

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sábato”**

**Influencia de Parámetros de Fabricación
sobre Tensiones Residuales en
Tubos de Fibra de Carbono-Epoxi^(*)**

por Ing. Gustavo Francisco Eichhorn

Director

Ing. Cesar Belinco

Ing. Germán Kokubu

(*)Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología en Materiales

República Argentina

2023

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi esposa, siempre presente y siempre dándome apoyo y consejos para ir para adelante. En segundo lugar a nuestra familia, que con sus calidez y ayuda te impulsan a seguir adelante. Por otra parte quiero agradecer especialmente a la Jefatura del Departamento de Materiales compuestos y a todos mis compañeros del Edificio ARAS, por su cercanía y predisposición para ayudarme en cada paso de la experimentación a sortear las dificultades técnicas. Finalmente a mis compañeros de cursadas, porque compartimos muchos momentos: tuve la suerte de compartir con excelentes personas tanto de manera presencial como virtual durante mi período como alumno. Muchas gracias a todos ellos por su apoyo en temas puntuales, y espero haberles sido de ayuda en alguna oportunidad también. Finalmente no quiero dejar de agradecer a mis a mis profesores, al laboratorio de micrografías, a las personas de diversos talleres que colaboraron de una manera u otra, a los colaboradores del ENDE y a los colegas de la gerencia de materiales por su ayuda brindada en los diferentes ensayos e investigaciones llevadas a cabo en este trabajo.

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto investigar la Influencia de los Parámetros de Fabricación sobre Tensiones Residuales en Tubos de Fibra de Carbono-Epoxi fabricados mediante Enrollamiento Filamentario. La investigación llevada a cabo consiste en una descripción conceptual sobre la influencia de las Tensiones Residuales en el desempeño de los materiales en general y de los materiales compuestos en particular, junto con las técnicas experimentales existentes para determinar las Tensiones Residuales. Se lleva a cabo un Diseño de Experimentos para reducir la cantidad de pruebas. Esto se determina teniendo en cuenta que, si bien para la fabricación de tubos compuestos influyen una gran cantidad de parámetros de proceso, el equipamiento y las facilidades propias y de terceros, no permiten realizar una gran cantidad de pruebas. Esto conlleva a seleccionar cuidadosamente las técnicas experimentales de evaluación de tensiones residuales, la cantidad de tubos a ensayar y las variables a medir más adecuadas. En la parte del marco teórico de este trabajo se toman en cuenta algunos modelos teóricos predictivos de Tensiones Residuales y se postulan hipótesis sobre la influencia de los parámetros de fabricación en las Tensiones Residuales obtenidas.

En cuanto a la parte experimental, primeramente se fabrican los tubos mediante la técnica del Enrollamiento Filamentario, variándose los parámetros en cada caso, y se curan los tubos en autoclave. Posteriormente, se realizan las mediciones con los tubos ya fabricados. Las Tensiones Residuales son medidas mediante el método del Corte (Split Method). También se realizan ensayos de Resistencia Mecánica (mediante ASTM D 2290) con el fin de obtener no solo los valores absolutos de las Tensiones Residuales, sino también su relevancia, es decir, cuanto afectan a la resistencia estructural en los tubos. Se realiza un análisis micrográfico para obtener los Porcentajes de Fibra, Porcentajes de Resina y Vacíos (también denominados poros o cavidades). Finalmente, las hipótesis son contrastadas con modelos teóricos y los valores experimentales.

Palabras clave: Materiales compuestos, Tensiones residuales, Tubos, Fibra de Carbono, Epoxi, Diseño de experimentos, Método del corte, Método de flexibilidad de grietas,

Elementos Finitos, Enrollamiento Filamentario, ANSYS APDL, ASTM D 2290, Análisis Micrográfico, Porcentaje de Fibra, Porcentaje de Resina, Porcentaje de Vacío.

Abstract

The purpose of this work is to investigate the Influence of Manufacturing Parameters on Residual Stresses in Carbon Fiber-Epoxy Tubes manufactured by Filament Winding technique. The research consists of a conceptual description of how Residual Stresses impact the performance of materials in general and of composite materials in particular. It also covers existing experimental techniques to determine Residual Stresses.

A Design of Experiments is implemented to minimize the number of test required. This is determined taking into account that, although a large number of process parameters influence the manufacture of composite tubes, the equipment and own and third-party facilities do not allow a large number of tests to be carried out. This entails carefully selecting the experimental techniques for evaluating Residual Stresses, the number of tubes to be tested and the most appropriate variables to measure.

In the theoretical framework part of this work, some predictive theoretical models of Residual Stresses are taken into account and hypotheses are postulated about the influence of the manufacturing parameters on the Residual Stresses obtained.

Moving to the experimental part, the tubes are first manufactured using the Filament Winding technique, varying the parameters in each case, and the tubes are cured in an autoclave. Subsequently, measurements are made with the tubes already manufactured. Residual stresses are measured using the Split Method. Mechanical resistance tests are also carried out (using ASTM 2290) in order to obtain not only the absolute values of the residual stresses, but also their relevance, that is, how much they affect the structural resistance in the tubes. Micrographic analysis is performed to obtain the Fiber Percentages, Resin Percentages and Voids (also called pores or cavities). Finally, the hypotheses are contrasted with theoretical models and experimental values.

Keywords: Composites, Residual Stresses, Tubes, Carbon Fiber, Epoxy, Design of Experiments, Slitting Method, Finite Elements, Filament Winding, ANSYS APDL, ASTM 2290, Micrographic Analysis, Fiber Content, Resin Content, Voids.

Índice temático

<u>Agradecimientos</u>	<u>iii</u>
<u>Resumen</u>	<u>v</u>
<u>Abstract</u>	<u>vii</u>
<u>Índice temático</u>	<u>ix</u>
<u>Índice de Tablas</u>	<u>xv</u>
<u>Índice de Figuras</u>	<u>xix</u>
<u>Símbolos</u>	<u>xxv</u>
<u>Abreviaturas</u>	<u>xxix</u>
<u>Capítulo 1: Introduccion.</u>	<u>1</u>
1.1 Objetivos generales.	1
1.2 Objetivos particulares.	1
1.3 Estado de Arte.	2
1.4 Metodología de trabajo.	3
1.5 Hipótesis adoptadas.	4
1.6 Contenido.	5
<u>Capítulo 2: Materias Primas y Propiedades Físicas y Mecánicas.</u>	<u>8</u>
2.1 Generalidades sobre materiales compuestos.	8
2.2 Materias primas: propiedades térmicas y mecánicas.	10
2.2.1 Fibra de Carbono.	10
2.2.2 Matriz Epoxica.	12
	ix

2.3 Propiedades mecánicas y Físicas.	13
2.3.1 Propiedades Mecánicas y Físicas de las Fibras de Carbono.	14
2.3.2 Propiedades Mecánicas y Físicas de la Matriz de Epoxi.	15
2.3.3 Propiedades Mecánicas Elásticas y Físicas del Material Compuesto.	16
2.3.4 Propiedades de Resistencia Mecánica del Material Compuesto.	18
 <u>Capítulo 3: Fabricación de Tubos mediante Enrollamiento Filamentario (EF).</u>	 <u>21</u>
 3.1 Generalidades sobre Enrollamiento Filamentario (EF).	 21
3.2 Descripción de la máquina de enrollamiento filamentario.	22
3.3 Movimientos de la máquina de enrollamiento filamentario.	29
3.4 Obtención del código G para la fabricación de un tubo enrollamiento filamentario.	33
3.5 Preparación de la resina y preparativos preliminares.	40
3.6 Curado de tubos.	42
3.7 Tecnología de pines.	44
 <u>Capítulo 4: Tensiones residuales: teoría y modelos.</u>	 <u>50</u>
 4.1 Tensiones residuales debidas a la fabricación.	 51
4.2 Tensiones residuales debidas al proceso de curado.	52
4.3 Técnicas de medición de tensiones residuales.	52
4.4 Evaluación de las Deformaciones Residuales mediante el Método del Corte.	54
4.5 Cálculo de las Tensiones Residuales.	63
4.6 Modelo de predicción de Deformaciones Residuales.	70
 <u>Capítulo 5: Diseño de experimentos: Variables y Respuestas.</u>	 <u>76</u>
 5.1. Introducción.	 76
5.2. Selección de las variables a estudiar.	79
5.3. Selección de las respuestas a estudiar.	81
5.4. Fundamentos de un Diseño de experimentos.	81
5.5. Interacción de factores, cálculo de contrastes y confusiones.	85

