Diseño conceptual del generador de Marx

Las formas de onda normalizadas para ensayos de elementos afectados por sobretensiones se encuentran definidas en [7]. Para el caso de los ensayos asociados a las WTB, en [3] se hace referencia a dos formas de onda. Para sobretensiones asociadas a rayos se utiliza la 1,2/50 μ s y para sobretensiones de tipo maniobra se utiliza la 250/2500 μ s. Ambas formas de ondas vienen perfectamente definidas, así como las tolerancias aceptadas en su valores característicos.

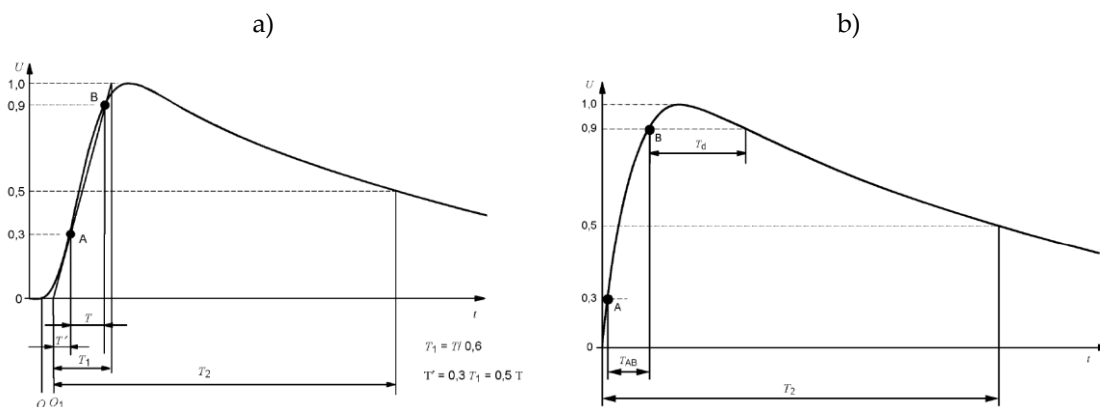


Figura 6-15.- Formas de onda normalizadas. a) Impulso de tensión tipo rayo. b) Impulso de tensión tipo maniobra.

Se estudiaron los diferentes circuitos que permiten generar este tipo de formas de ondas, teniendo en cuenta el generador modular que se quería fabricar y la eficiencia del mismo [8],[9]. En base a las ecuaciones básicas que definen estos circuitos se crearon unos modelos con Matlab para obtener la forma de onda deseada y así determinar la sensibilidad de sus parámetros en función del número de etapas utilizadas.

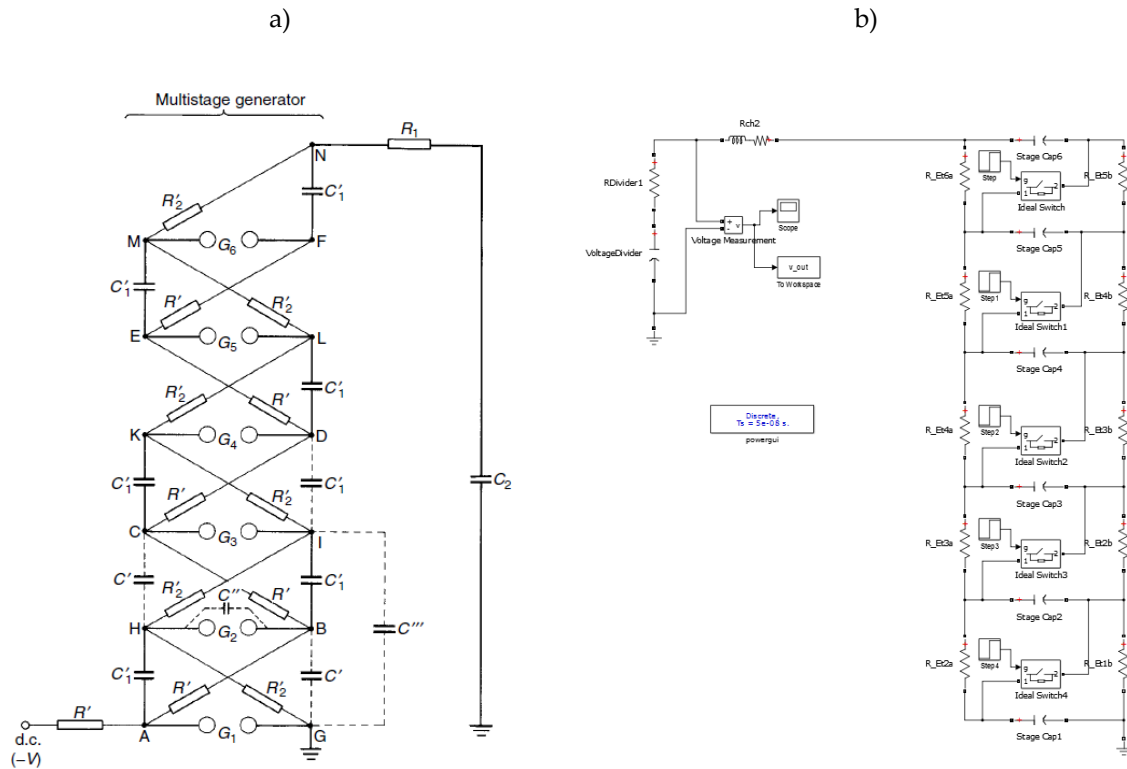


Figura 6-16.- a) Esquema básico de un generador de Marx. b) Modelo de 6 etapas implementado con Matlab.

En base a estos estudios se pudieron dimensionar los diferentes componentes del generador y así proceder a la fabricación del prototipo para conseguir una forma de onda normalizada 250/2500 μs .

6.3.3 Resultados obtenidos

A continuación, se muestran algunos resultados donde se comparan los valores obtenidos con el modelo y los obtenidos con el generador real.

Vpeak_T (kV)	Vpeak_P (kV)	T1_T (μs)	T1_P (μs)	T2_T (μs)	T2_P (μs)
509,4	491,9	208,5	196,3	1800,0	1723,0
436,6	424,1	208,5	197,0	1800,0	1720,0
363,9	353,0	208,5	196,8	1800,0	1724,0
291,0	283,4	208,4	197,3	1800,0	1720,8

Tabla 6-3.- Comparación de los valores obtenidos con el modelo teórico (T) con los del prototipo (P) utilizando 10 etapas del generador de Marx.

También se muestran a modo de ejemplo, algunos de las formas de onda obtenidos tanto con el modelo teórico como con el prototipo.

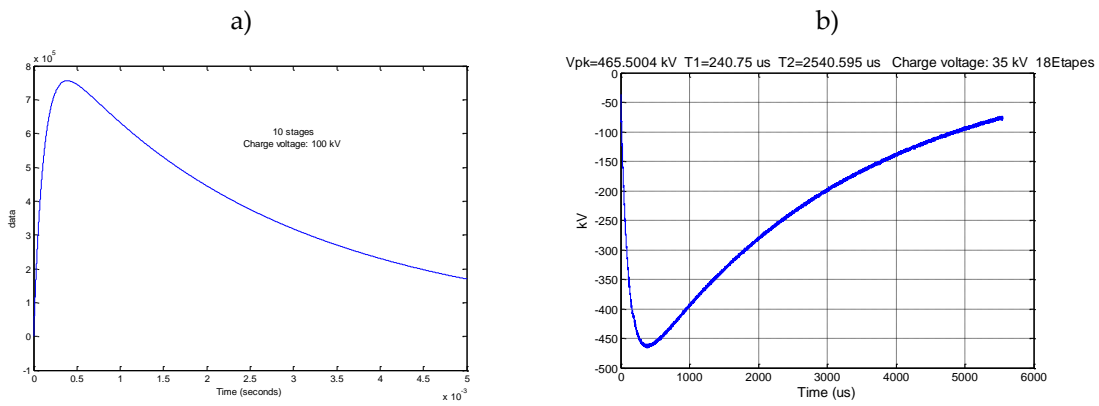


Figura 6-17.- a) Forma de onda obtenida con el modelo de Matlab con 10 etapas y una tensión de carga de 100 kV. b) Forma de onda obtenida con el generador real utilizando 18 etapas y una tensión de carga de 35 kV.

Por último, se muestra la imagen final del generador construido en el marco de este proyecto.



Figura 6-18.- Resultado final del generador de Marx modular fabricado.

6.3.4 Conclusiones

Como se ha podido observar, el generador final construido cumplió con las expectativas marcadas. El paso del modelo teórico y del dimensionado de los componentes al generador real, los ajustes del equipo y las formas de onda obtenidas pudieron validarse y comprobar que se ajustaban a los indicados en la norma.

6.4 Experimental determination of potential distribution on a CFRP laminate and thermal images of DC and impulse currents: evaluations of connections [10]

6.4.1 Introducción

En este trabajo se presentaban varios ensayos con el objetivo de analizar el comportamiento de los laminados de CFRP con electrodos superficiales. En esta ocasión los electrodos utilizados no cubren la totalidad del ancho de la probeta. Además, estos electrodos se disponen en diferentes configuraciones con el fin de ver como se distribuye la corriente para cada una de las situaciones planteadas. Como elemento adicional a la medida de potenciales superficiales se añaden imágenes termográficas que complementan dicho estudio.

6.4.2 Características de los ensayos

El primer ensayo partió de una probeta de mayores dimensiones a las utilizadas hasta el momento. También se utilizaron electrodos de diferente tamaño con el fin de ver como se distribuía la corriente por la superficie de la probeta al no cubrir todo su ancho.

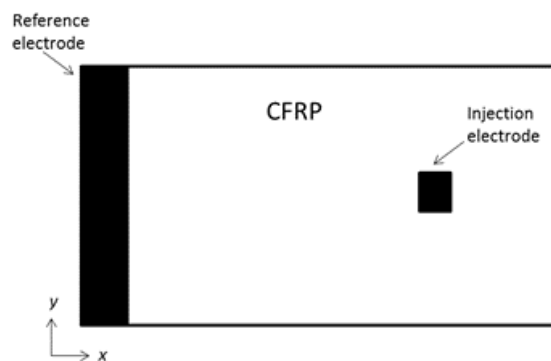


Figura 6-19.- Geometría de la probeta con la distribución de los electrodos sobre su superficie.

Sobre esta configuración se realizó la medida de potenciales superficiales en ambas caras, de forma similar al procedimiento mostrado en el Capítulo 5.

Luego se varió la posición de los electrodos, el tamaño de éstos y con termografía se observaba como se distribuía la corriente sobre la probetas, siendo la temperatura un reflejo de esta distribución de corriente.

Por último, se pudo aplicar un impulso de corriente de mayor amplitud sobre la probeta de la Figura 6-19, observando también su comportamiento térmico.

6.4.3 Resultados del estudio

En primer lugar se obtuvo la distribución de potenciales en ambas caras de la probeta así como la diferencia de potencial en ambas caras. Dado que la probeta utilizada era de características similares a la PMx utilizadas en otros ensayos, es decir, probetas fabricadas a partir de láminas de prepreg con un de espesor total de 3 mm, los resultados pueden ser comparados y validados. Si se pudo observar como sólo se producía variación de potencial en la zona correspondiente al electrodo de menor tamaño, por el que se inyectaba corriente.

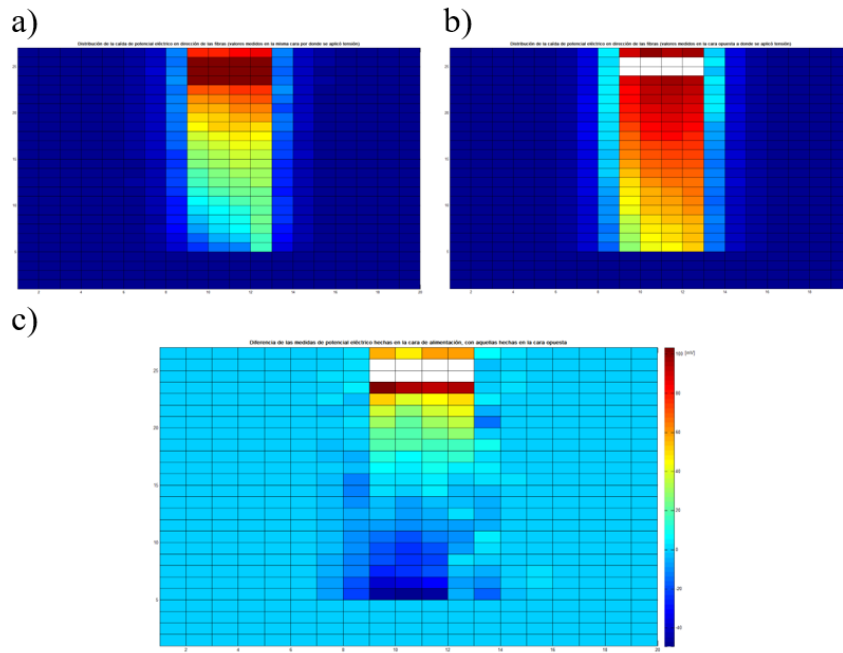


Figura 6-20.- a) potenciales medidos sobre la superficie donde se encontraban los electrodos. b) Potenciales medidos sobre la cara contraria a los electrodos. c) diferencia de potencial entre ambas caras.

Este comportamiento se pudo observar para todas las configuraciones de electrodos utilizadas y la imagen termográfica lo reflejaba de la misma forma.

- **Caso 1**

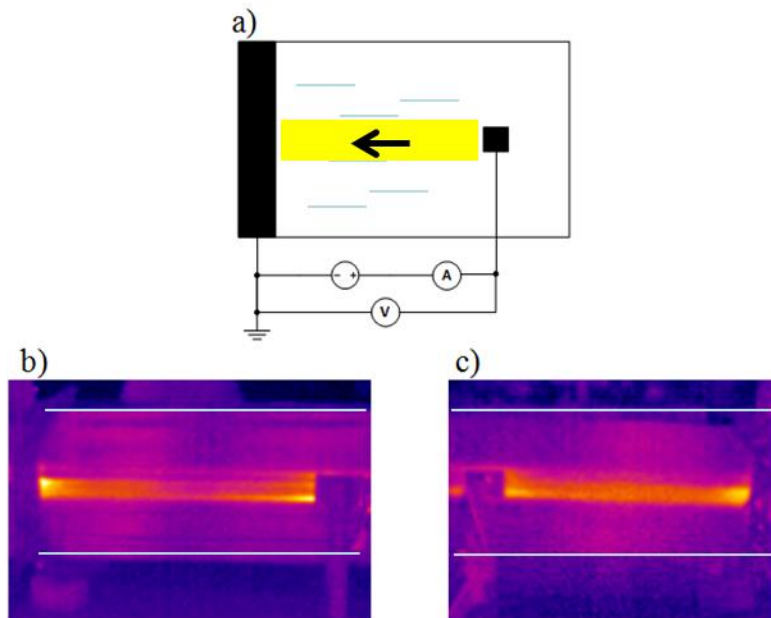


Figura 6-21.- a) Configuración del ensayo y disposición de los electrodos. b) Imagen termográfica de la cara de los electrodos. c) Imagen termográfica de la cara opuesta a los electrodos.