5.5. Cálculo de los Efectos.	89
5.6. Gráficas de Daniel y Diagramas de Pareto.	90
5.6.1 Gráfico de efectos en papel normal (Gráfica de Daniel).	90
5.6.2 Diagrama de Pareto de efectos.	90
5.7. Construcción del ANOVA de los efectos más importantes.	91
5.8. Verificación del DOE mediante MINITABS®.	94
5.9. Procedimiento General del DOE y cálculos estadísticos complementarios del presente trabajo.	100
 Capítulo 6: Obtención de los resultados experimentales.	 103
 6.1. Parámetros de calidad de los cilindros compuestos.	 103
6.1.1 Longitud del Tubo compuesto.	103
6.1.2 Diámetro Interior.	107
6.1.3 Espesor de cada tubo.	107
6.1.4 Resumen de los parámetros de calidad de los tubos fabricados.	109
6.2. Fracción en Volumen de las Fibras.	109
6.2.1 Procedimiento de obtención y preparación de las muestras.	110
6.2.2 Procedimiento de obtención de las Micrografías y post-procesado.	113
6.2.3 Chequeo de la orientación de las fibras para cada muestra.	118
6.2.4 Resultados cuantitativos del porcentaje de fibra, resina y poros de las micrografías.	122
6.2.5 Resultados cualitativos de las micrografías.	123
6.2.6 Resultados derivados de las micrografías: propiedades micromecánicas de los laminados.	126
6.2.7 Resultados derivados de las micrografías: evaluación de las constantes Q para el cálculo de las tensiones residuales.	127
6.2.8 Resultados derivados de las micrografías: evaluación de las constantes Φ para el cálculo de las tensiones residuales.	127
6.2.9 Resultados derivados de las micrografías: evaluación de las constantes D_{11} , D_{22} y D_{12} para el cálculo de las tensiones residuales.	130
6.2.10 Resultados derivados de las micrografías: evaluación del módulo flector para el cálculo de las tensiones residuales.	130
6.3. Resistencia aparente de un aro de los tubos.	131
6.4. Tensiones residuales.	135
	xi

Capítulo 7: Conclusiones. **142**

7.1. Conclusiones acerca del % de Fibra alcanzado.	142
7.2. Conclusiones acerca del % de Resina alcanzado.	146
7.3. Conclusiones acerca del % de Poros alcanzado.	148
7.4. Conclusiones acerca de la Tensión Máxima alcanzada en el ensayo ASTM D 2290.	151
7.5. Conclusiones acerca de la Carrera Máxima alcanzada en el ensayo ASTM D 2290.	153
7.6. Conclusiones acerca de las Deformaciones Residuales.	154
7.7. Conclusiones acerca de las Tensiones Residuales.	158
7.8. Conclusiones finales.	159

Anexo 1: Ficha Técnica de la Resina **161**

Anexo 2: Modelos Micromecánicos **164**

A.2.1 Consideraciones preliminares.	165
A.2.2 Modelos Micro-Mecánicos vs. Trabajo experimental.	169
A.2.3 Modelo Micro-mecánico de la Regla de las mezclas.	170
A.2.4 Modelo Micro-mecánico de la Microestructura periódica (MMP).	172
A.2.6 Cálculo de los Modelos Micromecánicos mediante Visual Basic.	176
A.2.6.1 Datos de Entrada para la evaluación de los modelos RM y MMP.	178
A.2.6.2 Evaluación de la Regla de las Mezclas (RM) mediante Visual Basic.	180
A.2.6.3 Modelo de la Microestructura Periódica (MMP).	181

Anexo 3: Resumen del Análisis mediante Micrografías **183**

A.3.1 Micrografías pertenecientes a la Corrida 1.	183
A.3.2 Micrografías pertenecientes a la Corrida 2.	186
A.3.3 Micrografías pertenecientes a la Corrida 7A.	189
A.3.4 Micrografías pertenecientes a la Corrida 7B.	192
A.3.5 Micrografías pertenecientes a la Corrida 7C.	195
A.3.6 Micrografías pertenecientes a la Corrida 8.	198

A.3.7 Micrografías pertenecientes a la Corrida 11.	201
A.3.8 Micrografías pertenecientes a la Corrida 12.	208
A.3.9 Micrografías pertenecientes a la Corrida 13.	215
A.3.10 Micrografías pertenecientes a la Corrida 14.	222
<u>Anexo 4: Cámara de control de temperatura multipropósito</u>	<u>230</u>
<u>Referencias.</u>	<u>235</u>
<u>Curriculum Vitae.</u>	<u>239</u>

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas de elasticidad de la Fibra Toray T700 S.	14
Tabla 2.2: Propiedades físicas de la Fibra Toray T700 S.	15
Tabla 2.3: Propiedades mecánicas de elasticidad de la matriz epóxica.	15
Tabla 2.4: Propiedades físicas de la matriz epóxica.	16
Tabla 2.5: Propiedades del material compuesto evaluado mediante fórmulas de la micromecánica.	17
Tabla 2.6: Requerimientos dimensionales de las probetas según la norma ASTM D 2290.	19
Tabla 3.1: Ciclo del autoclave utilizado.	43
Tabla 4.1: Propiedades necesarias para calcular las Tensiones Residuales según la Teoría clásica de laminados (TCL).	73
Tabla 5.1: Variables más importantes del proceso de EF.	80
Tabla 5.2: Diseño factorial completo a dos niveles de 5 factores.	83
Tabla 5.3: Diseño factorial fraccionado a dos niveles de 6 factores.	84
Tabla 5.4: Diseño factorial fraccionado a dos niveles de 5 factores.	85
Tabla 5.5: Factores simples.	86
Tabla 5.6: Interacciones Dobles.	86
Tabla 5.7: Interacciones Triples.	87
Tabla 5.8: Interacciones Cuádruples y Quintuples.	87
Tabla 5.9: Tabla de expresiones de Contrastes y alias.	89
Tabla 5.10: Tabla ejemplo del cálculo de ANOVA para un diseño factorial 2^{5-3} donde tres de los factores no son depreciables.	93
Tabla 6.1: Longitud y cantidad de partes por tubo.	105
Tabla 6.2: Diámetro interior de los tubos.	108
Tabla 6.3: Espesor de los tubos.	108
Tabla 6.4: Resumen de parámetros de calidad de los tubos.	109
Tabla 6.5: Resumen de los porcentajes de Fibra, resina y poros de las muestras de cada tubo.	122
Tabla 6.6: Propiedades Micromecánicas mediante la Regla de las Mezclas.	127

Tabla 6.7: Propiedades Micromecánicas mediante el Modelo de la Microestructura Periódica.	128
Tabla 6.8: Evaluación de las constantes Q para el cálculo de las tensiones residuales.	128
Tabla 6.9: Evaluación de las constantes Φ para el cálculo de las tensiones residuales.	129
Tabla 6.10: Evaluación de las constantes D_{ij} para el cálculo de las tensiones residuales.	130
Tabla 6.11: Evaluación de las los Módulos Flectores E_{yb}.	131
Tabla 6.12: Resultados de la medición de la resistencia de los tubos según el estándar ASTM D 2290.	133
Tabla 6.13: Deformaciones Residuales.	136
Tabla 6.14: Momentos Residuales.	138
Tabla 6.15: Tensiones Residuales.	138
Tabla 7.1: Resumen de los resultados de todas las experiencias.	143
Tabla 7.2: Información relevante del DOE para % Fibra.	143
Tabla 7.3: Resumen del mejor ANOVA para evaluar los factores que contribuyen al % de Fibra.	144
Tabla 7.4: Información relevante del DOE para % Resina.	146
Tabla 7.5: Resumen del mejor ANOVA para evaluar los factores que contribuyen al % de Resina.	147
Tabla 7.6: Información relevante del DOE para % de Poros.	148
Tabla 7.7: Resumen del mejor ANOVA para evaluar los factores que contribuyen al % de Poros.	149
Tabla 7.8: Información relevante del DOE para Tensión máxima.	152
Tabla 7.9: Información relevante del DOE para Carrera máxima.	153
Tabla 7.10: Información relevante del DOE para las Deformaciones Residuales.	155
Tabla 7.11: Deformaciones Residuales obtenidas mediante 3 diferentes métodos.	156
Tabla 7.12: Resumen general del grado de influencias de los diversos Factores en las diferentes Respuestas estudiadas del DOE llevado a cabo.	159
Tabla A1.1: Ficha Técnica de la Resina.	161

Tabla A1.1: Ficha Técnica de la Resina (Continuación).	162
Tabla A.2.1: Datos de Entrada.	179
Tabla A.3.1: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 1.	183
Tabla A.3.2: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 2.	186
Tabla A.3.3: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 7A.	189
Tabla A.3.4: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 7B.	192
Tabla A.3.5: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 7C.	195
Tabla A.3.6: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 8.	198
Tabla A.3.7: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 11.	201
Tabla A.3.8: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 12.	208
Tabla A.3.9: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 13.	215
Tabla A.3.10: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 14.	222

Índice de Figuras

Figura 2.1: Arreglo esquemático de los cristales de grafito. Reproducido de Knibbs (1971).	12
Figura 2.2: Esquema del ensayo de tracción mediante el método de disco partido (ASTM D 2290).	19
Figura 3.1: Máquina de EF utilizada en el CAC.	23
Figura 3.2: Devanador de la Máquina de EF.	24
Figura 3.3: Detalle de los Frenos de Cinta del Devanador de la Máquina de EF.	25
Figura 3.4: Procedimiento de medición de la Tensión.	26
Figura 3.5: Lectura de la Tensión de la fibra.	27
Figura 3.6: Guía de Rovings de la Máquina de EF, transportando dos hilos al mismo tiempo.	27
Figura 3.7: Distintas partes de la Batea de la Máquina de EF.	28
Figura 3.8: Detalles del sistema de control de temperatura de la Batea de la Máquina de EF.	29
Figura 3.9: Movimiento en el Eje X e Y.	30
Figura 3.10: Movimiento en el Eje Z.	31
Figura 3.11: Movimiento en el Eje A.	32
Figura 3.12: Interfaz del Software Filwind5.	33
Figura 3.13: Interfaz del Software Filwind5: “File”.	34
Figura 3.14: Interfaz del Software Filwind5: “Datos iniciales”.	37
Figura 3.15: Un ancho efectivo que cubre el tubo en 8 pasadas produce 7 patrones útiles.	38
Figura 3.16: Representación en Filwind 5 de un tubo con 7 patrones útiles.	39
Figura 3.17: Presencia de burbujas durante el vertido de la resina sobre el recipiente de mezcla (previo a la mezcla con el endurecedor).	41
Figura 3.18: Protección de diversas partes de la máquina de EF, previo a la fabricación de los tubos.	42
Figura 3.19: Ciclo teórico de curado del autoclave.	44
Figura 3.20: Ciclo de curado del autoclave para cada Corrida.	45