- **Caso 2**

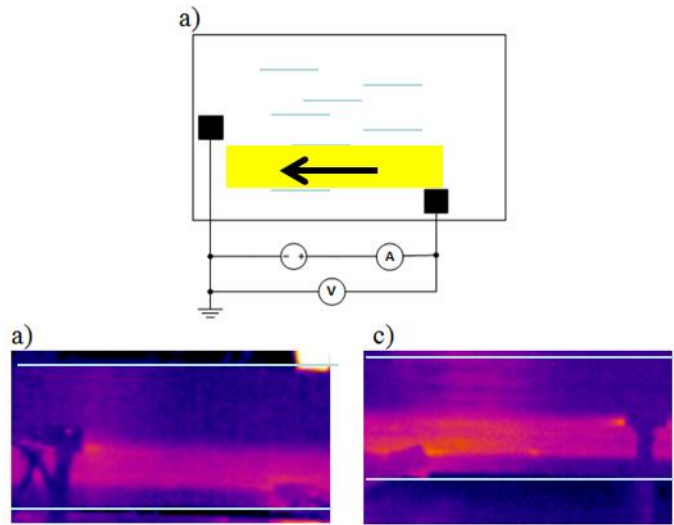


Figura 6-22.- a) Configuración del ensayo y disposición de los electrodos. b) Imagen termográfica de la cara de los electrodos. c) Imagen termográfica de la cara opuesta a los electrodos.

- **Caso 3**

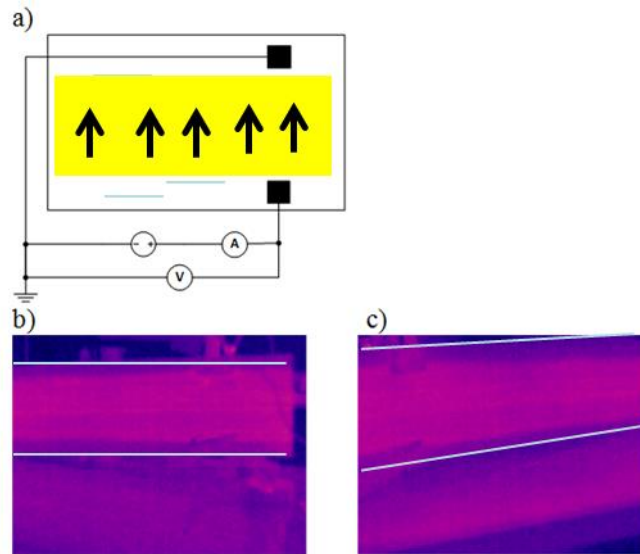


Figura 6-23.- a) Configuración del ensayo y disposición de los electrodos. b) Imagen termográfica de la cara de los electrodos. c) Imagen termográfica de la cara opuesta a los electrodos.

Para el ensayo del impulso de corriente se utilizó la misma probeta descrita anteriormente pero se colocó un electrodo de mayor tamaño para la inyección de corriente si que este cubriera todo el ancho de la probeta. El impulso de corriente aplicado tenía una forma de onda normaliza 8/20 μ s con un valor de pico de 23 kA. La imagen térmica obtenida justo después de aplicar el impulso muestra algunos aspectos relevantes.

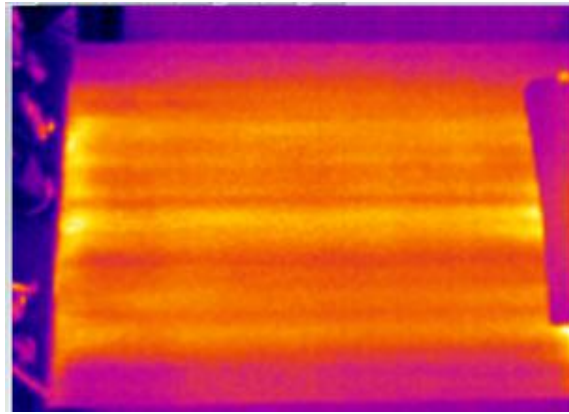


Figura 6-24.- Imagen termográfica de la superficie de la probeta donde se encuentran los electrodos justo después del impulso.

El primer aspecto que se observa de la imagen termográfica es que no toda la superficie delante del electrodo se encuentra a la misma temperatura. Esto denota que la distribución de la corriente no es uniforme seguramente debido a la calidad de la superficie de contacto. Cuanto mayor es el tamaño del contacto más dificultad existe para conseguir una superficie uniforme que garantice una distribución homogénea de la corriente. También se observa aumentos significativos de temperatura en los laterales del electrodo que no se observaban al aplicar corriente continua.

6.4.4 Conclusiones

Como conclusiones finales de este trabajo se puede decir que:

- Permitió validar aspectos trabajados en en Capítulo 3 donde se hacía referencia a la validez de utilizar modelos 2D para los compuestos de CFRP si los electrodos cubren la totalidad del ancho de la probeta. Aquí se puede observar como la dirección prioritaria, la de las fibras (X), determina claramente la circulación de corriente.
- Por otro lado se observa la gran utilidad que supone la termografía para poder observar el comportamiento de este tipo de materiales y complementar lo observado mediante la medida de potencias puntuales.
- Los asimetrías e imperfecciones observadas en los análisis están principalmente asociadas a las deficiencias en las superficies de contacto entre los electrodos y las probetas de CFRP. Se observa claramente como a medida que aumenta el tamaño de los electrodos de contacto, empeora la calidad de los mismos. La dificultad de realizar contactos de calidad se muestra como elemento relevante.

6.5 Investigation of potential distribution on a CFRP coupon under impulse current. Test results and FDTD simulation [11]

6.5.1 Introducción

Como se han visto en todo el trabajo experimental de esta tesis y en las publicaciones referentes a este ámbito, las conexiones entre el LPS y los laminados de CFRP juegan un papel crucial. Otro elemento destacable es la dificultad de realizar ensayos con WTB reales dado lo costoso de los mismos y de la imposibilidad de aplicar los valores máximos exigidos por la norma [3] para el nivel de protección LPL I. Todo conduce hacia la importancia de conseguir modelos más exactos y que reflejen de mejor manera la realidad de estos sistemas.

Este artículo surgió como fruto de los resultados experimentales realizados en el marco de esta tesis y en colaboración con el trabajo realizado J.A. Rey [12], que se encontraba inmerso en el modelado mediante FDTD de los compuestos de CFRP.

El objetivo de este trabajo era, en primer lugar, evaluar el comportamiento de un laminado de CFRP sobre el que se aplicaban impulsos de corriente con contactos superficiales. Los impulsos de corriente aplicados tenían diferentes tiempos de frente con el objetivo de ver si el material mostraba cierta linealidad. Los resultados obtenidos del estudio experimental sirvieron para profundizar en el modelado electromagnético y, en particular, en el modelado mediante la FDTD.

6.5.2 Características del ensayo

En esta ocasión, la información respecto de este ensayo ha sido explicada y detallada en el Capítulo 5 y corresponde con el Ensayo S7. Ahí se ha detallado la probeta utilizada, los tipos de impulso aplicados, las medidas realizadas y los resultados obtenidos. Un aspecto destacable es que, gracias al método de medida empleado, los resultados obtenidos no están influenciados por la resistencia de contacto entre los electrodos y la probeta, más allá de la calidad de los mismos que puedan crear una distribución no homogénea de la corriente.

Se realizó un modelo electromagnético basado en la FDTD que reproducía el ensayo experimental presentado previamente y sobre el que se aplicó un impulso de características similares. Estos datos sirvieron para realizar una comparación entre los datos experimentales y los del modelo.

6.5.3 Resultados del estudio

A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos de forma experimental y mediante el modelo con FDTD.

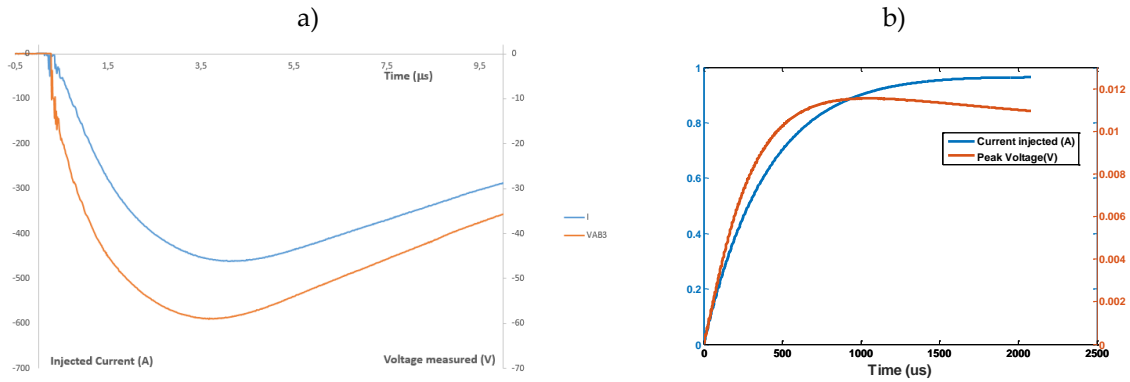


Figura 6-25.- Comparación de la corriente inyectada y del potencial medido en el mismo punto para: a) el ensayo experimental; b) para el modelo de FDTD.

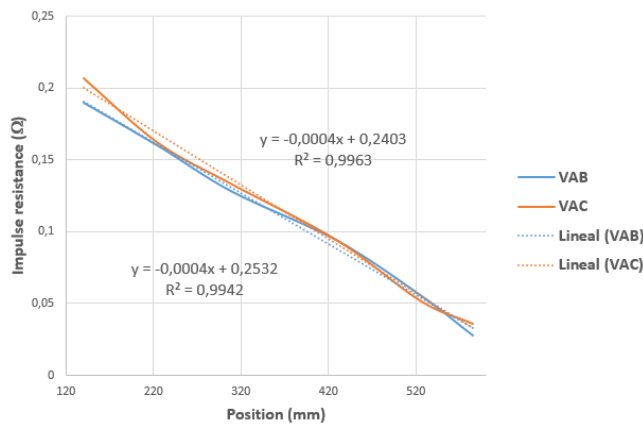


Figura 6-26.- Potenciales V_{ABX} y V_{ACX} a lo largo de la probeta para el impulso de corriente rápido obtenidos de forma experimental.

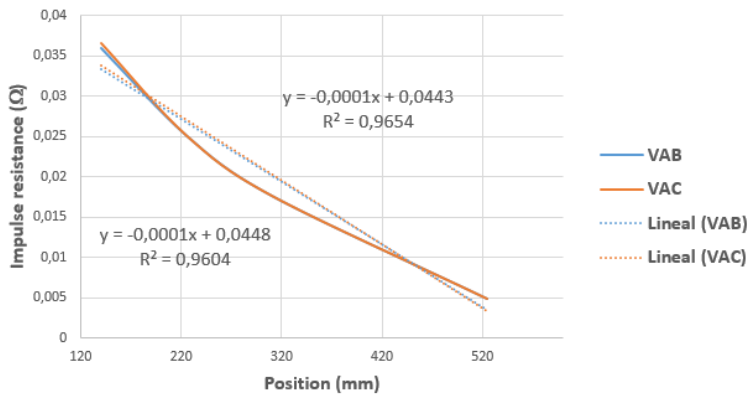


Figura 6-27.- Potenciales V_{ABX} y V_{ACX} a lo largo de la probeta para el impulso de corriente rápidos obtenidos mediante el modelo de FDTD.

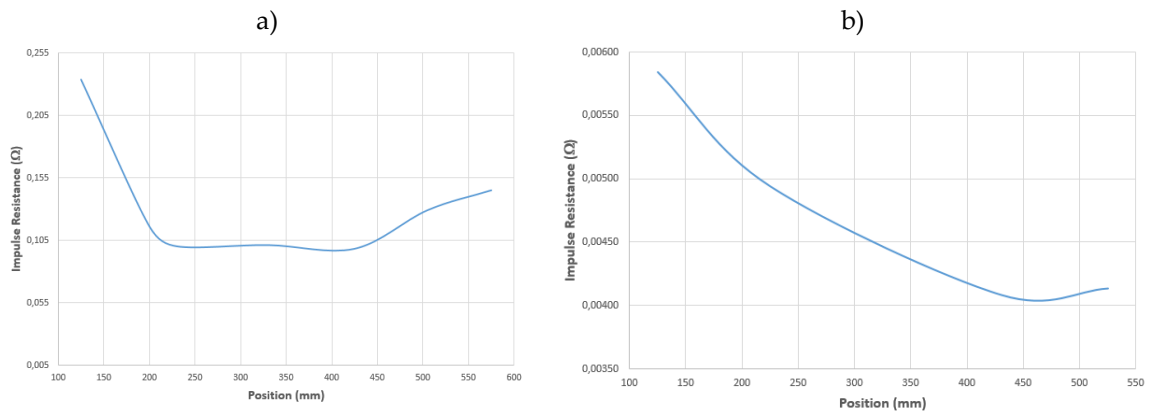


Figura 6-28.- Potenciales V_{AAX} a lo largo de la probeta para el impulso de corriente rápido obtenidos: a) de forma experimental; b) mediante el modelo de FDTD.

6.5.4 Conclusiones

La aportación de este trabajo fue la de poder aplicar impulsos de corriente con diferente frente de onda, uno más lento ($13 \mu s$) y otro más rápido ($3 \mu s$). De los resultados experimentales y los valores obtenidos mediante el modelo de FDTD podemos sacar las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se observa cierta simetría en las mediciones experimentales al separarse de la zona central donde se encuentra el electrodo de inyección de corriente.
- En las medidas experimentales se observa un incremento del desfase entre tensión e intensidad con el incremento del tiempo de frente del impulso. Por otro lado, el valor de la Z_P se mantiene prácticamente constante para ambos impulsos en la línea central de la probeta y muestra evoluciones similares en las zonas laterales a la inyección de corriente.
- Aunque existen ligeras diferencias para ambos tipos de impulso, en los resultados experimentales se observa mayor concentración de potencial entorno a los electrodos que en el centro de la probeta. Algo similar se observó al aplicar corriente continua en [10].
- Con respecto al modelo de FDTD, se observan ciertas similitudes con los datos experimentales. Un ejemplo de ello es el desfase entre tensión e intensidad para el impulso con el frente de onda más rápido, lo que hace indicar que no sólo depende del sistema de medida utilizado.
- El valor de Z_P a lo largo del eje de inyección de corriente muestra un comportamiento ligeramente diferente entre los resultados experimentales y los del modelo en FDTD. No se observa de forma tan clara la concentración de potencial entorno a los electrodos de inyección de corriente respecto a la zona central de la probeta.

6.6 Evaluation method and system form a lightning protection system of a wind turbine comprising a plurality of blades made of carbon fiber reinforced plastic or polymer [13]

6.6.1 Introducción

Como fruto de toda la experiencia adquirida a través de todos los ensayos y estudios realizados en el transcurso de esta tesis se ha podido concluir con la elaboración de la patente que aquí se presenta.