Figura 3.21: Pines de tornillos Allen.	46
Figura 3.22: Pines de plástico.	47
Figura 3.23: Pines de alambre.	48
Figura 3.24: Pines de clavos.	48
Figura 4.1: Convención de ejes coordenados.	56
Figura 4.2: Procedimiento de extracción de una muestra para la medición de deformaciones residuales de la parte central del tubo fabricado mediante EF.	56
Figura 4.3: Esquema de un cuarto de puente de Wheatstone.	57
Figura 4.4: Datos del fabricante de la Galga Extensométrica utilizada en este trabajo.	59
Figura 4.5: Esquema de conexión de un cuarto de puente de Wheatstone en el equipo registrador.	59
Figura 4.6: Conexión físico de un cuarto de puente de Wheatstone en el equipo registrador de datos.	60
Figura 4.7: Conexión físico de un cuarto de puente de Wheatstone en la galga extensométrica.	60
Figura 4.8: Balanceo del puente de Wheatstone previo al corte y posterior medición.	61
Figura 4.9: Montaje de la caja y la “carpa” donde se realiza el corte de la pieza mediante un dremel.	62
Figura 4.10: Medición de las Deformaciones Residuales: una vez realizado el corte el equipo registra un valor en microstrains ($1\mu\epsilon=1E^{-6} \epsilon$). El segmento cortado se encuentra en el centro del cilindro.	63
Figura 4.11: Momentos residuales y su relación con las Deformaciones Residuales medidas con Galgas Extensométricas.	64
Figura 4.12: Radiovector r y convención de momentos positivos (los que producirían una extensión en una galga extensométrica).	66
Figura 4.13: Coordenada z' de la capa k-esima.	67
Figura 4.14: Resumen del método general para obtener los resultados de las Tensiones Residuales.	69
Figura 4.15: Resumen del método general para obtener los resultados de las Deformaciones Residuales según el modelo simplificado según la TCL.	74
Figura 5.1: Diseños Factoriales (imagen extraída del software Minitabs®).	78

Figura 5.2: Análisis de contrastes y alias mediante el software Excel®.	88
Figura 5.3: Análisis de contrastes y alias negativos mediante el software Excel®.	89
Figura 5.4: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Crear Diseño Factorial.	94
Figura 5.5: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de la Fracción de 1/4.	95
Figura 5.6: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Modificación de la visualización de los factores.	95
Figura 5.7: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Opciones y Resultados.	96
Figura 5.8: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Información del DOE por defecto.	96
Figura 5.9: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Información del DOE modificado por el usuario y ejemplo de calculo de resultados.	97
Figura 5.10: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de las RESPUESTAS a evaluar según el DOE establecido.	98
Figura 5.11: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de los Términos (efectos) a analizar en el DOE.	98
Figura 5.12: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Configuración de las gráficas a obtener durante el estudio.	99
Figura 5.13: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Configuración de los Resultados a obtener durante el estudio.	99
Figura 5.14: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de las variables que serán almacenadas durante el estudio.	100
Figura 6.1: Sierra Cortadora Sensitiva.	105
Figura 6.2: Tubos obtenidos en el presente trabajo mediante EF.	106
Figura 6.3: Proceso de etiquetado de las partes de cada tubo luego de su seccionamiento.	106
Figura 6.4: Todos los tubos convenientemente etiquetados en la presente tesis.	107
Figura 6.5: Muestras de los tubos para el análisis mediante micrografías.	111
Figura 6.6: Proceso de inclusión de las muestras.	112

Figura 6.7: Proceso de desbaste de las muestras.	113
Figura 6.8: Proceso de pulido ya finalizado de las muestras.	113
Figura 6.9: Recorte de la micrografía original.	115
Figura 6.10: Ajuste de Brillo y contraste.	116
Figura 6.11: Ajuste del Threshold para las Fibras.	116
Figura 6.12: Medición del área ocupada por las fibras.	117
Figura 6.13: Medición de los porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la muestra.	117
Figura 6.14: Muestra de la Corrida 11 a 50X. Se observan diferencias apreciables entre los ángulos de orientación de las fibras.	119
Figura 6.15: Función Waterset del ImageJ®: particiona las elipses que se observan como un todo en la imagen original (parte superior) para realizar la medición de los ejes. El resultado de la partición se ve en la parte inferior de la esta misma figura.	120
Figura 6.16: Función Analyze particles del ImageJ®: mediante “Fit Ellipse proporciona los elementos para medir los ejes mayores, menores y los ángulos de las elipses involucradas.”.	121
Figura 6.17: Una vez ejecutado el análisis mediante ImageJ®, el programa discretiza todas las elipses que encuentra, le calcula los ejes mayores y menores y realiza el análisis estadístico para hallar la media de cada medición.	121
Figura 6.18: Micrografías en donde se observan grietas en las regiones con capas de $\pm 5^\circ$.	124
Figura 6. 19: Diferencia de Morfología de los poros en las diferentes capas.	125
Figura 6.20: Defectos en la Corrida 11.	126
Figura 6.21: Mecanizado de las entallas en el CAC.	132
Figura 6.22: Curvas de carga vs. Desplazamiento para cada corrida.	133
Figura 6.23: Gráfico de Barras de Carrera Máxima para cada corrida.	134
Figura 6.24: Gráfico de Barras de Tensión Máxima para cada corrida.	135
Figura 6.25: Fotografías de los casos más extremos de tendencia a abrirse o cerrarse de los tubos, según como sean los <i>Momentos Residuales</i> presentes al momento de liberarse las <i>Deformaciones Residuales</i> mediante el método del corte.	137

Figura 6.26: Perfiles de las <i>Tensiones Residuales</i> de σ_z.	139
Figura 6.27: Perfiles de las <i>Tensiones Residuales</i> de σ_y.	140
Figura 7.1: Gráfico de Pareto del DOE de % Fibra. Arriba-Izquierda: Gráfico de Pareto. Arriba-Derecha: Gráfico de Daniels. Centro-Izquierda: Residuos vs. Orden. Centro-Derecha: Probabilidad normal de residuos. Abajo: Gráfico de Pareto del mejor ANOVA.	145
Figura 7.2: Gráficos de Pareto del DOE de % Resina. No se ve un factor dominante claro respecto del % de resina.	147
Figura 7.3: Gráficos de Pareto del DOE de % Poros.	149
Figura 7.4: Gráficos de Interacción de factores del DOE de % Poros.	150
Figura 7.5: Gráficos de Pareto del DOE de Tensión máxima. Observar las líneas de tendencia rojas y verdes, que permiten concluir que finalmente los factores D y C son los que más efecto tienen en la resistencia máxima obtenida en el ensayo.	152
Figura 7.6: Gráficos de Pareto del DOE de Deformación máxima.	154
Figura 7.7: Gráficos de Pareto del DOE de Deformaciones Residuales.	155
Figura 7.8: Deformaciones Residuales obtenidas mediante 3 diferentes métodos.	157
Figura 7.9: Gráficos de comparación de Deformaciones y Tensiones Residuales.	158
Figura A.2.1: Convención de las direcciones de los ejes coordenados locales para un Material ortotrópico (lámina reforzada con fibras unidireccionales). Adoptado de (Barbero, 2011).	166
Figura A.2.2: Pestaña de “Desarrollador” en Visual Basic.	177
Figura A.2.3: Acceso a los códigos utilizados en este proyecto utilizando Formularios avanzados de Word y Visual Basic.	178
Figura A.4.1: Cámara de control de temperatura multipropósito.	232
Figura A.4.2: Cámara de control de temperatura multipropósito: Detalle del motor y acoplamiento al eje.	233

Símbolos

Alfabeto griego:

α_A	Coeficiente de Expansión Térmica Longitudinal de las fibras.
α_{ij}	Coeficiente de Expansión Térmica en la dirección ij.
α_T	Coeficiente de Expansión Térmica Transversal de las fibras.
δ	Desplazamiento.
ε	Deformación Residual.
θ	Angulo de bobinado en Enrollamiento Filamentario.
κ	Conductividad Térmica.
μ	Valor promedio.
ν_{12}	Relación de Poisson en el plano.
ν_{23}	Relación de Poisson interlaminar.
ν_A	Relación de Poisson longitudinal de las fibras.
ν_f	Relación de Poisson de las fibras.
ν_m	Relación de Poisson de la matriz.
ν_T	Relación de Poisson transversal.
ρ	Densidad.
σ_y	Tensión Residual en la Dirección Y.
σ_{yz}	Tensión Residual en la Dirección YZ.
σ_z	Tensión Residual en la Dirección Z.
τ	Residuo.
Φ_{ij}	Coeficiente de la matriz Rigidez reducida en la dirección ij (coordenadas x,y,z del tubo).