El objetivo de esta invención es proporcionar un método y un sistema de medida para la evaluación del LPS asociado con una WTB que incorpore compuestos de CFRP. Este método puede ser utilizada con cualquier WTB que se fabrique utilizando elementos y sistemas similares.

En base a todo el conocimiento previo adquirido se ha podido demostrar que cuanto mejor sea la conexión entre el electrodo de equipotencialización y el laminado de CFRP de la viga de la WTB, la distribución de la corriente será más uniforme. De esta manera, comparando las diferentes mediciones de tensión eléctrica en puntos de medida superficiales de la pala, se puede determinar la calidad de las conexiones entre los elementos del LPS.

Con el método de evaluación propuesto se puede validar así el estado de las conexiones entre la pala y las placas conductoras correspondientes, de una manera no invasiva y fácil de implementar utilizando equipos comunes en entornos productivos industriales. Además, el tiempo necesario para la realización de la comprobación es relativamente reducido, lo que no dificulta su introducción en el proceso productivo de una WTB.

6.6.2 Problemática planteada

Los aerogeneradores actuales pueden considerarse como estructuras elevadas donde, además, una gran parte de su estructura está en movimiento. A esta característica se suma que en muchos casos se hallan en localizaciones muy expuestas a impactos de rayos. Al ser estructuras elevadas (los aerogeneradores modernos pueden incluso superar los 200 m), pueden presentar un elevado número de rayos ascendentes (turbina-nube) iniciados por la su propia estructura. Este tipo de rayos suele caracterizarse por la presencia de componentes continuas y son los que más daños suelen ocasionar debido a su elevada energía.

Las grandes dimensiones de los aerogeneradores actuales han hecho que los fabricantes recurran al uso de CFRP como material en la fabricación de las palas. Debido a que el CFRP es conductor de la electricidad, es necesario tenerlo en cuenta a la hora del desarrollo del LPS.

6.6.3 Marco normativo

Tal y como se indica en la norma de protección contra el rayo de aerogeneradores (IEC61400-24), debido al carácter eléctrico del CFRP, las partes de la pala fabricadas en este material se recomiendan queden integradas con el LPS, normalmente junto con el bajante principal, ya que suelen estar en paralelo. Esta conexión entre ambas partes (Bajante – laminado de CFRP) genera que parte de la corriente derivada del impacto del rayo circule a través del CFRP. El aumento de la temperatura en

este tipo de materiales debido a la circulación de corriente, puede generar su delaminación y, por tanto, daños estructurales que podría derivar en la rotura de la pala.

6.6.4 Conocimiento adquirido

La conexión equipotencial entre el bajante y el spar cap de CFRP es el punto más crítico. La dificultad se debe a la dificultad de crear un buen contacto entre ambas superficies, garantizando así una buena distribución de la corriente. Aunque existen diferentes soluciones, la conexión entre ambas superficies se realiza por presión y en ocasiones, durante el proceso de fabricación, resulta difícil garantizar un buen contacto debido a las imperfecciones de los materiales y de las impurezas del entorno donde se realiza esta tarea.

La calidad de esta conexión eléctrica garantiza, en parte, el buen funcionamiento de LPS, evitando el aumento de la densidad de corriente en zonas puntuales del contacto entre ambas superficies y la aparición de arcos eléctricos que dañarían la estructura de CFRP, con la consecuente reducción de su vida útil.

Por tanto, la calidad de esta conexión es crítica y poder garantizar que se realiza de forma correcta mejorará de forma significativa el buen funcionamiento del conjunto.

6.6.5 Descripción de la invención

La invención corresponde a un sistema capaz de validar el estado de la conexión entre el LPS y la estructura de CFRP con un sistema poco invasivo, fácil de implementar y utilizando equipos comunes en entornos productivos industriales. Además, el tiempo necesario para la realización de la comprobación es corta, lo que no dificulta su introducción en el proceso productivo de una WTB.

El sistema se basa en un sistema de inyección de corriente controlada a través de la conexión entre el bajante y la estructura de CFRP. La corriente inyectada sobre el contacto debe ser de un valor adecuado (1 – 5 A/m²) para poder medir su efecto sin generar un calentamiento excesivo sobre el material compuesto de CFRP, que pudiese deteriorarlo. Por otro lado, el sistema dispone de un sistema digitalizador que de manera superficial evalúa como se distribuye la corriente inyectada a través de la estructura de CFRP. El análisis de la información digitalizada permite evaluar la calidad de la conexión y si esta se ha realizado correctamente o no.

Si la conexión implementada es buena, la distribución de potencial eléctrico sobre el spar cap de CFRP será uniforme. Si, por el contrario, la conexión implementada no es de calidad la distribución de potencial eléctrico sobre la superficie de la estructura de CFRP se verá alterada.

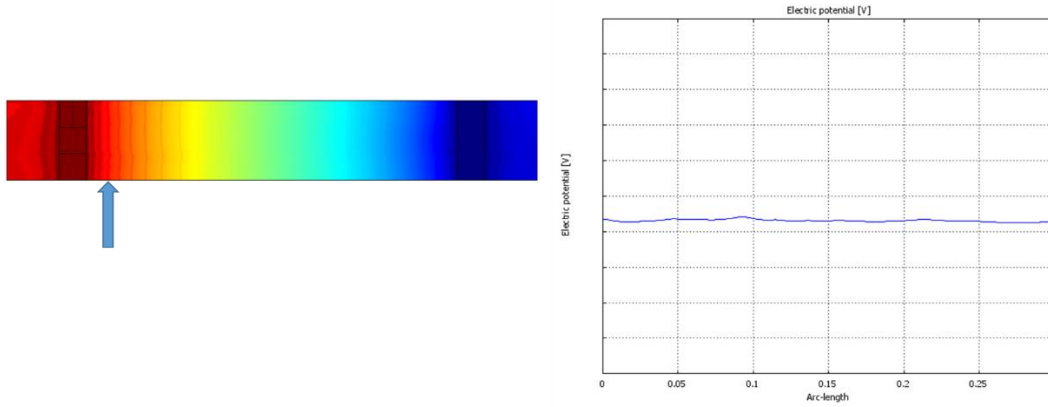


Figura 6-29.- Simulación de la distribución de potenciales sobre la superficie del spar cap de CFRP cuando la conexión equipotencial es buena.

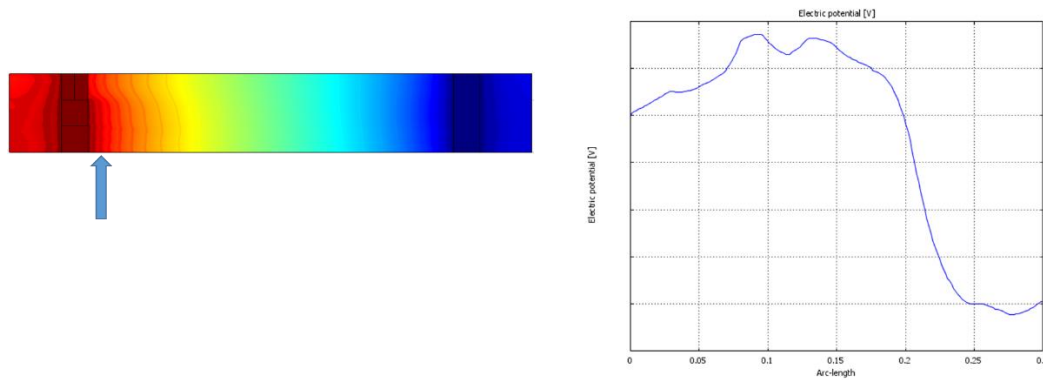


Figura 6-30.- Simulación de la distribución de potenciales sobre la superficie del spar cap de CFRP cuando la conexión equipotencial de es de buena calidad.

El apoyo de imágenes termográficas puede complementar el sistema de evaluación de la calidad de la conexión equipotencial.

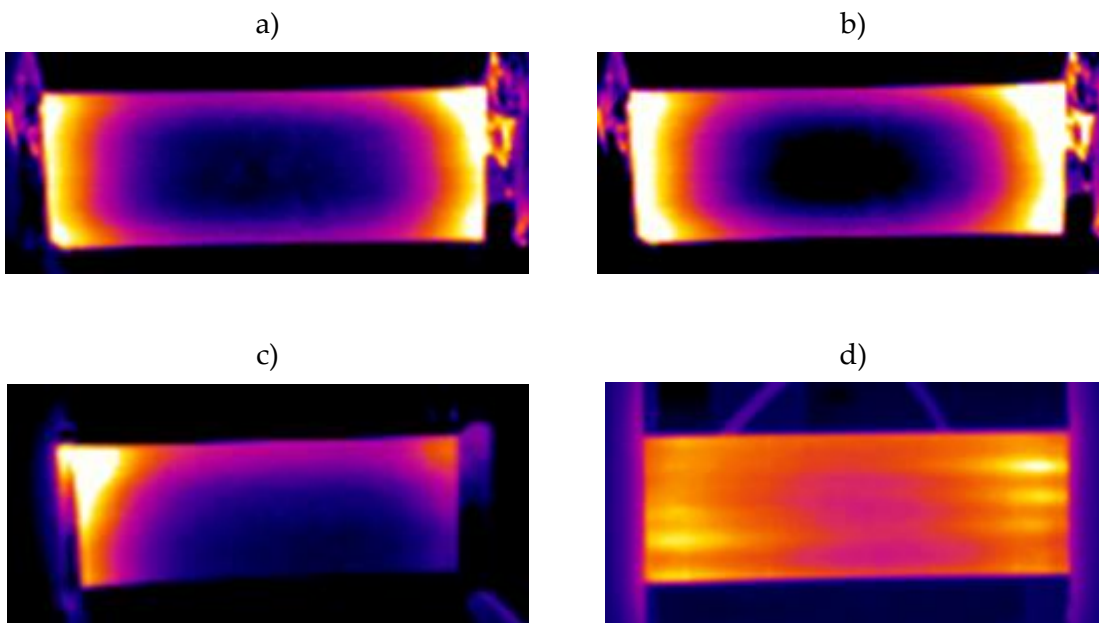


Figura 6-31.- Ejemplos de imágenes termográficas medidas sobre laminados de CFRP sometidos a corriente. a) y b) corresponde con distribuciones homogéneas y por tanto a conexiones correctas. c) y d) corresponde a diferentes tipos de defecto en la realización de las conexiones equipotenciales.

6.6.6 Esquema del sistema motivo de la patente

A continuación, se muestra el esquema conceptual del sistema que permite verificar la calidad de las conexiones equipotenciales.

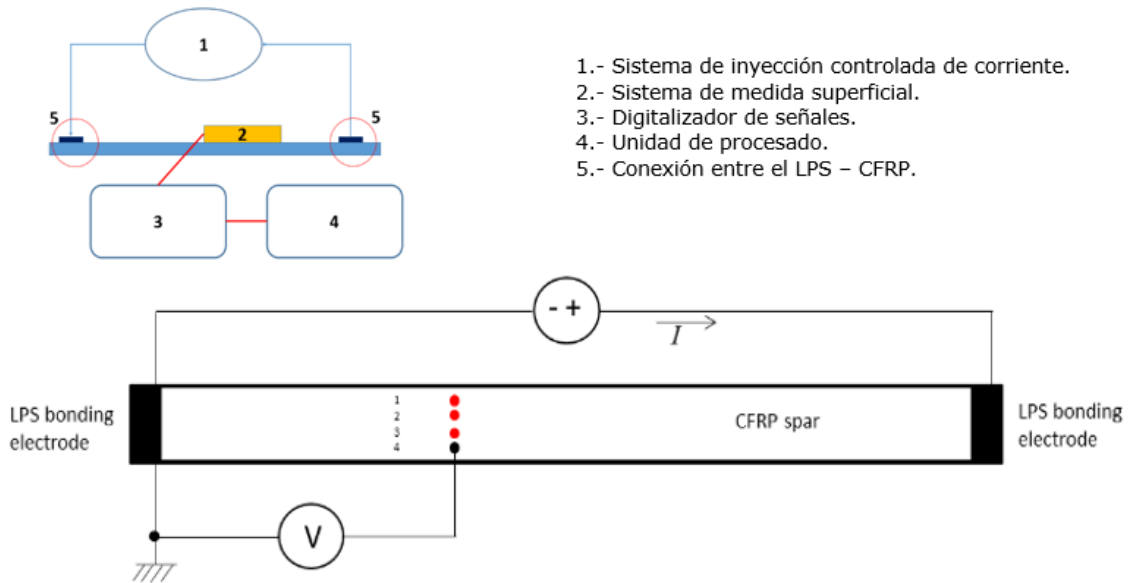


Figura 6-32.- Esquema y metodología de medida para la validación de la calidad de las conexiones.

Por tanto, a partir de un patrón de medida determinado como correcto, podremos validar las conexiones equipotenciales realizadas sobre el spar cap de CFRP. De la misma forma, cualquier defecto en el proceso de fabricación sería observado de forma sencilla, ya que no daría un patrón uniforme de comportamiento.

6.6.7 Comentarios adicionales

Esta patente americana tiene su equivalente europea.

Título: Método y sistema de evaluación de un sistema pararrayos de un aerogenerador que comprende una pluralidad de palas fabricadas con un plástico o polímero reforzado con fibra de carbono.

Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.09.2019** **EP 3396157**

6.7 Bibliografía

- [1] J. Montanyà *et al.*, “Fast current impulse test for wind turbine blades,” *EUROEM*, 2008.
- [2] D. Romero, J. Montanyà, and J. Vinck, “Test and simulation of lightning current distribution on a wind turbine blade,” 2014, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973406.
- [3] “UNE-EN IEC61400-24:2019 - Aerogeneradores. Parte 24: Protección contra el rayo.,” 2020.
- [4] F. A. Fisher, J. A. Plumer, and R. A. Perala, *Lightning Protection of Aircraft*. Lightning Technologies Inc., 2004.
- [5] M. Ianoz and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*. Wiley Interscience, 1997.
- [6] Altair, “Software Feko,” 2021. <https://www.altair.com/es/feko-applications> (accessed Feb. 03, 2021).
- [7] “UNE-EN IEC60060-1:2012 - Técnicas de ensayo de alta tensión. Parte 1: Definiciones generales y requisitos de ensayo,” 2012.
- [8] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering Fundamentals (Second Edition)*, Second Edi. Oxford: Newnes, 2000.
- [9] B. Filipović-Grčić, D. Filipović-Grčić, and P. Gabrić, “Estimation of load capacitance and stray inductance in lightning impulse voltage test circuits,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 439–446, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.11.007>.
- [10] J. Montanyà, D. Romero, R. López, and G. Tobella, “Experimental determination of potential distribution on a CFRP laminate and thermal images of DC and impulse currents: evaluation of connections,” 2015, doi: APL-2015.
- [11] D. Romero, J. A. Rey, J. Montanya, R. Horta, and G. Tobella, “Investigation of potential distribution on a CFRP coupon under impulse current. Test results and FDTD simulation,” 2016, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791453.
- [12] J. A. Rey, “Aportación al análisis de la distribución de corriente del rayo en palas de aerogenerador equipadas con fibra de carbono,” UPC, 2021.
- [13] V. March, D. Romero-Duran, R. Horta, and J. Montanyà, “Evaluation method and system for a lightning protection system of a wind turbine comprising a plurality of blades made of carbon fiber reinforced plastic or polymer,” US 10620255 B2, 2020.

7 Conclusiones y trabajos futuros

Para finalizar esta tesis, en este capítulo se van a resumir las conclusiones más relevantes extraídas del presente trabajo y lo que se consideran las principales aportaciones del mismo. A continuación, se indicarán algunas ideas de futuro para mostrar hacia donde podría evolucionar el trabajo aquí iniciado.

7.1 Conclusiones

Gracias a todo el conocimiento previo adquirido en el campo experimental de la protección contra el rayo y de forma particular en la evaluación de los sistemas LPS de una WTB con compuestos de CFRP, se pone de manifiesto la importancia que tienen dos elementos que resultan clave para el funcionamiento del conjunto y para su modelado. Estos son:

- Por un lado, el tipo de material compuesto utilizado en la estructura de la WTB. No sólo el tipo de material (prepreg o pultruido) sino como se apila, como se manipula, como se pule, etc., para conseguir la estructura final de material compuesto.
- Y por otro, la conexión equipotencial entre la estructura de material compuesto de CFRP y el bajante del LPS. En esto también juega un papel importante como se ha preparado la superficie del material compuesto y de cómo se realizan estas conexiones, dado que no existe una única manera de hacerlo.

Por otro lado, después del profundo estudio de los datos disponibles en la bibliografía sobre materiales compuestos de CFRP se ha podido ver que éstos no son extrapolables a nuestro estudio. Ello se debe a que se dispone de materiales con características diferentes a los utilizados en estas otras publicaciones y algunas metodologías utilizadas en los ensayos no se encuentran suficientemente bien detalladas o los procedimientos utilizados no se comparten. Por último, para obtener resultados más definitivos se debería de disponer de un mayor número de probetas de material compuesto de CFRP con diferentes dimensiones, ya que el material estudiado es poco homogéneo y tiene una gran dificultad de manipulación. Así que para realizar un análisis estadístico correcto se debería trabajar con una muestra mayor.

Es por lo anteriormente comentando que las principales aportaciones que se pueden extraer de esta tesis son:

- El establecimiento de un procedimiento claro para la caracterización de estos materiales y para que los resultados obtenidos sean comparables entre ensayos. Para poder asumir la homogeneización de los materiales compuestos de CFRP y poder representarlos mediante un tensor ortotrópico de resistividades, se requiere una distribución homogénea de la corriente por todo el material y para que ello sea posible, la calidad de las conexiones se convierte en algo fundamental. Aquí se han podido presentar diferentes ensayos donde se pone de manifiesto esto y se justifica cual es la mejor manera de proceder para que los resultados obtenidos reflejen de mejor manera la realidad del material o que permitan identificar anomalías en dichas conexiones. Todo este análisis, apoyado por instrumentos de termografía, ha permitido desarrollar una patente que establece una metodología para evaluar la calidad de las conexiones durante el proceso de fabricación de una WTB
- Se ha podido validar el comportamiento lineal de este tipo de materiales compuestos en función del valor de corriente continua aplicado hasta alcanzar el punto térmico donde la resina utilizada en la estructura del material compuesto empezar a modificar su comportamiento. Por tanto, este valor de temperatura se convierte en un dato fundamental para conocer el límite de material y a partir de donde empieza su deterioro. También se ha podido observar esta linealidad al aplicar impulsos de corriente, si bien los valores varían ligeramente a medida que el frente de onda es más rápido.
- También se han podido obtener datos cualitativos en cuanto a la diferencia de comportamiento entre materiales compuestos de CFRP obtenidos a partir de láminas de prepreg y los obtenidos por pultrusión. En especial en la dirección perpendicular a las fibras (Z), donde el valor de la resistividad crece a medida que aumenta el número de láminas de prepreg, y para igual espesor total, como el laminado de pultruido tiene una menor resistividad en Z que el fabricado con prepreg.
Los métodos de fabricación de una WTB varían significativamente en función del material base de CFRP utilizado y esto puede hacer que un fabricante se decante por uno o por otro. Pero, si se mira desde el punto de vista de su comportamiento frente a corrientes de rayo, esta característica hace pensar que utilizar material pultruido tiene ventajas bajo estas condiciones de trabajo. Evidentemente, esto es así se la conexión equipotencial se realiza de forma superficial. Si la corriente se inyecta en la dirección de las fibras (X), para una misma densidad de fibras en el material compuesto, la diferencia no es tan significativa.
- Otra aportación relevante y que queda constatada con los resultados de los ensayos, es la mayor dificultad que tiene el realizar las conexiones con el material compuesto de CFRP en la dirección de las fibras (X). El conseguir un acabado superficial de calidad para garantizar que el electrodo de contacto interacciona con el mayor número de fibras posibles se convierte en una tarea compleja. Se ha observado que mediante la aplicación de pintura de plata se

mejora significativamente, siempre y cuando la preparación de la superficie y la aplicación de la pintura se haga correctamente. Esto puede resultar útil para obtener y conocer el valor real de la resistividad del material, ya que se consigue una mejor homogeneización de la corriente, no es viable su aplicación desde el punto de vista económico en el proceso industrial para la fabricación de una WTB.

- Desde el punto de vista del comportamiento del material cuando se realizan las conexiones superficiales, las aportaciones de este trabajo permiten observar como existe un espesor efectivo en este tipo de materiales y que va estrechamente ligado al valor de la resistividad del material en la dirección perpendicular a las fibras (Z). También influye en el espesor efectivo, la longitud de la probeta. Por tanto, dependiendo del espesor, de la separación entre conexiones y del tipo de material empleado, la estrategia seguida a la hora de realizar las conexiones equipotenciales puede aportar mejoras significativas.
- Por último, se ha podido observar el comportamiento del material bajo impulsos de corriente de diferente tiempo de frente. En este sentido, la aportación de este trabajo es que el material tiene un comportamiento claramente más resistivo que el de los materiales metálicos utilizados para los bajantes del LPS. Esto condiciona claramente cómo se distribuye la corriente del rayo ente el bajante y los laminados de CFRP presentes en la viga de la WTB. También se ha podido mostrar que según la estrategia de conexiones utilizadas y el tipo de compuesto de CFRP utilizado, se podría llegar a modular esta distribución de corriente. También se ha podido mostrar como el tiempo de frete del impulso de corriente condiciona el espesor efectivo de conducción del material compuesto cuando incorpora conexiones superficiales. Por tanto, a la hora de modelar el material, este efecto pelicular debe ser tenido en cuenta.

7.2 Trabajos futuros

Si bien algunas de las aportaciones de este trabajo deberían refrendadas con más ensayos, sí que el comportamiento observado de este tipo de materiales bajo determinadas condiciones de trabajo permite mostrar qué camino seguir en el futuro para mejorar la integración de los compuestos de CFRP en la fabricación de las WTB y su protección frente a las descargas atmosféricas. el LPS.

Parte de este trabajo sólo es posible si se hace de la mano de fabricantes de compuestos de CFRP y de fabricantes de WTB.

En este sentido, los trabajos futuros en este campo deberían ir orientados a:

- Profundizar en el proceso óptimo de preparación de las superficies de los materiales compuestos de CFRP para garantizar que las conexiones equipotenciales sean de la máxima calidad y sean extrapolables a procesos productivos y no sólo a nivel de laboratorio.

- La realización de cualquier modelo de una WTB que refleje su comportamiento real debe ir acompañado de un estudio detallado del material específico utilizado, de la estructura del laminado completo y del tipo de conexiones utilizadas. Aquí se ha mostrado el camino de cómo hacerlo y de que aspectos son relevantes, pero deben ser validados sobre un sistema real.
- Los procedimientos experimentales mostrados en esta tesis, junto a la técnica de modelado por FDTD presentada por otro compañero del grupo de investigación, deben unirse para crear modelos de mayor calidad. La incorporación del comportamiento térmico a estos modelos es otro aspecto que sería interesante seguir desarrollando con el fin de reflejar que corrientes de rayo podría llegar a dañar la estructura del laminado de CFRP.

Anexos

A.1 Tablas de valores obtenidos del ensayo del apartado 4.2 de la memoria

Estudio de la evolución de la Resistencia total de la probeta modificando la presión de los contactos mediante pesos.

- a) Valores obtenidos colocando los contactos y los pesos en ambas caras de la probeta.

	Cara A			Cara B		
	V (V)	I (A)	Z (Ω)	V (V)	I (A)	Z (Ω)
1 peso	25,70	10,00	2,57	23,20	9,72	2,39
2 pesos	19,20	9,92	1,94	17,12	9,80	1,75
3 pesos	16,80	9,98	1,68	14,55	9,95	1,46
4 pesos	14,92	9,90	1,51	12,78	9,91	1,29
5 pesos	13,27	9,92	1,34	11,88	9,96	1,19
6 pesos	12,80	9,81	1,30	11,25	9,94	1,13

Valores promedio de los resultados anteriores:

Promedios	Z (Ω)
1 peso	2,48
2 pesos	1,84
3 pesos	1,57
4 pesos	1,40
5 pesos	1,27
6 pesos	1,22

- b) Valores obtenidos modificando la presión de los contactos mediante una llave dinamométrica.

Par Apriete (Nm)	RT (Ω)
2	260,7
2,5	206,1
3	168,3
3,5	147,4
4	134,2
4,5	132,3
5	130,8
5,5	129,6
6	128,9

A.2 Tablas de valores obtenidos del ensayo del apartado 4.3 de la memoria

En este caso los datos que se muestran a continuación corresponden al estudio sobre la dependencia de la resistividad del material con respecto a la corriente que circula por ella.

a) Valores de la medida en dirección X

- 1ª conexión de la probeta de 5 mm con corriente creciente y decreciente.

R _{Ic}			R _{Id}		
V(mV)	I(A)	R(mΩ)	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
14,56	0,151	96,42	15,95	0,168	94,97
34,41	0,358	96,11	25,83	0,272	94,95
44,21	0,461	95,89	45,47	0,479	94,92
60,30	0,634	95,11	61,76	0,651	94,87
70,65	0,747	94,58	80,75	0,851	94,89
90,12	0,957	94,17	100,17	1,056	94,86
108,72	1,154	94,21	145,83	1,538	94,82
154,28	1,638	94,19	191,81	2,024	94,77
189,67	2,015	94,13	237,11	2,503	94,73
235,59	2,501	94,20	285,87	3,019	94,69
293,81	3,121	94,14	331,56	3,503	94,65
329,71	3,502	94,15	386,01	4,08	94,61
384,30	4,08	94,19	441,69	4,67	94,58
420,90	4,47	94,16	478,27	5,06	94,52
475,41	5,05	94,14			

- 2ª conexión de la probeta de 5 mm con corriente decreciente.

R _{Id'}		
V(mV)	I(A)	R(mΩ)
11,42	0,168	67,97
18,48	0,272	67,95
32,53	0,479	67,91
44,22	0,651	67,93
57,77	0,851	67,89
71,66	1,056	67,86
104,31	1,538	67,82
137,17	2,024	67,77
169,50	2,503	67,72
204,36	3,019	67,69
236,91	3,503	67,63
276,01	4,08	67,65
315,60	4,67	67,58
341,65	5,06	67,52

- 1ª conexión de la probeta de 3 mm con corriente decreciente.

R_Id		
V(V)	I(A)	R(Ω)
0,862	5,56	0,155
0,785	5,09	0,154
0,706	4,57	0,154
0,605	3,871	0,156
0,532	3,425	0,155
0,477	3,072	0,155
0,381	2,459	0,155
0,318	2,029	0,157
0,267	1,715	0,156
0,147	0,941	0,156
0,082	0,532	0,154

- 2ª conexión de la probeta de 3 mm con corriente decreciente.

R_Id'		
V(V)	I(A)	R(Ω)
0,829	5,49	0,151
0,766	5,05	0,152
0,716	4,74	0,151
0,637	4,233	0,150
0,574	3,795	0,151
0,521	3,428	0,152
0,460	3,037	0,151
0,349	2,293	0,152
0,266	1,748	0,152
0,142	0,932	0,152
0,095	0,621	0,153

- 1ª conexión de la probeta de 1,5 mm con corriente decreciente.

R_Id		
V(V)	I(A)	R(Ω)
0,718	5,47	0,131
0,663	5,06	0,131
0,611	4,69	0,130
0,508	3,853	0,132
0,39	2,997	0,130
0,306	2,322	0,132
0,249	1,891	0,132
0,191	1,448	0,132
0,129	0,982	0,131
0,066	0,5	0,132

- 2ª conexión de la probeta de 1,5 mm con corriente decreciente.

R_{Id'}		
V(V)	I(A)	R(Ω)
0,829	5,58	0,149
0,754	5,05	0,149
0,719	4,85	0,148
0,624	4,19	0,149
0,526	3,475	0,151
0,443	2,923	0,152
0,381	2,513	0,152
0,345	2,274	0,152
0,266	1,75	0,152
0,155	1,033	0,150

b) Valores de la medida en dirección Y

- 1ª conexión de la Probeta 1, de 5 mm, con corriente creciente.

R_{lc}		
V(V)	I(A)	R(Ω)
21	1,764	11,905
13,07	1,596	8,189
11,298	1,411	8,007
9,648	1,225	7,876
7,982	1,015	7,864
6,343	0,804	7,889
4,654	0,591	7,875
2,801	0,356	7,868

- 1ª conexión de la Probeta 2, de 5 mm, con corriente decreciente.

R_{ld}		
V(V)	I(A)	R(Ω)
14,062	1,649	8,512
12,155	1,429	8,506
10,380	1,220	8,508
8,583	1,002	8,566
6,822	0,798	8,549
5,005	0,585	8,556
3,012	0,351	8,580

- 2ª conexión de la Probeta 2, de 5 mm, con corriente decreciente.

R_{ld'}		
V(V)	I(A)	R(Ω)
14,012	1,659	8,446
12,164	1,439	8,453
10,420	1,232	8,458
8,619	1,018	8,467
6,791	0,802	8,468
4,988	0,588	8,483
3,010	0,355	8,479

- 1ª conexión de la probeta de 3 mm con corriente decreciente.

R_Id		
V(V)	I(A)	R(Ω)
22,718	1,538	14,771
19,815	1,34	14,787
17,339	1,168	14,845
15,122	1,020	14,825
13,147	0,887	14,822
11,402	0,769	14,827
9,700	0,652	14,877
8,060	0,541	14,898
6,354	0,426	14,915

- 2ª conexión de la probeta de 3 mm con corriente decreciente.

R_Id'		
V(V)	I(A)	R(Ω)
22,735	1,557	14,602
19,813	1,356	14,611
17,266	1,182	14,607
15,093	1,028	14,682
13,145	0,896	14,671
11,378	0,777	14,644
9,680	0,661	14,644
8,048	0,549	14,659
6,346	0,431	14,724

- 1ª conexión de la probeta de 1,5 mm con corriente decreciente.