Alfabeto occidental:

a	Radio interior de la sección.
A_{ij}	Rigidez a la extensión en la dirección ij.
b	Radio exterior de la sección.

C	Calor Específico.
CET	Coeficiente de Expansión Térmica.
cm	Centímetros.
CM	Cuadrados medios.
cos	Coseno.
D_{ij}	Rigidez a la flexión en la dirección ij.
E_x^b	Módulo elástico de flexión en la dirección X.
E₁	Modulo de Young longitudinal.
E₂	Modulo de Young transversal.
E_A	Modulo de Young longitudinal de las Fibras.
E_f	Módulo de Young de las fibras.
E_m	Módulo de Young de la matriz.
E_T	Modulo de Young transversal de las Fibras.
F₀	Estadístico de prueba de la distribución F en un ANOVA.
g	Gramos.
G₁₂	Modulo de Corte en el plano.
G₂₃	Modulo de Corte interlaminar.
G_A	Modulo de Corte longitudinal de las Fibras.
G_f	Módulo de Corte de las fibras.
G_L	Grados de libertad.
G_m	Módulo de Corte de la matriz.
GPa	Gigapascuales.
G_T	Modulo de Corte transversal de las Fibras.
h	Horas.
H₀	Hipótesis nula.
H_A	Hipótesis alternativa.
hh:mm	horas : minutos.
i	Índice de la dirección i.
in	Pulgadas.
j	Índice de la dirección j.
J	Joules.

k	Factor de la galga extensométrica.
kg	Kilogramo.
K_m	Modulo de compresibilidad volumétrica de las fibras.
l₀	Longitud de la galga extensométrica.
m	Metro.
M	Momento residual por unidad de ancho.
m³	Metro cúbico.
min	Minutos
mm	Milímetros.
MPa	Megapascuales.
N	Parámetro geométrico para calcular Tensiones Residuales.
°C	Grados centígrados.
p	Valor p.
Q_{ij}	Coeficiente de la matriz Rigidez reducida en la dirección ij (coordenadas 1,2,3 de la lamina).
r	Radio-vector.
R	Resistencia.
R²_{aj}	Valor R-Cuadrado ajustado.
R²	Valor R-Cuadrado.
s	Segundos.
SC	Suma de cuadrados.
sin	Seno.
t	Espesor del tubo compuesto laminado.
T_g	Temperatura de transición Vítrea.
t_k	Espesor de la capa.
U_A	Tensión de alimentación del puente de Wheatstone.
V₀	Tensión de salida del puente de Wheatstone.
V_f	Volumen relativo de fibras en el compuesto.
V_m	Volumen relativo de matriz en el compuesto.
z'_k	Coordenada de la capa k.

Abreviaturas

ANOVA	Análisis de Varianzas (Analysis of variance).
ARAS	Antena radar de apertura sintética.
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).
CAC	Centro Atómico Constituyentes.
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica.
DOE	Diseño de experimentos (Design of Experiments).
EF	Enrollamiento Filamentario (Filament Winding).
FC	Fibra de Carbono.
MC	Método del corte (Split Method).
MFG	Método de flexibilidad de grietas (Crack Compliance Method).
MMP	Modelo de la Microestructura Periódica.
PAN	Poliacrilonitrilo.
RM	Regla de las Mezclas.
RPM	Revoluciones Por Minuto.
TCL	Teoría Clásica de Laminados.
Tg	Temperatura de Transición Vítrea.
TR	Tensiones residuales.

Capítulo 1:

Introducción

Las tensiones residuales (TR) pueden llegar a comprometer la vida útil de un componente estructural si no son tenidas en cuenta a la hora del diseño mecánico. Junto con las tensiones debidas a las sollicitaciones externas (fuerzas, momentos, aceleración gravitatoria, aceleraciones en general, vibraciones, etc.) someten a la estructura a esfuerzos que pueden provocar su falla. En particular, interesa cuantificar las TR de tubos de materiales compuestos de Fibra de Carbono (FC) y Matriz Epoxica, fabricados mediante la técnica de Enrollamiento Filamentario (EF).

1.1 Objetivos generales.

El presente trabajo tiene como objetivo cuantificar las TR existentes en tubos de materiales compuestos. Específicamente, de tubos de materiales compuestos fabricados mediante EF. Esto se hace con el objeto de diseñar correctamente este tipo de tubos, teniendo en cuenta no solo los esfuerzos debido a sollicitaciones externas, sino también los esfuerzos debido a las TR de fabricación y curado.

1.2 Objetivos particulares.

- Adquirir experiencia en el manejo de la máquina de EF.
- Aprender procedimientos de medición y de ensayos, usando normativa adecuada.
- Adquirir más práctica en el modelizado mediante elementos finitos.
- Aprender, a partir de la bibliografía existente, a entender los enfoques teóricos utilizados por otros investigadores de la misma problemática.

1.3 Estado de Arte.

De los trabajos previos referentes a la medición de tenciones residuales podemos citar los siguientes:

- Cohen, y M. Schlottermüller et. al, realizaron estudios similares al investigar las variables de fabricación y diseño que afectan la calidad, resistencia y rigidez de recipientes fabricados de un material compuesto. Se evaluaron variables tales como tensión de bobinado, secuencia de apilamiento, gradiente de tensión de bobinado, tiempo de bobinado y temperatura del mandril. Las respuestas a medir fueron por ejemplo la Resistencia circunferencial de los tubos, la Rigidez circunferencial, la distribución de la fracción de volumen de fibras y poros a través del espesor, las TR y la resistencia al corte interlaminar. El diseño de experimentos de ambos estudios fue fraccionado, con diseño factorial $\frac{1}{4}$. El análisis de las Respuestas encontró que la resistencia del compuesto se veía significativamente afectada por la secuencia de apilado del laminado, la tensión de enrollado, el gradiente de tensión de enrollado, el tiempo de enrollado y la interacción entre el gradiente de tensión de enrollado y el tiempo de enrollado. El mecanismo que aumentó la resistencia del compuesto se relacionó con la fuerte correlación entre el volumen de la fibra en el compuesto y la resistencia del recipiente. Los cilindros con un alto volumen de fibra en las capas circunferenciales tendían a ofrecer una alta resistencia de la fibra. Véase ([Cohen, 1997](#)) y ([M. Schlottermüller et al., 2004](#)).
- P. Casari et al. realizó una interesante comparación entre variables experimentales y un modelo teórico simplificado. Midió las TR mediante los métodos de perforación de agujeros (hole drilling), el método de remoción de capas (layer removal method) y el método de flexibilidad de grietas (MFG; crack compliance method). Según este estudio, la comparación entre los resultados experimentales y el modelo presenta un buen acuerdo ([P. Casari et al., 2006](#)).

- J. W. Kim & D. G. Lee fabricaron tubos de compuesto fabricados mediante prepregs prensados empleados en toberas de cohetes. Estudiaron las TR en compuestos utilizando el método del corte junto con galgas extensométricas (strain gages) para medir la deformación residual producida por dichas tensiones. Para calcular las TR, emplearon el método de cálculo en el que se basa la presente tesis ([J. W. Kim & D. G. Lee, 2005](#)). Posteriormente C. Kang et. al. fabricaron tubos de fibra de vidrio/epoxy mediante EF y contrastaron su propuesta de modelo teórico de predicción de TR frente a tubos a los que se realizó el método del corte y el método de cálculo empleado también en esta tesis ([C. Kang et al., 2018](#)). Por último, Seif M. A. fabricó tubos del sistema grafito/epoxy mediante EF y midió las TR con el método del corte, usando el mismo método de cálculo. La novedad de su propuesta es que utilizó un Análisis mediante imágenes para medir las deformaciones, resaltando las ventajas de esta técnica frente al uso de galgas extensométricas ([Seif M.A., 2002](#)).
- S. Akbari et al. realizó una comparación entre dos métodos de medición de TR: el Método del corte (MC; Slitting Method) y el Método de flexibilidad de grietas (MFG; Crack Compliance Method). Los resultados de tensión obtenidos de los dos métodos siguieron la misma tendencia con respecto al grosor del anillo y condujeron a una fuerza y un momento de flexión idénticos. Pero los valores máximos y mínimos de las TR circunferenciales fueron significativamente diferentes ([S. Akbari et al., 2012](#)).
- Una compilación muy importante respecto a TR en Materiales Compuestos se puede encontrar en el libro de Shokrieh. Es un resumen con referencias a varios trabajos de investigación sobre TR en materiales compuestos. ([Shokrieh, M.M., 2014](#)).