R_Id		
V(V)	I(A)	R(Ω)
22,714	1,363	16,665
19,796	1,189	16,649
17,324	1,036	16,722
15,103	0,904	16,707
13,141	0,786	16,719
11,377	0,680	16,731
9,715	0,579	16,779
8,059	0,48	16,790
6,375	0,379	16,821
4,658	0,276	16,877

- 2ª conexión de la probeta de 1,5 mm con corriente decreciente.

R_{ld'}		
V(V)	I(A)	R(Ω)
22,706	1,391	16,324
19,862	1,216	16,334
17,327	1,059	16,362
15,081	0,923	16,339
13,104	0,800	16,380
11,383	0,694	16,402
9,698	0,591	16,409
8,039	0,490	16,406
6,351	0,386	16,453
4,680	0,284	16,479

c) Valores de la medida en dirección Z

- 1ª conexión de la probeta de 5 mm con corriente creciente y decreciente.

R_Id			R_Ic		
V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
5,044	5,29	0,953	4,885	5,2	0,939
4,817	5,09	0,946	4,681	4,96	0,944
4,566	4,85	0,941	4,29	4,53	0,947
4,295	4,59	0,936	4,016	4,23	0,949
4,005	4,28	0,936	3,77	3,95	0,954
3,547	3,78	0,938	3,463	3,578	0,968
3,264	3,48	0,938	3,058	3,127	0,978
2,879	3,066	0,939	2,458	2,496	0,985
2,568	2,74	0,937	1,696	1,707	0,994
1,946	2,077	0,937	1,2	1,205	0,996
1,307	1,393	0,938	0,875	0,876	0,999
0,638	0,676	0,944	0,553	0,554	0,998
0,111	0,117	0,949	0,239	0,238	1,004

- 2ª conexión de la probeta de 5 mm con corriente decreciente.

R_Id'		
V(V)	I(A)	R(Ω)
4,891	5,18	0,944
4,557	4,87	0,936
4,251	4,55	0,934
3,953	4,24	0,932
3,564	3,777	0,944
3,063	3,281	0,934
2,791	2,987	0,934
2,446	2,621	0,933
2,086	2,232	0,935
1,787	1,915	0,933
1,384	1,477	0,937
0,804	0,856	0,939
0,321	0,34	0,944

- 1ª conexión de la probeta de 3 mm con corriente decreciente.

R_Id		
V(V)	I(A)	R(Ω)
2,96	5,59	0,530
2,665	5,01	0,532
2,38	4,47	0,532
2,133	3,998	0,534
1,793	3,368	0,532
1,437	2,697	0,533
1,17	2,192	0,534
0,825	1,548	0,533
0,543	1,016	0,534
0,291	0,543	0,536
0,179	0,333	0,538

- 2ª conexión de la probeta de 3 mm con corriente decreciente.

R_Id'		
V(V)	I(A)	R(Ω)
2,955	5,31	0,556
2,688	4,88	0,551
2,486	4,55	0,546
2,146	3,922	0,547
1,808	3,308	0,547
1,476	2,704	0,546
1,199	2,192	0,547
0,838	1,529	0,548
0,631	1,151	0,548
0,303	0,551	0,550
0,186	0,338	0,550

- 1ª conexión de la probeta de 1,5 mm con corriente decreciente.

R_Id		
V(V)	I(A)	R(Ω)
1,543	6,18	0,250
1,456	5,88	0,248
1,311	5,36	0,245
1,183	4,87	0,243
1,071	4,45	0,241
0,938	3,892	0,241
0,837	3,476	0,241
0,691	2,873	0,241
0,563	2,345	0,240
0,388	1,608	0,241
0,189	0,784	0,241
0,081	0,336	0,241

- 2ª conexión de la probeta de 1,5 mm con corriente decreciente.

R_Id'		
V(V)	I(A)	R(Ω)
1,531	6,23	0,246
1,410	5,78	0,244
1,341	5,57	0,241
1,241	5,18	0,240
1,095	4,61	0,238
0,995	4,19	0,237
0,895	3,74	0,239
0,771	3,23	0,239
0,632	2,64	0,240
0,503	2,10	0,240
0,317	1,32	0,240
0,191	0,80	0,240

A.3 Tablas de valores obtenidos de los ensayos por el método de los 2 puntos (apartado 4.4 de la memoria)

Sobre cada probeta y en cada dirección, se toman 3 valores en diferentes puntos. La tabla que se muestra a continuación indica los valores medios de cada probeta en cada dirección.

- Probetas de material prepreg

Probeta Gruesa	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)
PG1	0,1005	0,0334	0,0039
PG2	0,1013	0,0360	0,0038
PG3	0,0998	0,0366	0,0041
PG4	0,0943	0,0348	0,0044
PG5	0,0988	0,0348	0,0044

Probeta Media	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)
PM1	0,1000	0,0360	0,0024
PM2	0,0984	0,0354	0,0025
PM3	0,1005	0,0357	0,0024
PM4	0,0998	0,0348	0,0025
PM5	0,0955	0,0348	0,0026

Probeta Fina	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)
PF1	0,1005	0,0330	0,0013
PF2	0,0981	0,0342	0,0014
PF3	0,1027	0,0342	0,0013
PF4	0,0949	0,0350	0,0014
PF5	0,1002	0,0350	0,0014

- Probeta de material pultruido

Probeta Fina	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)
PP	0,099	0,0394	0,0039

Valores obtenidos para las probetas anteriores siguiendo método de los 2 puntos.

a) Dirección de las fibras (X).

	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Gruesa	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PG1	0,132	0,958	0,138	0,196	0,68	0,288
PG2	0,151	1,147	0,132	0,178	0,748	0,238
PG3	0,138	1,335	0,103	0,190	0,763	0,249
PG4	0,176	0,919	0,192	0,187	0,852	0,219
PG5	0,161	0,942	0,171	0,185	0,852	0,217
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Media	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PM1	0,195	0,714	0,273	0,205	0,593	0,346
PM2	0,188	0,866	0,217	0,195	0,753	0,259
PM3	0,186	0,870	0,214	0,192	0,758	0,253
PM4	0,169	0,790	0,214	0,190	0,785	0,242
PM5	0,141	0,943	0,150	0,180	0,882	0,204
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Fina	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PF1	0,186	0,754	0,247	0,173	0,933	0,185
PF2	0,187	0,807	0,232	0,197	0,735	0,268
PF3	0,183	0,803	0,228	0,175	0,913	0,192
PF4	0,190	0,737	0,258	0,195	0,552	0,353
PF5	0,180	0,796	0,226	0,163	0,984	0,166
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Fina	V(mV)	I(A)	R(mΩ)	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
PP	55,82	1,135	49,18	57,34	1,142	50,21

b) Dirección transversal a las fibras (Y).

	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Gruesa	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PG1	8,310	1,158	7,176	8,320	1,185	7,021
PG2	8,234	1,213	6,788	8,198	1,175	6,977
PG3	8,270	1,087	7,608	8,324	1,174	7,090
PG4	8,360	0,924	9,048	8,381	0,933	8,983
PG5	8,379	0,886	9,457	8,371	1,006	8,321
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Media	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PM1	8,377	0,502	16,687	8,398	0,549	15,297
PM2	8,381	0,582	14,400	8,405	0,531	15,829
PM3	8,380	0,612	13,693	8,395	0,645	13,016
PM4	8,408	0,810	10,380	8,410	0,553	15,208
PM5	8,409	0,519	16,202	8,412	0,535	15,723
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Fina	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PF1	8,382	0,528	15,875	8,400	0,525	16,000
PF2	8,400	0,470	17,872	8,410	0,475	17,705
PF3	8,382	0,490	17,106	8,408	0,502	16,749
PF4	8,414	0,456	18,452	8,415	0,453	18,576
PF5	8,414	0,502	16,761	8,412	0,503	16,724
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Fina	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PP	0,632	1,211	0,522	0,624	1,203	0,519

c) Dirección perpendicular a las fibras (Z).

	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Gruesa	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PG1	0,508	0,518	0,981	0,512	0,513	0,998
PG2	0,513	0,527	0,973	0,505	0,553	0,913
PG3	0,505	0,544	0,928	0,501	0,577	0,868
PG4	0,516	0,472	1,093	0,515	0,478	1,077
PG5	0,506	0,493	1,026	0,514	0,491	1,047
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Media	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PM1	0,485	0,830	0,584	0,478	0,790	0,605
PM2	0,491	0,807	0,608	0,478	0,787	0,607
PM3	0,476	0,910	0,523	0,474	0,820	0,578
PM4	0,483	0,848	0,570	0,475	0,865	0,549
PM5	0,490	0,785	0,624	0,491	0,776	0,633
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Fina	V(V)	I(A)	R(Ω)	V(V)	I(A)	R(Ω)
PF1	0,412	1,693	0,243	0,404	1,667	0,242
PF2	0,420	1,691	0,248	0,380	1,535	0,248
PF3	0,425	1,646	0,258	0,401	1,541	0,260
PF4	0,412	1,637	0,252	0,424	1,514	0,280
PF5	0,423	1,495	0,283	0,432	1,545	0,280
	<i>Medida 1</i>			<i>Medida 2</i>		
Probeta Fina	V(mV)	I(A)	R(mΩ)	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
PP	34,42	1,071	32,14	41,72	1,060	39,36

A.4 Tablas de valores obtenidos de los ensayos por el método de los 4 puntos (apartado 4.5 de la memoria)

- **Valores del Ensayo 1.**
 - Puntas Tipo 1; Cara A; Medida 1.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	23,5	2,274	10,3
A2-B2	19,78	2,291	8,6
A3-B3	26,68	2,282	11,7

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	65,49	2,28	28,7
A2-C2	87,15	2,29	38,1
A3-C3	110,46	2,288	48,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	81,9	2,275	36,0
A2-D2	108,92	2,302	47,3
A3-D3	142	2,292	62,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	45,58	2,285	19,9
B2-C2	67,6	2,291	29,5
B3-C3	78,94	2,293	34,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	53,85	2,292	23,5
B2-D2	92,6	2,294	40,4
B3-D3	114,48	2,301	49,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	10,89	2,262	4,8
C2-D2	23,53	2,273	10,4
C3-D3	27,65	2,268	12,2

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	7,89E-05	7,32E-05	6,89E-05	7,62E-05	6,00E-05	3,67E-05
2	6,58E-05	9,72E-05	9,05E-05	1,13E-04	1,03E-04	7,96E-05
3	8,96E-05	1,23E-04	1,19E-04	1,32E-04	1,27E-04	9,34E-05

- Puntas Tipo 2; Cara A; Medida 1.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	19,7	2,25	8,8
A2-B2	24,1	2,251	10,7
A3-B3	31,32	2,274	13,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	58,49	2,268	25,8
A2-C2	89,5	2,265	39,5
A3-C3	95,3	2,254	42,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	80,2	2,258	35,5
A2-D2	108,6	2,254	48,2
A3-D3	134,8	2,263	59,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	35,14	2,267	15,5
B2-C2	68,4	2,277	30,0
B3-C3	68,65	2,265	30,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	68,2	2,265	30,1
B2-D2	87,88	2,268	38,7
B3-D3	107,7	2,27	47,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	20,12	2,274	8,8
C2-D2	24,65	2,268	10,9
C3-D3	25,78	2,278	11,3

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	6,74E-05	6,58E-05	6,79E-05	5,93E-05	7,68E-05	6,74E-05
2	8,19E-05	1,01E-04	9,23E-05	1,15E-04	9,88E-05	8,35E-05
3	1,06E-04	1,08E-04	1,14E-04	1,16E-04	1,21E-04	8,65E-05

- Puntas Tipo 3; Cara A; Medida 1.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	21,6	2,252	9,6
A2-B2	21,8	2,265	9,6
A3-B3	39,1	2,256	17,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	77,2	2,245	34,4
A2-C2	93,4	2,252	41,5
A3-C3	109,1	2,262	48,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	95,2	2,277	41,8
A2-D2	110,32	2,27	48,6
A3-D3	146,4	2,277	64,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	55,3	2,279	24,3
B2-C2	70,2	2,278	30,8
B3-C3	88,4	2,276	38,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	52,7	2,285	23,1
B2-D2	92,2	2,283	40,4
B3-D3	112,2	2,294	48,9

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	12,4	2,286	5,4
C2-D2	22,6	2,287	9,9
C3-D3	34,2	2,295	14,9

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	7,35E-05	8,78E-05	8,00E-05	9,30E-05	5,90E-05	4,13E-05
2	7,35E-05	1,06E-04	9,30E-05	1,18E-04	1,03E-04	7,58E-05
3	1,32E-04	1,23E-04	1,23E-04	1,49E-04	1,25E-04	1,14E-04

- Puntas Tipo 1; Cara A; Medida 2.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	31,7	2,369	13,4
A2-B2	13,5	2,37	5,7
A3-B3	5,8	2,378	2,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	86,7	2,369	36,6
A2-C2	26,6	2,374	11,2
A3-C3	10,4	2,371	4,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	103,9	2,37	43,8
A2-D2	44,5	2,374	18,7
A3-D3	24,7	2,377	10,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	47,2	2,37	19,9
B2-C2	13,5	2,375	5,7
B3-C3	11,5	2,38	4,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	59,7	2,374	25,1
B2-D2	16	2,352	6,8
B3-D3	20,3	2,35	8,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	27,5	2,332	11,8
C2-D2	15,8	2,353	6,7
C3-D3	23,9	2,353	10,2

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	1,02E-04	9,34E-05	8,39E-05	7,62E-05	6,42E-05	9,03E-05
2	4,36E-05	2,86E-05	3,59E-05	2,18E-05	1,74E-05	5,14E-05
3	1,87E-05	1,12E-05	1,99E-05	1,85E-05	2,20E-05	7,78E-05

- Puntas Tipo 2; Cara A; Medida 2.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	38,8	2,341	16,6
A2-B2	21,5	2,325	9,2
A3-B3	24,4	2,282	10,7

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	94,1	2,337	40,3
A2-C2	76,4	2,354	32,5
A3-C3	107,3	2,362	45,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	117,8	2,355	50,0
A2-D2	90,9	2,374	38,3
A3-D3	147,4	2,378	62,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	39,3	2,376	16,5
B2-C2	62,3	2,388	26,1
B3-C3	79,1	2,387	33,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	68,8	2,397	28,7
B2-D2	57,5	2,34	24,6
B3-D3	105,8	2,372	44,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	11,7	2,373	4,9
C2-D2	12,8	2,356	5,4
C3-D3	44,2	2,383	18,5

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	1,27E-04	1,03E-04	9,57E-05	6,33E-05	7,32E-05	3,77E-05
2	7,08E-05	8,28E-05	7,33E-05	9,99E-05	6,27E-05	4,16E-05
3	8,19E-05	1,16E-04	1,19E-04	1,27E-04	1,14E-04	1,42E-04

- Puntas Tipo 3; Cara A; Medida 2.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	22,8	2,303	9,9
A2-B2	19,7	2,319	8,5
A3-B3	14,2	2,329	6,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	52,8	2,333	22,6
A2-C2	31,8	2,345	13,6
A3-C3	29,2	2,365	12,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	123,8	2,359	52,5
A2-D2	63,4	2,356	26,9
A3-D3	35,8	2,349	15,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	71,9	2,337	30,8
B2-C2	10,8	2,358	4,6
B3-C3	18,4	2,355	7,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	91,8	2,351	39,0
B2-D2	23,8	2,361	10,1
B3-D3	56,75	2,375	23,9

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	23,9	2,372	10,1
C2-D2	11,8	2,383	5,0
C3-D3	20,3	2,377	8,5

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	7,58E-05	5,78E-05	1,00E-04	1,18E-04	9,96E-05	7,71E-05
2	6,50E-05	3,46E-05	5,15E-05	1,75E-05	2,57E-05	3,79E-05
3	4,67E-05	3,15E-05	2,92E-05	2,99E-05	6,10E-05	6,54E-05

- **Valores del Ensayo 2.**
 - PG5; Puntas Tipo 2; cara A; medida 1.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	2,6	8,01	0,3
A2-B2	8,4	8,18	1,0
A3-B3	18,8	8,20	2,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	19,5	8,21	2,4
A2-C2	43,3	8,23	5,3
A3-C3	83,8	8,17	10,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	25,4	8,16	3,1
A2-D2	48,6	8,16	6,0
A3-D3	98,3	8,22	12,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	18,7	8,17	2,3
B2-C2	31,1	8,18	3,8
B3-C3	70,9	8,14	8,7

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	25,6	8,12	3,2
B2-D2	38,0	8,09	4,7
B3-D3	81,8	8,07	10,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	5,3	7,86	0,7
C2-D2	5,8	7,69	0,8
C3-D3	22	7,52	2,9

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	2,45E-06	6,07E-06	5,95E-06	8,77E-06	8,04E-06	5,13E-06
2	7,89E-06	1,34E-05	1,14E-05	1,45E-05	1,20E-05	5,74E-06
3	1,75E-05	2,62E-05	2,29E-05	3,33E-05	2,59E-05	2,24E-05

- PG5; Puntas Tipo 2; cara B; medida 1.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	11,3	8,34	1,4
A2-B2	6,6	8,26	0,8
A3-B3	2,9	8,18	0,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	51,8	8,14	6,4
A2-C2	41,8	8,00	5,2
A3-C3	52,6	7,55	7,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	72,0	8,90	8,1
A2-D2	37,8	8,62	4,4
A3-D3	70,9	8,47	8,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	48,0	8,07	6,0
B2-C2	37,0	8,02	4,6
B3-C3	49,1	7,98	6,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	63,1	7,94	8,0
B2-D2	37,6	7,89	4,8
B3-D3	61,7	7,94	7,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	13,2	8,24	1,6
C2-D2	10,4	8,16	1,3
C3-D3	10,4	8,16	1,3

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	1,03E-05	1,62E-05	1,55E-05	2,28E-05	2,03E-05	1,22E-05
2	6,12E-06	1,33E-05	8,40E-06	1,76E-05	1,22E-05	9,72E-06
3	2,68E-06	1,78E-05	1,60E-05	2,35E-05	1,98E-05	9,72E-06

- PG5; Puntas Tipo 2; cara A; medida 2.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	3,5	8,79	0,4
A2-B2	14,8	8,84	1,7
A3-B3	14,2	8,83	1,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	31,8	8,78	3,6
A2-C2	47,8	8,75	5,5
A3-C3	64,3	8,71	7,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	45,3	8,66	5,2
A2-D2	56,6	8,60	6,6
A3-D3	75,8	8,53	8,9

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	28,2	8,41	3,4
B2-C2	39,6	8,36	4,7
B3-C3	51,3	8,05	6,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	37,1	8,94	4,2
B2-D2	55,6	8,88	6,3
B3-D3	68,7	8,83	7,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	8,48	8,77	1,0
C2-D2	10,3	8,70	1,2
C3-D3	20,1	8,66	2,3

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	3,06E-06	9,24E-06	1,00E-05	1,28E-05	1,06E-05	7,43E-06
2	1,28E-05	1,39E-05	1,26E-05	1,81E-05	1,60E-05	9,03E-06
3	1,23E-05	1,88E-05	1,70E-05	2,44E-05	1,99E-05	1,78E-05

- PG5; Puntas Tipo 2; cara B; medida 2.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	7,8	8,35	0,9
A2-B2	4,0	8,39	0,5
A3-B3	6,4	8,41	0,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	67,8	8,41	8,1
A2-C2	55,3	8,43	6,6
A3-C3	56,8	8,46	6,7

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	87,1	8,48	10,3
A2-D2	69,3	8,46	8,2
A3-D3	77,6	8,46	9,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	54,6	8,48	6,4
B2-C2	50,9	8,46	6,0
B3-C3	49,6	8,38	5,9

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	79,8	8,47	9,4
B2-D2	68,4	8,38	8,2
B3-D3	61,4	8,40	7,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	18,9	8,48	2,2
C2-D2	16,0	8,38	1,9
C3-D3	12,6	8,33	1,5

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	6,89E-06	2,06E-05	1,97E-05	2,45E-05	2,40E-05	1,71E-05
2	3,83E-06	1,67E-05	1,57E-05	2,30E-05	2,08E-05	1,46E-05
3	6,12E-06	1,71E-05	1,76E-05	2,26E-05	1,87E-05	1,16E-05

- PP; Puntas Tipo 2; cara A; medida 1.

PP	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	17,9	5,01	3,6
A2-B2	13,3	5,01	2,7
A3-B3	9,7	5,01	1,9

PP	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	37,7	5,01	7,5
A2-C2	27,8	5,01	5,6
A3-C3	23,6	5,01	4,7

PP	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	55,2	5,01	11,0
A2-D2	41,1	5,01	8,2
A3-D3	35,6	5,01	7,1

PP	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	19,8	5,01	4,0
B2-C2	14,5	5,01	2,9
B3-C3	13,9	5,01	2,8

PP	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	37,3	5,01	7,5
B2-D2	27,8	5,01	5,6
B3-D3	25,9	5,01	4,7

PP	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	17,5	5,01	3,5
C2-D2	13,3	5,01	2,7
C3-D3	12,0	5,01	2,4

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PP	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	2,75E-05	2,90E-05	2,83E-05	3,04E-05	2,87E-05	2,69E-05
2	2,04E-05	2,14E-05	2,11E-05	2,23E-05	2,14E-05	2,04E-05
3	1,49E-05	1,81E-05	1,82E-05	2,14E-05	1,99E-05	1,84E-05

- PP; Puntas Tipo 2; cara B; medida 1.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	14,5	5,01	2,9
A2-B2	13,5	5,01	2,7
A3-B3	12,7	5,01	2,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	34,1	5,01	6,8
A2-C2	31,3	5,01	6,3
A3-C3	30,0	5,01	6,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	53,7	5,01	10,7
A2-D2	48,2	5,01	9,6
A3-D3	47,2	5,01	9,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	19,6	5,01	3,9
B2-C2	17,8	5,01	3,6
B3-C3	17,3	5,01	3,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	39,2	5,01	7,8
B2-D2	34,7	5,01	6,9
B3-D3	34,5	5,01	6,9

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	19,6	5,01	3,9
C2-D2	16,9	5,01	3,4
C3-D3	17,2	5,01	3,4

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PP	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	2,23E-05	2,62E-05	2,75E-05	3,01E-05	3,01E-05	3,01E-05
2	2,07E-05	2,40E-05	2,47E-05	2,74E-05	2,67E-05	2,60E-05
3	1,95E-05	2,30E-05	2,42E-05	2,66E-05	2,65E-05	2,64E-05

- Valores del Ensayo 3 – 2.
 - Puntas Tipo 2; cara A.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	4,76	5,05	0,9
A2-B2	2,09	5,05	0,4
A3-B3	2,28	5,05	0,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	15,3	5,05	3,0
A2-C2	10,03	5,05	2,0
A3-C3	13,27	5,05	2,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	15,65	5,05	3,1
A2-D2	11,51	5,05	2,3
A3-D3	16,02	5,05	3,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	13,01	5,05	2,6
B2-C2	7,85	5,05	1,6
B3-C3	10,27	5,05	2,0

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	12,71	5,05	2,5
B2-D2	9,28	5,05	1,8
B3-D3	12,83	5,05	2,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	1,52	5,05	0,3
C2-D2	1,57	5,05	0,3
C3-D3	2,52	5,05	0,5

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	7,22E-06	7,73E-06	5,93E-06	9,86E-06	6,42E-06	2,30E-06
2	3,17E-06	5,07E-06	4,36E-06	5,95E-06	4,69E-06	2,38E-06
3	3,46E-06	6,71E-06	6,07E-06	7,78E-06	6,48E-06	3,82E-06

Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5_{plata4hA2}.

- Puntas Tipo 2; cara B.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	21,14	5,05	4,2
A2-B2	19,28	5,05	3,8
A3-B3	24,42	5,05	4,8

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	61,33	5,05	12,1
A2-C2	64,85	5,05	12,8
A3-C3	75,25	5,05	14,9

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	77,79	5,05	15,4
A2-D2	71,93	5,05	14,2
A3-D3	92,06	5,05	18,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	42,44	5,05	8,4
B2-C2	47,66	5,05	9,4
B3-C3	53,21	5,05	10,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	55,93	5,05	11,1
B2-D2	54,51	5,05	10,8
B3-D3	71,62	5,05	14,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	15,41	5,05	3,1
C2-D2	8,02	5,05	1,6
C3-D3	16,31	5,05	3,2

Las resistividades calculadas a partir de los valores anteriores se muestran en la siguiente tabla:

PG5	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
1	3,20E-05	3,10E-05	2,95E-05	3,22E-05	2,83E-05	2,34E-05
2	2,92E-05	3,28E-05	2,73E-05	3,61E-05	2,75E-05	1,22E-05
3	3,70E-05	3,80E-05	3,49E-05	4,03E-05	3,62E-05	2,47E-05

Valores de las resistividades calculadas por el método de los 4 puntos para las condiciones PG5_{plata4hB2}.

- Valores del Ensayo 3 – 3.

- Puntas Tipo 1; cara A.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	8,73	5,06	1,7
A2-B2	-4,8	5,06	-0,9
A3-B3	0,7	5,06	0,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	19,08	5,06	3,8
A2-C2	7,82	5,06	1,5
A3-C3	13,79	5,06	2,7

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	19,17	5,06	3,8
A2-D2	13,54	5,06	2,7
A3-D3	16,87	5,06	3,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	12,75	5,06	2,5
B2-C2	12,75	5,06	2,5
B3-C3	12,75	5,06	2,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	12,43	5,06	2,5
B2-D2	17,51	5,06	3,5
B3-D3	15,53	5,06	3,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	0,62	5,06	0,1
C2-D2	5,58	5,06	1,1
C3-D3	3,46	5,06	0,7

- Puntas Tipo 1; cara B.

Debido al sistema de sujeción de los nuevos electrodos, en esta cara sólo se pueden medir potenciales entre los puntos A_i y D_i .

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	73,24	5,06	14,5
A2-D2	69,03	5,06	13,6
A3-D3	98,91	5,06	19,5

- Valores del Ensayo 3 – 4.

- Puntas Tipo 1; cara A.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	7,05	5,05	1,4
A2-B2	-2,04	5,05	-0,4
A3-B3	0,33	5,05	0,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	20,51	5,05	4,1
A2-C2	8,99	5,05	1,8
A3-C3	11,56	5,05	2,3

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	18,31	5,05	3,6
A2-D2	12,52	5,05	2,5
A3-D3	15,82	5,05	3,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	11,29	5,05	2,2
B2-C2	11,29	5,05	2,2
B3-C3	11,29	5,05	2,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	11,81	5,05	2,3
B2-D2	15,14	5,05	3,0
B3-D3	16,07	5,05	3,2

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	1,02	5,05	0,2
C2-D2	3,65	5,05	0,7
C3-D3	3,9	5,05	0,8

- Puntas Tipo 1; cara B.

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-B1	26,13	5,05	5,2
A2-B2	15,67	5,05	3,1
A3-B3	15,42	5,05	3,1

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-C1	68,45	5,05	13,6
A2-C2	56,09	5,05	11,1
A3-C3	57,38	5,05	11,4

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
A1-D1	82,34	5,05	16,3
A2-D2	64,35	5,05	12,7
A3-D3	63,18	5,05	12,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-C1	42,69	5,05	8,5
B2-C2	42,69	5,05	8,5
B3-C3	42,69	5,05	8,5

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
B1-D1	60,03	5,05	11,9
B2-D2	44,61	5,05	8,8
B3-D3	48,27	5,05	9,6

PG5	V(mV)	I(A)	R(mΩ)
C1-D1	20,71	5,05	4,1
C2-D2	5,74	5,05	1,1
C3-D3	9,22	5,05	1,8

A.5 Tablas de valores obtenidos de los ensayos por el método de los 4 puntos (apartado 4.6 de la memoria)

- **Valores del Ensayo 4 – 1.**
 - Valores de los potenciales medidos en cada punto (mV). Puntas Tipo 1. Cara A.

PGG	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	130,1	131,9	136,3	141,1	150,2	153,1	162,7	171,4	175,3
B	165,6	167,0	168,8	172,4	174,6	191,3	193,1	203,1	209,7
C	150,8	153,3	156,0	157,1	165,5	173,1	180,1	187,9	192,1
D	143,6	144,8	146,5	152,9	160,9	170,5	171,5	193,0	203,1
E	160,2	162,2	166,5	175,2	180,4	185,7	201,3	216,1	225,7
PGG	10	11	12	13	14	15	16	17	VT
A	184,2	200,3	206,5	209,7	218,8	229,1	244,3	246,8	420,3
B	228,2	233,2	245,4	254,1	262,4	272,3	274,5	277,2	420,3
C	205,4	214,7	223,7	234,5	243,8	246,0	251,4	255,1	420,3
D	224,7	231,4	248,4	256,1	269,3	281,6	284,2	291,9	420,3
E	234,2	243,4	255,4	269,3	274,7	279,7	284,9	287,2	420,3

- Valores de las resistividades (Ω m) calculadas con los potenciales entre puntos con distancias de 10 mm. Cara A.

PGG	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
A	5,55E-06	1,36E-05	1,48E-05	2,81E-05	8,95E-06	2,96E-05	2,68E-05	1,20E-05
B	4,32E-06	5,55E-06	1,11E-05	6,79E-06	5,15E-05	5,55E-06	3,09E-05	2,04E-05
C	7,71E-06	8,33E-06	3,39E-06	2,59E-05	2,35E-05	2,16E-05	2,41E-05	1,30E-05
D	3,70E-06	5,25E-06	1,97E-05	2,47E-05	2,96E-05	3,09E-06	6,63E-05	3,12E-05
E	6,17E-06	1,33E-05	2,68E-05	1,60E-05	1,64E-05	4,81E-05	4,57E-05	2,96E-05
PGG	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
A	2,75E-05	4,97E-05	1,91E-05	9,87E-06	2,81E-05	3,18E-05	4,69E-05	7,71E-06
B	5,71E-05	1,54E-05	3,76E-05	2,68E-05	2,56E-05	3,05E-05	6,79E-06	8,33E-06
C	4,10E-05	2,87E-05	2,78E-05	3,33E-05	2,87E-05	6,79E-06	1,67E-05	1,14E-05
D	6,66E-05	2,07E-05	5,25E-05	2,38E-05	4,07E-05	3,80E-05	8,02E-06	2,38E-05
E	2,62E-05	2,84E-05	3,70E-05	4,29E-05	1,67E-05	1,54E-05	1,60E-05	7,10E-06

- Valores de los potenciales medidos en cada punto (mV). Puntas Tipo 1. Cara B.