1.4 Metodología de trabajo.

La fabricación de los tubos se realizó variando solamente algunos de los parámetros seleccionados (Tensión durante el proceso de enrollamiento, Gradiente angular entre

pasadas, Tiempo total del proceso de enrollamiento, Grosor de las capas y Temperatura de la Batea), siguiendo la metodología estadística de diseño de experimentos. Se mantuvieron constantes los parámetros relativos a la geometría del tubo (largo y diámetro interior), materiales de la fibra y de la matriz y ciclo de curado, entre otros parámetros de fabricación. Una vez fijado estos parámetros (llamados Variables en el método estadístico del Diseño de Experimentos), se procedió a fabricar las diferentes tandas de tubos. Se utilizó un Diseño de Experimentos fraccionado de factorial $\frac{1}{4}$: un total de 8 experimentos con tubos diferentes con distintos apilamientos y configuraciones. Luego de la fabricación de los tubos, se procedió al curado de los tubos. Y finalmente, al corte para la medición de las TR, ensayos de tracción (mediante la norma [ASTM D 2290](#)) y medición del volumen de fibra, resina y poros.

En cuanto a las TR, los dos procesos principales de creación de TR suceden durante la fabricación y durante el curado. Para medir estas TR, se tuvo que seleccionar entre diversos métodos. Estos métodos disponibles para la medición de TR, son muchos y muy variados, dividiéndose en dos grandes grupos: métodos destructivos (o también llamados métodos de relajación) y métodos no destructivos. En el trabajo se seleccionó el método del corte, dado que el autor consideró más adecuado, teniendo en cuenta diversos factores limitantes en cuanto a presupuesto, experiencia, facilidades, instalaciones y equipos propios y de terceros disponibles en el Centro Atómico Constituyentes (CAC).

Estos métodos de medición de TR (MC) junto con la obtención de la Resistencia Circunferencial de los tubos, medición de su Geometría (parámetros de calidad), medición del porcentaje de fibra, medición del porcentaje de resina y medición del porcentaje de poros son las Respuestas a medir mediante el método del Diseño de Experimentos.

1.5 Hipótesis adoptadas.

Las Respuestas obtenidas se compararon con un modelo analítico sencillo de estimación de las TR. Además, se validaron (o rechazaron) las siguientes hipótesis:

- Es diferente el porcentaje de fibra para cada corrida.
- El gradiente de TR es máximo cuando más varía el ángulo entre capas sucesivas.
- El espesor de las capas no influye en el gradiente de TR.

1.6 Contenido.

El [Capítulo 1](#) presenta una breve Introducción al trabajo de la tesis: los objetivos, estado de arte, los métodos empleados y las hipótesis adoptadas.

El [Capítulo 2](#) da una introducción muy breve de los materiales compuestos y sus procesos de fabricación y resume las propiedades de la materia prima utilizadas (las propiedades mecánicas y físicas, tanto de las FC como de la matriz) y las propiedades mecánicas elásticas de los materiales compuestos que predicen los modelos de la Regla de las Mezclas (RM) y el Modelo de Microestructura Periódica (MMP). Describe también el ensayo de Resistencia a desarrollar en la presente tesis.

El [Capítulo 3](#) describe la fabricación de Tubos compuestos mediante el método de EF. Por último, que pasos deben seguirse para configurar adecuadamente la máquina de EF y la obtención del Código G para fabricar el tubo según los patrones requeridos. Una vez obtenido el Código G, se monta el mandril, se coloca la fibra en el devanador y la resina en la batea y comienza el proceso de fabricación del tubo. Una vez obtenido el tubo, el mismo es curado en el autoclave según un ciclo determinado. Se describe también diferentes técnicas empleadas en cuanto a la fabricación de los tubos.

El [Capítulo 4](#) desarrolla con más profundidad el marco teórico de las TR en general, y de las TR en materiales compuestos en particular. Describe brevemente los métodos de medición de TR. Describe también el método del Corte empleado en el presente trabajo, y cómo se calculan las **Tensiones Residuales** a partir de las **Deformaciones Residuales**. También se desarrolla un modelo predictivo teórico a partir de la Teoría Clásica de Laminados (TCL) para determinar las TR.

El [Capítulo 5](#) describe el Diseño de experimentos (DOE) llevado a cabo para determinar la cantidad de experimentos y las variables a medir en el mismo. Se realiza un análisis detallado del cálculo de cada Respuesta para facilitar el análisis de la influencia de los parámetros. Se explica por qué se decidió a partir de un DOE de 16 tubos a uno de 8 tubos.

El [Capítulo 6](#) presenta los resultados experimentales obtenidos. Se muestran los resultados correspondiente a los exámenes habituales de calidad de los tubos. Luego se explica el método para la obtención de las Micrografías que luego se utilizan para determinar

el porcentaje de fibra, resina y poros. Finalmente, se muestran los resultados pertenecientes al ensayo [ASTM D 2290](#) y al Método del Corte (MC) para la obtención de las TR.

El [Capítulo 7](#) presenta las Conclusiones referentes a los resultados experimentales obtenidos. Se realiza el Análisis de Varianza (ANOVA) correspondiente a cada respuesta y se determina que variables inciden más en las diferentes respuestas. El Capítulo culmina con las conclusiones pertinentes.

En los Anexos se encuentra información teórica complementaria y cálculos, para que no interrumpa el flujo de lectura del este trabajo. Se encuentran en forma detallada información técnica de la resina y el endurecedor utilizados ([Anexo 1](#)); las fórmulas utilizadas para realizar los cálculos de las constantes ingenieriles según los modelos RM y MMP junto con su evaluación directa utilizando Visual Basic ([Anexo 2](#)); las micrografías utilizadas para determinar el volumen de fibra, resina y poros ([Anexo 3](#)); una propuesta para un dispositivo que permite tanto calentar el mandril así como realizar el curado en el mismo, siendo apto para ensamblar la instrumentación correspondiente para hacer un estudio de **Tensiones Residuales** on-line ([Anexo 4](#)).

Capítulo 2: Materias Primas y Propiedades Físicas y Mecánicas

El presente capítulo realiza una breve descripción de los materiales compuestos y sus métodos de fabricación. A continuación presenta las materias primas utilizadas en el presente trabajo (la FC y la matriz epóxica elegidas) y sus propiedades térmicas y mecánicas. Finalmente, se describe como predecir las constantes ingenieriles que luego servirán para calcular las correspondientes TR según los modelos de la Regla de las mezclas (RM) y el Modelo de la Microestructura Periódica (MMP).

2.1 Generalidades sobre materiales compuestos.

Un material compuesto está formado por la combinación de dos o más materiales distintos para formar un nuevo material. Si el mismo es correctamente diseñado y procesado, se pueden obtener propiedades mejoradas respecto de los materiales originales por separado. Los compuestos más comunes son aquellos hechos con fibras fuertes aglutinadas en una matriz. Dicha matriz puede ser de un material metálico, cerámico o un polímero. Material particulado o también escamas (whiskers), se usan como refuerzos, pero no son tan efectivas como las fibras. Las fibras, partículas o escamas también pueden componerse de materiales metálicos, cerámicos o poliméricos ([Barbero, 2011](#)).

Los principales factores que impulsan el uso de compuestos son la reducción de peso, la resistencia a la corrosión y la reducción del número de piezas. Otras ventajas que motivan algunas aplicaciones incluyen transparencia electromagnética, alta resistencia al desgaste, mayor vida útil a la fatiga, aislamiento térmico/acústico, baja expansión térmica, baja o alta conductividad térmica, etc. Lo mas destacable también, en el caso de los compuestos, es que se puede diseñar el material, según sea el requerimiento de estas propiedades, variando los porcentajes de fibra y de matriz, aunque en forma limitada. Los porcentajes de fibra obtenibles dependen fuertemente de los procesos de fabricación ([Jones, 1999](#)).

Se prefiere el refuerzo de fibra porque la mayoría de los materiales son mucho más fuertes en forma de fibra que en su forma a granel (debido a una menor presencia de defectos

intrínsecos del material), y además el refuerzo de fibra provee más resistencia y rigidez que el refuerzo particulado o el refuerzo mediante escamas. En su forma de fibra, la misma presenta propiedades anisotrópicas, es decir que depende fuertemente de la orientación, y en general tiene mejores propiedades mecánicas en la dirección paralela a la de la fibra. Esto se debe a que en el proceso de fabricación, durante la solidificación de la fibra, se logra nuclear la fase sólida de manera unidireccional. En su forma a granel, un material solidifica de manera isotrópica, con lo cuál las propiedades mecánicas también lo son. Esta diferencia en la nucleación de las fibras contribuye a una fuerte reducción en el número de defectos en las fibras en comparación con un sólido a granel.

El material compuesto resultante, es anisotrópico. Esto puede parecer una desventaja en un principio pero:

1. Se puede diseñar el material compuesto resultante, orientándolo favorablemente a la carga estructural a soportar, y obteniéndose una estructura de menor peso frente a los materiales isotrópicos.
2. Se puede, por ejemplo, orientar varias capas de laminado, lográndose lo que se conoce como laminado cuasi-isotrópico, aunque esto conduce a un diseño ineficiente y a un desaprovechamiento de las propiedades del material compuesto.

Por otra parte, por fuertes que sean las fibras, estas no pueden usarse solas (excepto en cables, elementos estructurales que funcionan únicamente a tracción) porque las fibras no pueden soportar compresión o cargas transversales. Por lo tanto, se requiere un aglutinante o matriz para mantener juntas las fibras. La matriz también protege las fibras del ataque ambiental. Por lo tanto, la matriz es crucial para la resistencia a la corrosión del material compuesto ([Barbero, 2011](#)).