PGG	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	185,1	187,6	189,0	195,5	199,5	205,9	214,5	222,0	231,6
B	211,0	213,3	218,2	231,3	239,6	243,6	249,2	257,7	265,5
C	222,4	223,4	226,2	229,2	231,7	234,9	239,7	244,5	248,7
D	127,1	127,8	129,9	134,3	135,7	141,9	142,2	150,1	154,2
E	223,3	225,9	233,3	233,7	234,1	236,2	237,7	241,4	247,0
PGG	10	11	12	13	14	15	16	17	VT
A	239,4	249,3	260,6	271,3	275,2	288,8	296,6	299,5	420,3
B	274,8	282,6	294,2	303,7	315,3	320,2	331,8	335,1	420,3
C	256,4	265,5	272,6	282,1	287,4	293,1	295,7	301,0	420,3
D	161,0	167,7	172,0	177,6	185,5	189,0	196,4	199,8	420,3
E	247,1	250,4	258,7	262,5	264,8	269,8	273,1	279,2	420,3

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales entre puntos con distancias de 10 mm. Cara B.

PGG	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
A	9,26E-06	5,19E-06	2,41E-05	1,48E-05	2,37E-05	3,19E-05	2,78E-05	3,56E-05
B	8,52E-06	1,82E-05	4,85E-05	3,07E-05	1,48E-05	2,07E-05	3,15E-05	2,89E-05
C	3,70E-06	1,04E-05	1,11E-05	9,26E-06	1,19E-05	1,78E-05	1,78E-05	1,56E-05
D	2,59E-06	7,78E-06	1,63E-05	5,19E-06	2,30E-05	1,11E-06	2,93E-05	1,52E-05
E	9,63E-06	2,74E-05	1,48E-06	1,48E-06	7,78E-06	5,56E-06	1,37E-05	2,07E-05
PGG	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
A	2,89E-05	3,67E-05	4,19E-05	3,96E-05	1,44E-05	5,04E-05	2,89E-05	1,07E-05
B	3,45E-05	2,89E-05	4,30E-05	3,52E-05	4,30E-05	1,82E-05	4,30E-05	1,22E-05
C	2,85E-05	3,37E-05	2,63E-05	3,52E-05	1,96E-05	2,11E-05	9,63E-06	1,96E-05
D	2,52E-05	2,48E-05	1,59E-05	2,07E-05	2,93E-05	1,30E-05	2,74E-05	1,26E-05
E	3,70E-07	1,22E-05	3,07E-05	1,41E-05	8,52E-06	1,85E-05	1,22E-05	2,26E-05

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales entre puntos con distancias de 20 mm. Cara A.

PGG	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10
A	1,15E-05	1,70E-05	2,57E-05	2,22E-05	2,32E-05	3,39E-05	2,33E-05	2,37E-05
B	5,93E-06	1,00E-05	1,07E-05	3,50E-05	3,43E-05	2,19E-05	3,08E-05	4,65E-05
C	9,63E-06	7,04E-06	1,76E-05	2,96E-05	2,70E-05	2,74E-05	2,22E-05	3,24E-05
D	5,37E-06	1,50E-05	2,67E-05	3,26E-05	1,96E-05	4,17E-05	5,85E-05	5,87E-05
E	1,17E-05	2,41E-05	2,57E-05	1,95E-05	3,87E-05	5,63E-05	4,52E-05	3,35E-05
PGG	9-11	10-12	11-13	12-14	13-15	14-16	15-17	
A	4,63E-05	4,13E-05	1,74E-05	2,28E-05	3,59E-05	4,72E-05	3,28E-05	
B	4,35E-05	3,19E-05	3,87E-05	3,15E-05	3,37E-05	2,24E-05	9,08E-06	
C	4,19E-05	3,39E-05	3,67E-05	3,72E-05	2,13E-05	1,41E-05	1,69E-05	
D	5,24E-05	4,39E-05	4,58E-05	3,87E-05	4,72E-05	2,76E-05	1,91E-05	
E	3,28E-05	3,93E-05	4,80E-05	3,58E-05	1,93E-05	1,89E-05	1,39E-05	

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales entre puntos con distancias de 20 mm. Cara B.

PGG	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10
A	7,22E-06	1,46E-05	1,95E-05	1,93E-05	2,78E-05	2,98E-05	3,17E-05	3,22E-05
B	1,33E-05	3,33E-05	3,96E-05	2,28E-05	1,78E-05	2,61E-05	3,02E-05	3,17E-05
C	7,04E-06	1,07E-05	1,02E-05	1,06E-05	1,48E-05	1,78E-05	1,67E-05	2,20E-05
D	5,19E-06	1,20E-05	1,07E-05	1,41E-05	1,20E-05	1,52E-05	2,22E-05	2,02E-05
E	1,85E-05	1,44E-05	1,48E-06	4,63E-06	6,67E-06	9,63E-06	1,72E-05	1,06E-05
PGG	9-11	10-12	11-13	12-14	13-15	14-16	15-17	
A	3,28E-05	3,93E-05	4,08E-05	2,70E-05	3,24E-05	3,96E-05	1,98E-05	
B	3,17E-05	3,59E-05	3,91E-05	3,91E-05	3,06E-05	3,06E-05	2,76E-05	
C	3,11E-05	3,00E-05	3,08E-05	2,74E-05	2,04E-05	1,54E-05	1,46E-05	
D	2,50E-05	2,04E-05	1,83E-05	2,50E-05	2,11E-05	2,02E-05	2,00E-05	
E	6,30E-06	2,15E-05	2,24E-05	1,13E-05	1,35E-05	1,54E-05	1,74E-05	

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales entre puntos con distancias de 40 mm. Cara A.

PGG	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11
A	1,86E-05	1,96E-05	2,45E-05	2,81E-05	2,32E-05	2,88E-05	3,48E-05
B	8,34E-06	2,25E-05	2,25E-05	2,84E-05	3,25E-05	3,42E-05	3,71E-05
C	1,36E-05	1,83E-05	2,23E-05	2,85E-05	2,46E-05	2,99E-05	3,20E-05
D	1,60E-05	2,38E-05	2,32E-05	3,71E-05	3,91E-05	5,02E-05	5,55E-05
E	1,87E-05	2,18E-05	3,22E-05	3,79E-05	4,20E-05	4,49E-05	3,90E-05
PGG	8-12	9-13	10-14	11-15	12-16	13-17	
A	3,25E-05	3,19E-05	3,20E-05	2,67E-05	3,50E-05	3,44E-05	
B	3,92E-05	4,11E-05	3,17E-05	3,62E-05	2,70E-05	2,14E-05	
C	3,32E-05	3,93E-05	3,56E-05	2,90E-05	2,57E-05	1,91E-05	
D	5,13E-05	4,91E-05	4,13E-05	4,65E-05	3,32E-05	3,32E-05	
E	3,64E-05	4,04E-05	3,75E-05	3,36E-05	2,73E-05	1,66E-05	

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales entre puntos con distancias de 40 mm). Cara B.

PGG	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11
A	1,33E-05	1,69E-05	2,36E-05	2,45E-05	2,97E-05	3,10E-05	3,22E-05
B	2,65E-05	2,81E-05	2,87E-05	2,45E-05	2,40E-05	2,89E-05	3,09E-05
C	8,61E-06	1,07E-05	1,25E-05	1,42E-05	1,57E-05	1,99E-05	2,39E-05
D	7,97E-06	1,31E-05	1,14E-05	1,46E-05	1,71E-05	1,77E-05	2,36E-05
E	1,00E-05	9,54E-06	4,08E-06	7,13E-06	1,19E-05	1,01E-05	1,18E-05
PGG	8-12	9-13	10-14	11-15	12-16	13-17	
A	3,58E-05	3,68E-05	3,32E-05	3,66E-05	3,33E-05	2,61E-05	
B	3,38E-05	3,54E-05	3,75E-05	3,48E-05	3,48E-05	2,91E-05	
C	2,60E-05	3,09E-05	2,87E-05	2,56E-05	2,14E-05	1,75E-05	
D	2,03E-05	2,17E-05	2,27E-05	1,97E-05	2,26E-05	2,06E-05	
E	1,60E-05	1,44E-05	1,64E-05	1,80E-05	1,33E-05	1,55E-05	

- **Valores del Ensayo 4 – 2.**

- Valores de los potenciales medidos con electrodos completos (mV). El electrodo de medida consiste en un hilo de cobre de 0,75 mm de diámetro. Cara A.

PGG	2	4	6	8	10	12	14	16	VT
	138,5	147,2	158,2	177,4	193,0	215,7	230,2	238,4	403,2

PGG	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	8,7	11,0	19,2	15,6	22,7	14,5	8,2

- Valores de los potenciales medidos con electrodos completos (mV). El electrodo de medida consiste en un hilo de cobre de 0,75 mm de diámetro. Cara B.

PGG	2	4	6	8	10	12	14	16	VT
	189,0	196,5	199,6	215,7	226,3	236,4	252,3	262,9	403,2

PGG	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	7,5	3,1	16,1	10,6	10,1	15,9	10,6

- **Valores del Ensayo 4 – 4.**

- Valores de los potenciales medidos con electrodos completos (mV). El electrodo de medida consiste en una lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor y 10 mm de ancho. Se mide de forma individual en cada coordenada. Cara A.

PGG	4	6	8	10	12	14	VT
	151,0	161,1	175,0	189,6	207,8	220,7	398,4

PGG	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
	10,1	13,9	14,6	18,2	12,9

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales anteriores. La distancia entre puntos medidos es de 20 mm. Cara A.

PGG	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
	1,87E-05	2,57E-05	2,70E-05	3,37E-05	2,39E-05

- Valores de los potenciales medidos con electrodos completos (mV). El electrodo de medida consiste en una lámina de aluminio de 0,05 mm de espesor y 10 mm de ancho. Se ponen todos los electrodos al mismo tiempo sobre la probeta, pero se mide uno a uno. Cara A.

PGG	2	4	6	8	10	12	14	16	VT
	135,5	142,8	159,6	178,3	197,2	220,3	233,6	245,2	394,4

PGG	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	7,3	16,8	18,7	18,9	23,1	13,3	11,6

- Valores de las resistividades (Ωm) calculadas con los potenciales anteriores. La distancia entre puntos medidos es de 20 mm. Cara A.

PGG	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
	1,35E-05	3,11E-05	3,46E-05	3,50E-05	4,28E-05	2,46E-05	2,15E-05

A.6 Tablas de valores obtenidos de los ensayos superficiales (apartado 5.3 de la memoria)

- **Valores del Ensayo S1.**

I (A)	V (mV)
0,069	11
0,272	42,3
0,476	73,2
0,582	89,4
1,161	177,8
1,54	235,8
1,918	293,6
2,504	383,7
3,027	462,1
3,511	535,8
3,985	608,3
4,46	681,8
4,98	760,9

- **Valores del Ensayo S2.**

I (A)	V (mV)
0,174	12,8
0,48	35,7
0,753	55,6
1,054	78,3
1,333	98,7
1,852	136,8
2,129	157,4
2,613	193,1
3,127	230,9
3,508	259,1
3,989	294,4
4,39	324,8
4,98	368,2

- **Valores del Ensayo S3**

- **Probeta PFG. Electrodo en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	0	281,7	375,2	487,5	560,4	631,7	740,9	862,3	1120
B	0	274,3	404,8	487,6	572,7	670,4	740,2	843,2	1120
C	0	333,5	433,1	528,7	594,3	672,3	752,9	855,7	1120
D	0	256,4	423,7	514,8	596,2	665,1	740,7	874,2	1120
E	0	267,1	381,5	457,1	550,2	646,8	743,5	849,4	1120
Cara B	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	NM	512,7	523,5	538,2	556,1	573,8	584,3	593,7	NM
B	NM	542,3	554,1	576,1	581,6	605,1	616,2	625,9	NM
C	NM	550,1	561,2	576,2	592,3	610,6	624,7	634,4	NM
D	NM	531,6	543,3	559,3	578,8	592,7	608,6	618,9	NM
E	NM	535,1	545,7	558,2	571,9	581,9	595,6	604,8	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PFG. Electrodo en la cara B.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	NM	584,6	559,1	570,7	585,4	600,5	610,5	620,5	NM
B	NM	581,7	594,2	609,6	623,4	640,2	655,5	666,1	NM
C	NM	621,0	625,6	647,0	665,5	678,9	694,1	705,2	NM
D	NM	646,5	661,1	676,8	694,0	711,1	724,2	741,9	NM
E	NM	692,3	702,3	715,6	733,3	750,9	765,5	780,1	NM
Cara B	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	0	317,7	417,9	501,2	656,9	628,1	705,8	810,6	1360
B	0	377,2	463,2	547,5	612,3	677,6	743,9	826,1	1360
C	0	374,4	516,6	588,8	656,2	718,1	772,5	873,4	1360
D	0	423,5	525,4	610,8	692,5	767,6	843,1	940,1	1360
E	0	464,3	521,4	660,4	739,1	824,2	899,3	989,3	1360

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Valores del Ensayo S4**

- **Probeta PMG. Electrodos en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	0	358,5	464	539,8	636,2	706,1	791,6	931,7	1190
B	0	286,9	415,2	528,6	592,9	693,4	784,1	905,6	1190
C	0	322,1	427,4	523,1	584,5	668,7	772,5	882,8	1190
D	0	295,7	397,0	501,3	585,1	691,4	803,7	904,5	1190
E	0	245,3	364,4	468,4	564,5	653,7	760,9	921,1	1190
Cara B	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	NM	636,4	635,2	636,4	639,6	640,5	643,0	641,7	NM
B	NM	614,2	615,9	616,2	615,3	617,4	617,3	617,9	NM
C	NM	596,5	598,4	599,2	600,2	601,5	602,0	602,7	NM
D	NM	595,2	597,1	597,3	597,5	598,8	599,4	600,1	NM
E	NM	585,5	585,1	587,1	587,6	588,4	588,7	589,2	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PGG. Electrodos en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	0	382,1	565,5	674,1	787,6	914,3	1046,1	1162,6	1510
B	0	393,1	576,2	701,1	773,2	924,0	1132,2	1197,6	1510
C	0	440,3	656,8	789,7	946,5	1029,8	1143,4	1242,0	1510
D	0	433,1	673,6	737,4	867,5	962,4	1095,4	1150,8	1510
E	0	407,0	576,6	699,6	808,2	872,7	1029,7	1069,4	1510
Cara B	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	NM	816,5	820,2	820,3	821,7	820,9	821,1	822,0	NM
B	NM	835,2	840,9	839,4	841,8	842,1	842,0	842,4	NM
C	NM	854,5	855,1	854,6	854,0	854,3	854,1	854,1	NM
D	NM	847,1	848,2	846,1	844,5	843,7	844,1	842,1	NM
E	NM	816,2	816,5	815,7	814,9	815,0	815,7	815,2	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PPG. Electrodos en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	0	166,9	177,9	189,5	203,8	218,8	233,6	243,6	393,2
B	0	169,2	180,6	194,4	208,1	223,4	237,9	248,8	393,2
C	0	179,6	188,3	200,6	213,1	226,2	238,2	248,6	393,2
D	0	180	189,3	200,8	212,3	223,7	234,3	240,7	393,2
E	0	183,5	191,2	201,5	210,9	221,3	231,6	239,5	393,2
Cara B	0	1	2	3	4	5	6	7	VT
A	NM	167,7	185,3	201,4	215,2	232	247,5	264,8	NM
B	NM	174,4	191,6	207,9	222,2	240,3	257,8	276,5	NM
C	NM	174,2	192,9	209,5	224,3	241,8	259,5	282,1	NM
D	NM	180,2	195,9	210,3	222,3	233,5	252,2	269,4	NM
E	NM	183,2	197,4	209,5	220,1	233,8	246,1	260,2	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Valores del Ensayo S5**

- **Probeta PFE. Electrodo en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	230,8	249,1	284,6	315,2	345,2	373	400,3	423,3	451,8	471,5	498,1	517,9
B	235,8	275,5	309,6	339,8	367,8	394,8	418,5	442,7	469,6	491,6	512,5	532,4
C	223,1	277,6	321,6	351,8	385,3	411,5	437,4	463,5	490,4	513,8	535,6	550,7
D	215,1	266,7	310,9	339,6	371,8	396,2	426,3	451,0	476,3	498,2	521,7	542,8
E	213,8	263,6	304,2	334,2	361,7	387,6	417,5	444,2	472,8	493	516,5	535,1
Cara A	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	VT
A	541,7	560,4	585,8	609,8	633,7	659,2	683,4	707,6	747,0	772,9	813,2	1098
B	564,8	581,4	605,9	627,2	651,4	679,4	708,2	732,9	765,1	806,7	853,1	1098
C	576,7	599,1	623,6	644,4	667,3	693,3	722,2	744,3	779,0	810,6	869,9	1098
D	568,1	589,9	614,7	636,6	663,4	688,8	717,6	742,9	772,6	808,7	863,6	1098
E	562,1	583,7	610,4	632,1	655,8	681,2	712,1	734,3	775,1	804,5	860,4	1098

- **Probeta PFE. Electrodo en la cara B.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	306,1	315,3	328,8	344	370,6	382,3	401,5	428,2	445,1	463,7	487,9	507,3
B	318,2	331,7	348,5	363,6	384,1	402,9	417,9	434,9	463,3	481,0	508,3	531,0
C	358,9	368,6	381,5	393,4	409,2	429,1	447,4	461,9	480,7	504,2	525,6	547,2
D	332,7	343,4	358,8	374,5	395,9	412,4	435,2	455,1	474,9	494,2	516,7	535,5
E	319,2	330,8	345,8	358,0	393,4	399,5	428,1	442,5	464,5	486,1	510,2	537,9
Cara B	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	VT
A	538,1	557,0	576,4	599,9	624,1	640,2	654,9	672,6	693,3	704,8	714,6	NM
B	550,0	574,1	593,6	619,5	640,8	657,7	677,2	698,4	712,2	724,9	737,7	NM
C	567,3	588,1	607,1	628,2	648,9	663,7	684,1	699,9	718,4	730,4	740,1	NM
D	555,4	576,3	601,1	625,7	644,8	664,1	681,3	698,1	720,1	732,8	744,9	NM
E	556,1	584,3	605,3	629,0	652,1	667,8	692,6	707,2	727,2	744,6	755,2	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PME. Electrodo en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	288,3	337,1	381,6	419,5	444,7	469,6	495,4	517,5	538,9	564,2	581,1	600,8
B	285,8	342,7	386,4	418,6	445,4	473,4	497,6	520,2	540,7	565,3	585,7	604,7
C	294	349,1	384,9	418,5	446,7	470,2	490,6	516,9	533,7	556,8	572,4	589,7
D	275,2	346,1	385,8	420	439,4	468,2	487,6	513,1	532,4	549,3	567,8	592,1
E	304,2	365,1	401,2	428,8	456,2	480,6	500,2	521,7	538,5	559,1	576,8	592,5
Cara A	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	VT
A	621,9	641,2	660,8	685,4	703,8	731,9	754,8	785,2	824,1	845,6	929,7	1203
B	624,1	645,8	668,6	691,8	714,3	741,8	766,2	796,5	836,1	876,3	920,1	1203
C	606,7	629,6	647,5	667,9	687,2	709,8	732,1	761,2	794,7	930,4	883,2	1203
D	606,1	627,7	643,8	663,8	682,4	704,5	731,5	757,3	781,5	823,4	855,8	1203
E	607,5	625,8	642,9	660,4	679,3	696,8	721,5	746,2	766,1	803,5	848,4	1203

- **Probeta PME. Electrodo en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	515,1	519,4	524,7	530,2	537,2	544,9	551,9	560,7	568,8	579,7	588	596,2
B	512,4	517,8	523,6	529,6	536,3	543,5	551,9	560,2	569	579,1	587,6	596,6
C	515,3	518,2	523,3	526,8	533,8	538,9	545	552,1	561,8	566,5	574,9	583,5
D	512,8	516,3	520,6	525,1	530,5	536,2	542,8	549,3	556,2	563,1	570,8	577,9
E	518,8	521,8	525,2	528,5	535,8	539,7	545,5	553,6	561,4	567,1	574,0	581,4
Cara B	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	VT
A	605,2	613,4	622,5	631,7	640,9	648,7	656,9	663,2	669	672,2	674,9	NM
B	606,5	615,2	627,7	634,8	642,8	650,7	658,1	665,2	671,6	675,3	678,6	NM
C	590,7	598,4	605,7	612,2	620,2	627,7	633,6	637	641,7	644,6	647,1	NM
D	584,7	591,1	598,5	605,1	612,2	618,4	624,2	629,9	634,8	637,7	640,9	NM
E	588,6	595,9	602,5	608,5	615,8	620,7	626,1	630,1	635,2	638,3	640,7	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PGE. Electrodo en la cara A.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	334,2	409,5	449	488,4	513,9	539,6	568,3	596,3	613,4	644,2	664,2	686,3
B	331,7	379,7	444,6	475,8	511,3	531,9	558,5	585,8	609,2	627,6	647,5	675,2
C	343,5	383,9	440,3	471,1	504,9	525,1	545,6	574,8	599,2	617,8	636,2	654,1
D	317,8	375,4	430,7	461,9	493,5	516,9	542,8	566,7	590,9	611,1	630,6	653
E	348,0	408,4	445,3	480,8	493,7	520,4	542,6	570,9	596,7	613,4	632,8	655,2
Cara A	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	VT
A	704,3	724,3	745,5	766,3	781,8	810,2	836,4	872,1	904,8	945,1	1011	1219
B	689,2	707,7	727,6	750,8	765,1	794,7	814,1	850,6	883,7	930,1	972	1219
C	673,4	691,4	712,5	728,4	749,1	767,1	790	822,1	853	892,8	942,5	1219
D	671,2	689,7	710,8	733,2	751,2	776,5	797,9	835	862,2	920,8	972,5	1219
E	674,7	694,3	712,6	731,6	752,7	776,7	802,4	835,4	876,4	908,5	969,4	1219

- **Probeta PGE. Electrodo en la cara B.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	667,0	667,4	668,8	670,4	671,5	672,4	674,1	675,4	677,7	679,2	681,2	682,6
B	653,5	653,7	655,1	656,7	658,4	659,3	661,3	663,4	664,6	665,7	667,9	669,4
C	639,2	639,4	640,5	642,8	644,4	646,5	648,2	649,4	651,9	653,7	655,4	657,7
D	641,8	642	642,4	643,9	645,2	646,4	647,5	648,9	650,1	651,4	652,9	654,3
E	640,0	640,9	642,3	644,0	645,3	646,7	647,8	649,2	650,5	651,8	653,2	654,6
Cara B	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	VT
A	684,5	685,6	687,4	689,3	691,2	692,2	694,4	694,8	696,6	696,8	697,3	NM
B	670,9	673,1	675,6	677,0	678,4	680,7	681,8	683,5	685,1	685,6	686,5	NM
C	659,5	661,9	663,3	665,8	668,9	670,6	671,9	673,1	675,2	675,4	675,7	NM
D	655,6	657,1	658,2	659,5	660,4	661,8	663,0	664,1	664,7	665,6	661,1	NM
E	656,1	657,8	659,0	660,2	661,3	662,7	663,7	664,9	665,2	666,0	666,4	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PFE. Electrodo en ambas caras de la probeta.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	1	3	6	9	12	15	18	21	23	VT
A	117,9	165,7	229,7	305,8	367,9	438,1	504,9	574	622,6	746,8
B	117,1	171,6	237,9	303,8	366,3	431,6	495,2	561,7	609,2	746,8
C	106,6	165,1	233,9	304,7	367,2	464,1	499,9	570,2	621,7	746,8
D	104,3	156,4	224,1	295,5	357,9	424,7	493,3	556,8	603,7	746,8
E	121,5	164,3	232,3	300,0	359,8	427,0	489,5	556,0	601,5	746,8
Cara B	1	3	6	9	12	15	18	21	23	VT
A	88,3	153,7	224,4	295,1	371,7	437	508,7	586,2	658,3	NM
B	103,4	164,7	237,1	303,9	363,4	432,2	500,4	577,9	635,0	NM
C	104,5	162,5	235,6	299,4	369,5	436,8	503,9	583,7	644,1	NM
D	91,6	152,1	229,4	291,2	362,2	427,4	495,3	568,7	631,9	NM
E	89,1	153,1	225,1	294,2	357,1	427,8	497,8	577,9	629,5	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PME. Electrodo en ambas caras de la probeta.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	1	3	6	9	12	15	18	21	23	VT
A	128,3	170,5	215,5	256,6	299,8	337,8	377,4	422,8	474,3	586,2
B	121,7	168	213,5	250,1	299,1	334,4	375	418,5	452,3	586,2
C	124,9	168,4	213,1	254,3	294,3	330,5	371,1	416,8	460,7	586,2
D	117,4	164,7	209,8	250,4	290,8	329,8	371,5	416,4	460,4	586,2
E	134,1	174,1	214,4	252,2	289,9	325,8	364,9	409,6	443,8	586,2
Cara B	1	3	6	9	12	15	18	21	23	VT
A	97,1	147,9	204,4	252,7	293,7	337	385,3	438,2	492,5	NM
B	104,7	158,2	209,1	253,1	295,2	334,7	380,2	438,7	493,2	NM
C	103,3	152,2	203,3	247,5	294,6	334,3	386,7	436,9	487,3	NM
D	104,7	155,4	203,5	246,6	287,9	328,2	386,4	421,6	473,2	NM
E	90,8	146,8	200,2	244,5	286,4	326,4	374,2	436,2	482,6	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Probeta PGE. Electrodo en ambas caras de la probeta.** Todos los potenciales medidos están en mV.

Cara A	1	3	6	9	12	15	18	21	23	VT
A	85,9	154,4	193,4	257,7	295,2	332,9	374,6	439,3	489,5	573,4
B	79,1	143,7	206,8	252,8	288,6	325,5	365,7	421,8	484,6	573,4
C	94,3	157,1	217,8	249,8	283,4	314,9	359,4	408,4	464	573,4
D	106,1	156,2	210,2	248,3	285,8	319	361,3	413,5	468,1	573,4
E	92,1	153,1	211,5	249,6	285,4	319,5	365,1	414,9	470,5	573,4
Cara B	1	3	6	9	12	15	18	21	23	VT
A	153,9	201,7	242,3	278,2	306,4	334,8	367,8	407,6	453,3	NM
B	153,4	211,2	248,9	280,5	308,9	335	364,8	405,1	444,8	NM
C	163,2	209,6	244,8	275,6	299,5	327,6	357,2	393,7	432,8	NM
D	162,5	205,8	240,6	271,1	296,2	321,4	349,2	385,6	433,7	NM
E	161,2	202,4	239,4	271,3	298,3	325,4	356,5	400,1	451,3	NM

Nota: Los puntos marcados como NM indican que en esa cara no se han podido medir al estar debajo de los electrodos.

- **Ensayo S7**

- Los valores que se muestran a continuación corresponden a los del impulso con frente de onda lento (13 μ s) y un pico de corriente de 280 A. Estos valores se han mantenido constantes durante todas las medidas.

Posición (mm) ^a	Voltaje	Z _P (Ω)
x = 125	V _{AA1}	0,018
x = 200	V _{AA2}	0,010
x = 230	V _{AA3}	0,009
x = 330	V _{AA4}	0,009
x = 425	V _{AA5}	0,010
x = 505	V _{AA6}	0,012
x = 575	V _{AA7}	0,017

- a. La coordenada indicada corresponde con el punto donde se coloca el electrodo positivo de la medida de potencial. El electrodo negativo está separado 30 mm en la misma dirección X.

Posición (mm)	Voltaje	Z _P (Ω)
x = 140	V _{AB1}	0.200
x = 140	V _{AC1}	0.207
x = 225	V _{AB2}	0.159
x = 225	V _{AC2}	0.148
x = 310	V _{AB3}	0.114
x = 310	V _{AC3}	0.113
x = 430	V _{AB4}	0.101
x = 430	V _{AC4}	0.086
x = 525	V _{AB5}	0.064
x = 525	V _{AC5}	0.057
x = 585	V _{AB6}	0.030
x = 585	V _{AC6}	0.031

- Los valores que se muestran a continuación corresponden a los del impulso con frente de onda rápido (3 μ s) y un pico de corriente de 460 A. Estos valores se han mantenido constantes durante todas las medidas.

Posición (mm) ^a	Voltaje	Z _P (Ω)
x = 125	V _{AA1}	0.234
x = 200	V _{AA2}	0.116
x = 230	V _{AA3}	0.100
x = 330	V _{AA4}	0.101
x = 425	V _{AA5}	0.098
x = 505	V _{AA6}	0.129
x = 575	V _{AA7}	0.145

- a. La coordenada indicada corresponde con el punto donde se coloca el electrodo positivo de la medida de potencial. El electrodo negativo está separado 30 mm en la misma dirección X.

Posición (mm)	Voltaje	Z _P (Ω)
x = 140	V _{AB1}	0.190
x = 140	V _{AC1}	0.207
x = 225	V _{AB2}	0.160
x = 225	V _{AC2}	0.162
x = 310	V _{AB3}	0.128
x = 310	V _{AC3}	0.133
x = 430	V _{AB4}	0.094
x = 430	V _{AC4}	0.094
x = 525	V _{AB5}	0.056
x = 525	V _{AC5}	0.052
x = 585	V _{AB6}	0.028
x = 585	V _{AC6}	0.036