La elección del proceso de fabricación depende del tipo de matriz y de fibras, la temperatura requerida para formar la pieza y curar la matriz, y la rentabilidad del proceso. A menudo, el proceso de fabricación es la consideración inicial en el diseño de una estructura con materiales compuestos. Esto se debe al costo, el volumen de producción, la tasa de producción y la adecuación de un proceso de fabricación para producir el tipo de estructura deseada. Cada proceso de fabricación impone limitaciones particulares en el diseño estructural. Por lo tanto, el diseñador necesita comprender las ventajas, limitaciones,

costos, tasas y volúmenes de producción, y los usos típicos de varios procesos de fabricación. En el diseño de una estructura con materiales compuestos, el material se diseña simultáneamente con la estructura. Debido a esta libertad, se pueden diseñar estructuras de alto rendimiento, siempre que el diseñador comprenda cómo se va a producir el material. Los principales procesos de fabricación de materiales compuestos son los siguientes: laminación manual, laminación con pre-impregnados (o pre-pregs), el moldeo mediante bolsas de vacío, el procesamiento en autoclave, el moldeo por compresión, el moldeo por transferencia de resina, el moldeo por transferencia de resina asistida por vacío, la pultrusión y el EF (enrollamiento filamentario, traducido de “filament winding”).

El presente trabajo tiene por objeto estudiar las TR mediante materiales compuestos de FC (polimérico inorgánico) en matriz epóxica (polimérica termoestable) mediante el proceso de EF. El motivo de la elección de estos materiales y estos procesos es debido a que al sector que coordina la investigación interesa el diseño de materiales compuestos para la industria aeroespacial, en la cuál, los materiales compuestos de carbono-epoxi son uno de los materiales más utilizados debido a su alta relación resistencia-peso. En cuanto al proceso de EF, hay varios desarrollos en vista, con lo cual se desea seguir investigando para futuras aplicaciones, no solo en la industria aeroespacial, sino en otros proyectos del sector relativos a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

2.2 Materias primas: propiedades térmicas y mecánicas.

Se presenta a continuación características generales de las materias primas utilizadas en el presente trabajo.

2.2.1 Fibra de Carbono.

La FC elegida para este trabajo es la Toray T-700 S. Es una FC estándar, con propiedades intermedias respecto a su módulo y resistencia. Está formulada especialmente para su trabajo en aplicaciones tales como EF y pultrusión. El precursor de esta fibra es el Poliacrilonitrilo o PAN ([Toray, 2022](#)). A continuación, se profundiza un poco sobre cada una de las anteriores definiciones.

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de FC:

- La FC de alto módulo es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- La FC de alta resistencia es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a tracción.
- El último tipo de FC (la estándar) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la resistencia es buena. Este tipo de FC tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Respecto del tratamiento de las fibras de carbono, las mismas se fabrican mediante pirolisis controlada y ciclación de precursores de cierta fibra orgánica. El más común de los cuales es el precursor PAN y el alquitrán; el primero es una fibra sintética y el segundo se obtiene de la destilación destructiva del carbón. Existe otro precursor de FC que se deriva de materiales provenientes de la celulosa: el rayón.

El PAN es el precursor más común utilizado actualmente para obtener fibras de carbono, y generalmente no es PAN al 100%. Normalmente, es un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico, o cloruro de vinilo. El PAN (o su copolímero) es hilado utilizando la técnica de hilado húmedo (la técnica de hilado fundido se ha desarrollado también para el hilado del PAN) ([A. Miravete, 2007](#)).

La FC es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. También en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas tanto en las fibras de alto módulo como en las de alta resistencia. Por otra parte, las FC son trasversalmente isotrópicas. Esto quiere decir que tienen solamente un eje de simetría ([Barbero, 2011](#)). Esto es debido a cómo se alinean los cristales de grafito cuando se solidifican (Véase [Figura 2.1](#)). Se puede encontrar en el trabajo de Knibbs, una de las primeras investigaciones de estas observaciones para precursores de PAN ([Knibbs, 1971](#)). Los autores Dumanli et al. resumen esquemáticamente como son estos arreglos para precursores de alquitrán o para precursores PAN ([Dumanli et al., 2012](#)). Finalmente, una obra resume en forma completa las más recientes investigaciones sobre las FC, y reproduce

las Figuras de Knibbs ([Morgan, 2005](#)). El autor del presente trabajo realizó una representación conceptual en la **Figura 2.1**. En el caso 2.1.a), la región central de la fibra produce cristales de grafito con orientación isotrópica y las caras externas presentan cristales fuertemente orientados. En el caso 2.1.b), se presentan unos pliegues correspondientes a capas de solidificación en forma de cruz: los cristales de la región central están orientados en una dirección y los cristales cercanos a la superficie externa en la dirección opuesta. En el caso 2.1.c) es parecido al 1.b) pero los cristales se orientan en la misma dirección. Tanto el caso 2.1.a), como el 2.1.b) y el 2.1.c) producen FC Transversalmente Isótropas.

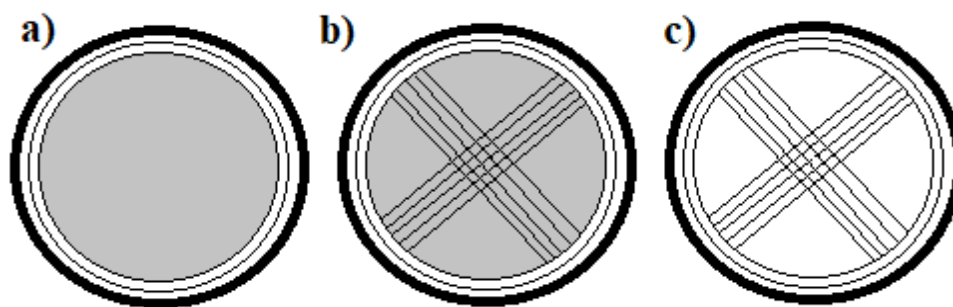


Figura 2.1: Arreglo esquemático de los cristales de grafito. Reproducido de Knibbs (1971).

2.2.2 Matriz Epoxica.

La matriz tiene muchas funciones:

- Mantiene unidas las fibras, transfiriendo así la carga a través de la interfaz a las fibras de refuerzo y al material compuesto desde fuentes externas.
- Lleva algunas de las cargas, particularmente el esfuerzo transversal y el esfuerzo de corte intralaminar.
- Algunas propiedades del material compuesto, como la rigidez transversal y la resistencia al corte, están dominadas por la matriz. Por lo tanto, afectan la selección de la matriz más que las propiedades dominadas por fibra.

Las propiedades de la matriz determinan las condiciones de servicio permitidas para el compuesto, incluido el rango de temperatura, la resistencia química, la resistencia a la abrasión y la capacidad de servicio en la intemperie.

Además, la matriz juega un papel principal en lo que respecta al calor y la conductividad eléctrica del material compuesto, además de dominar las características externas, como la apariencia ([Barbero, 2011](#)).

La resina epóxica utilizada para acompañar a la fibra Toray T-700 S es DER 383 (CAS¹: 25085-99-8). Esta es una resina epoxi compuesta por diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) y el endurecedor que la acompaña es el poli-oxi-propilendiamina (Jeffamine D-230), en una proporción 100/33 en peso. Esta resina tiene propiedades intermedias respecto a la temperatura de utilización, tiene una Tg y resistencia menores que una resina epóxica tipo tetraglicidil metileno dianilina (TGMDA) aunque una mayor elongación a la rotura y una menor capacidad de absorber humedad. Además, es el tipo de resina epóxica más utilizada en la actualidad ([A. Miravete, 2007](#)). La resina elegida es una formulación apta para el proceso de EF y es provista por [KOHLENIA®](#). La ficha técnica de cada componente adjuntas en el [Anexo 1](#).

2.3 Propiedades mecánicas y Físicas.

Con objeto de realizar los cálculos pertinentes al cálculo de las TR de los tubos compuestos, se debe conocer las propiedades mecánicas y Físicas de las fibras y de la matriz, para luego a través de cálculos de la micromecánica, determinar las propiedades de elasticidad del material compuesto. Esto es, determinar las constantes elásticas ingenieriles. Las propiedades de Resistencia del compuesto, en cambio, no pueden obtenerse mediante micromecánica, debido a la poca precisión que produce sus predicciones ([Barbero, 2011](#)). Por eso se complementara el estudio de TR con un ensayo [ASTM D 2290](#) para evaluar la resistencia en la dirección más solicitada por un tubo de presión.

¹ Un número CAS es una designación numérica asignada a las sustancias químicas por el US Chemical Abstracts Service (CAS). Cada número individual permite la identificación inequívoca de una sustancia. Es uno de los métodos más comunes utilizados en el mundo para identificar sustancias.

2.3.1 Propiedades Mecánicas y Físicas de las Fibras de Carbono.

Se presenta a continuación, las propiedades mecánicas ([Tabla 2.1](#)) y físicas ([Tabla 2.2](#)) de las FC. Las propiedades mecánicas de las FC fueron extraídas del trabajo de Yamamoto. En su investigación, determina las propiedades de las FC y del material compuesto resultante mediante la técnica de Espectropía por Resonancia por Ultrasonidos (Resonant Ultrasound Spectroscopy Technique). En su mismo trabajo, compara las constantes ingenieriles halladas con valores experimentales y modelos basados en métodos numéricos, obteniendo resultados cercanos a ambos métodos ([Yamamoto et al., 2018](#)).

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas de elasticidad de la Fibra Toray T700 S.

Propiedad mecánica de elasticidad	Símbolo	Valor	Unidad
Modulo de Young longitudinal	E_A	239,4	GPa
Modulo de Young transversal	E_T	13	GPa
Relación de Poisson longitudinal	ν_A	0,47	---
Relación de Poisson transversal	ν_T	0,17	---
Modulo de Corte longitudinal	G_A	45,4	GPa
Modulo de Corte transversal	G_T	5,6	GPa

Las propiedades físicas que se resumen a continuación, fueron obtenidas de la página web del fabricante ([Toray, 2022](#)):

Tabla 2.2: Propiedades físicas de la Fibra Toray T700 S.

Propiedad Física	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad	ρ	1,8	g/cm ³
Coef. de Exp. Térmica Longitudinal	α_A	-0.38x10 ⁻⁶	1/°C
Coef. de Exp. Térmica Transversal*	α_T	7x10 ⁻⁶ -12x10 ⁻⁶	1/°C
Calor Específico	C	0,752	J/g °C
Conductividad térmica	κ	9,6	J/m·s·°C

* Obtenido de la Tabla 2.1 del trabajo de Barbero ([Barbero, 2011](#)). En este trabajo se adoptará el valor promedio de 9,5x10⁻⁶ 1/°C.

2.3.2 Propiedades Mecánicas y Físicas de la Matriz de Epoxi.

Se presenta a continuación, las propiedades mecánicas ([Tabla 2.3](#)) y térmicas ([Tabla 2.4](#)) de las resina. Las propiedades mecánicas de las FC fueron extraídas del trabajo de Yamamoto ([Yamamoto et al., 2018](#)).

Tabla 2.3: Propiedades mecánicas de elasticidad de la matriz epóxica.

Propiedad mecánica de elasticidad	Símbolo	Valor	Unidad
Modulo de Young	E_m	3,4	GPa
Relación de Poisson	ν_m	0,31	---

Las propiedades físicas que se resumen a continuación, fueron obtenidas de los modelos teóricos en la compilación que realizó Shokrieh ([Shokrieh, M.M., 2014](#)):

Tabla 2.4: Propiedades físicas de la matriz epóxica.

Propiedad Física	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad	ρ	1.25	g/cm ³
Coef. de Exp. Térmica	CET	5.76x10 ⁻⁵	1/°C
Calor Específico	C	1,26	J/g °C
Conductividad térmica	κ	0,24	J/m·s·°C
Temp. de transición Vítrea	Tg	90	°C

2.3.3 Propiedades Mecánicas Elásticas y Físicas del Material Compuesto.

En el presente trabajo no se realiza una caracterización de las propiedades mecánicas elásticas del material compuesto ya que esto resultaría muy costoso y llevaría mucho tiempo. Se evalúan, en cambio, las constantes ingenieriles relativas al material compuesto mediante fórmulas de micromecánica. Esto sirve como base para los cálculos de las TR en las secciones siguientes. Además, se quiere conocer cuál de estas fórmulas ofrece una mejor aproximación si se evalúan las propiedades mecánicas mediante ensayos a futuro. El autor de este trabajo participa de un Departamento de diseño de estructuras en el CAC, y es de utilidad (para trabajos futuros) el cálculo de las propiedades del material compuesto mediante las fórmulas de micromecánica que se determinen más exactas, si se cambia de fibra o de resina. Se realizan ensayos una vez sobre una fibra y resina en particular y se extrapolan los resultados al resto de fibras y resinas, ahorrándose tiempo y dinero en ensayos. Cabe aclarar que para los cálculos relativos a las TR del [Capítulo 6.4](#), se usaron los resultados relativos a la Regla de las Mezclas.

La **Tabla 2.5** resume los resultados de los cálculos micromecánicos para un compuesto de 60% de fibra de carbono y 40% de matriz epóxica (un valor teórico razonablemente alcanzable para un proceso de EF) mediante los siguientes modelos:

- Modelo de la Regla de las Mezclas (RM).
- Modelo de Microestructura periódica (MMP).

Tabla 2.5: Propiedades del material compuesto evaluado mediante fórmulas de la micromecánica².

Propiedad	Símbolo	RM*	MMP**	Unidad
Modulo de Young longitudinal	E_1	145,000	145,023	GPa
Modulo de Young transversal	E_2	8,323	6,094	GPa
Relación de Poisson en el plano	ν_{12}	0,406	0,409	---
Relación de Poisson interlaminar	ν_{23}	0,031	0,415	---
Modulo de Corte en el plano	G_{12}	3,111	4,737	GPa
Modulo de Corte interlaminar	G_{23}	4,035	2,491	GPa

* Propiedades evaluadas mediante la Regla de las mezclas ([Jones, 1999](#)).

** Propiedades evaluadas mediante el Modelo de la Microestructura Periódica ([Barbero, 2011](#)).

En el **Anexo 2** se encuentran detalladas las formulas empleadas de cada modelo para una rápida evaluación de las mismas. El lector puede interactuar mediante los botones que están allí si quiere evaluar las propiedades para otra fibra o resina. Su código en Visual Basic³ puede visualizarse siguiendo los pasos del **Anexo 2**.

² En este ejemplo, el volumen de fibra V_f es igual a 0,6. Para cada una de las muestras de los ensayos, se evaluó el V_f de cada una de ellas mediante técnicas micrográficas.

³ Los valores se chequearon con Excel, MATLAB® y Python para verificar que la rutina de Visual Basic funcionara correctamente.

2.3.4 Propiedades de Resistencia Mecánica del Material Compuesto.

Para medir la resistencia del material compuesto no se recurrió a cálculos derivados de las fórmulas micromecánicas debido a que los valores predichos no se ajustan a los valores medidos experimentalmente en su mayoría. Existe un campo activo de desarrollo de modelos más complicados de predicción de las propiedades de resistencia mecánica, pero estos introducen constantes de ajustes experimentales de los mismos ensayos para hacer mas exactos los modelos, con lo cuál pierde el sentido original de tener una fórmula que los prediga ([Barbero, 2011](#)).

El ensayo elegido para medir la resistencia es el ensayo descrito en el estándar ASTM D 2290 “Método de prueba estándar para la resistencia a la tracción aparente circunferencial de tubería de plástico o de plástico reforzado mediante el método de disco partido” ([ASTM D 2290](#)).

Si bien se pueden ensayar las propiedades de la resistencia al corte o la resistencia a la tracción longitudinal, el valor de resistencia más crítico para un tubo de presión es este valor de la Resistencia Circunferencial.

Un esquema del ensayo se muestra a continuación en la **Figura 2.2**: los vástagos hermanados en una máquina de tracción universal tiran en la dirección de A y de B. En C hay un concentrador de tensiones. El mismo puede estar en uno de los lados o en los dos lados (en la figura, respecto del plano XY). En nuestro caso optamos por que sea simple, o sea, de un solo lado, porque la norma así lo permite y aparte que es difícil que las muescas sean colineales en el segundo concentrador respecto del primero. Finalmente, se respetaron los requerimientos dimensionales que se solicitan en la norma, detallados en la **Tabla 2.6**.

Tabla 2.6: Requerimientos dimensionales de las probetas según la norma ASTM D 2290.

Dimensión	Unidades Imperiales	Unidades métricas
Ancho mínimo	0,9 in	22,86 mm
Ancho reducido mínimo	0,55 in	13,97 mm
Diámetro mínimo	0,35 in	8,89 mm

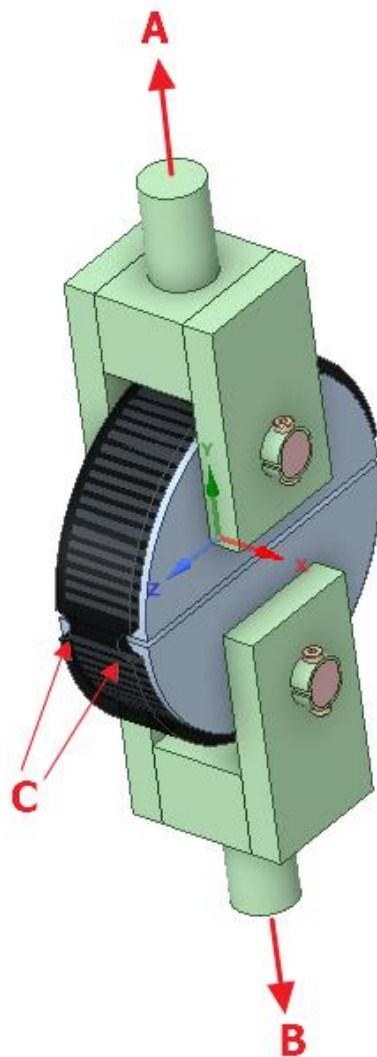


Figura 2.2: Esquema del ensayo de tracción mediante el método de disco partido (ASTM D 2290).

Capítulo 3:

Fabricación de Tubos mediante Enrollamiento Filamentario (EF)

En este capítulo se describe la tecnología relativa al EF, que es el método de fabricación empleada en el presente trabajo. Se describe la configuración general del equipo, la obtención del Código G para que el proceso siga los patrones de laminado preestablecidos y el proceso de fabricación hasta obtener el tubo curado.

3.1 Generalidades sobre Enrollamiento Filamentario (EF).

El EF se caracteriza particularmente por:

- Precisión mejorada en las capas de laminación obtenidas (en comparación con la laminación manual, el moldeo por transferencia de resina y el moldeo conformado por prensa).
- Realización de fracciones de volumen de fibra relativamente altas (alrededor de 0.6 o más).
- Calidad repetible en el producto.

Por lo tanto, para la creación de estructuras avanzadas, el EF parece ser un proceso de producción muy adecuado ([Koussios, 2004](#)).

Hoy en día las máquinas de control numérico han avanzado tanto que todas cuentan con 4 ejes o 5 o 6. Los avances en el control de la máquina dan a los bobinadores la oportunidad de enrollar objetos no cilíndricos y no simétricos y permiten una colocación mucho más precisa de la fibra. Antes las máquinas tenían a lo sumo 3 ejes y usaban aparejos complejos con cadenas para obtener las piezas y el proceso en sí no era nada rápido.

En cuanto a las piezas que se pueden fabricar son muchas y pertenecen a campos muy variados: recipientes a presión esféricos, recipientes a presión toroidales, tubos de presión cilíndricos, cuadros de bicicleta, elevadores de perforación de plataformas petrolíferas de aguas profundas, rotores de alta velocidad, fabricación de artículos deportivos, fabricación de tanques de propano y muchas posibilidades más ([Peters, 2011](#)).

3.2 Descripción de la máquina de enrollamiento filamentario.

El proceso de EF consiste básicamente en enrollar un filamento de fibra (que previamente pasa sobre una batea en la cuál se impregna de resina) en un tubo (o mandril) siguiendo un determinado patrón. En la **Figura 3.1** se ven las diferentes partes de la máquina de EF:

-Parte A: Devanador. Contiene los rollos de fibra que se van a utilizar en el proceso. En este caso de FC. El devanador tiene la capacidad de tener 4 rollos de filamento al mismo tiempo (Véase también la **Figura 3.2**). Debe estar ubicado a 5 metros de la Guía de Rovings, sino se corre el riesgo de que la fibra se resbale sobre el mandril y genere un cilindro con protuberancias.

-Parte B: Guía de Rovings. La Guía de Rovings, tiene 4 canales en donde se puede desviar los hilos que vienen del devanador y redireccionarlos correctamente en su paso por la batea de impregnación (Véase también la **Figura 3.6**).

-Parte C: Batea de impregnación. Posee 4 rodillos, en los cuales se va impregnando los filamentos de fibra con la resina contenida en el. Posee un controlador de temperatura y se regula la cantidad de resina con la Pieza denominada “Doctor Blade” y un cilindro regulable (Véase también la **Figura 3.7**).

- Parte D: Mandril. El mandril es un cilindro de aluminio sobre el cuál se va enrollando la fibra impregnada con resina y está hermanado a la maquina de EF mediante una varilla roscada y tornillos en su tapas. La varilla roscada va girando, trasladando el movimiento giratorio mediante los tornillos en las tapas, mientras que el cabezal de la maquina va haciendo los movimientos pertinentes para generar los diversos patrones (Véase también la **Figura 3.9** y la **Figura 3.11**).

-Parte E: esta parte posee el Mylar. El mismo es un recubrimiento que se coloca al tubo para escurrir el exceso de resina del mismo, previo a su paso por el autoclave para el proceso de curado.

-Parte F: es el armazón de la estructura de la maquina de EF.

-Parte G: el gabinete eléctrico, donde se conecta la máquina a la red y a la PC.

-Parte H: la PC en donde el software Mach3 hace correr las instrucciones del Código G para realizar los movimientos precisos que generan los patrones de la máquina de EF. En este

caso, la máquina cuenta con 4 ejes para controlar los movimientos (aunque para la fabricación de tubos de presión el eje Z se regula pero se mantiene estático en el proceso).

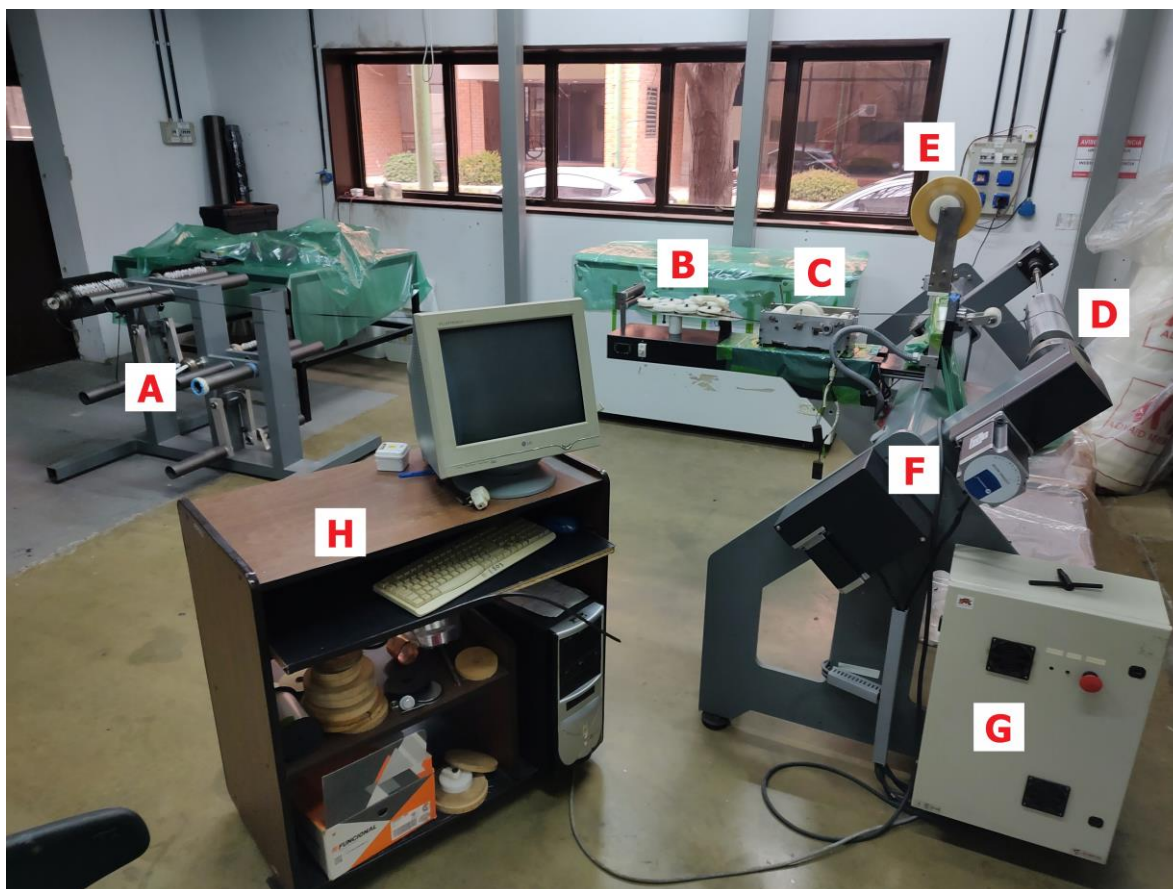


Figura 3.1: Máquina de EF utilizada en el CAC.

A continuación se muestra una imagen con más detalle del devanador (**Figura 3.2**). Se pueden observar los 4 alojamientos para las fibras y el recorrido que hacen las mismas hacia La Guía de Rovings. Con respecto a la Tensión, la misma va a ser un parámetro muy importante de control durante el proceso. En la parte inferior de cada bobina de fibra, está un dispositivo tensador que consiste básicamente en un Freno de Cinta¹, para mantener a las fibras con una tensión adecuada para el proceso. En la **Figura 3.3** se muestra cómo se regula: En la izquierda (Recuadro A) se encuentra una bobina completamente suelta y sin regulación.

¹ Los frenos de cinta son un tipo de freno muy sencillo. Para más información, visitar https://es.wikipedia.org/wiki/Freno_de_cinta.

A la derecha (Recuadro B) se observa a la bobina regulada mediante el tornillos ubicada en la parte inferior. En el recuadro amarillo de la misma figura se encuentra resaltado el tornillo para calibrar la tensión.



Figura 3.2: Devanador de la Máquina de EF.

Para este trabajo, se requerían dos niveles de tensión muy diferentes (Véase [Capítulo 5](#)). Es por eso que la bobina que tenía que estar sin tensión, directamente se le sacaba el freno de cinta y a la otra bobina se la regulaba mediante el tornillo. Fue necesario para esto medir los niveles de tensiones generados. En la [Figura 3.4](#) se muestra cómo se procedía a medir la Tensión:

- 1- Se coloca una galga para medir peso mediante un nudo en la fibra.
- 2-La persona que realiza la medición se aleja en dirección contraria al devanador (en la dirección de la flecha azul).

3-Con esa acción, el brazo inferior va pivotando hasta que llega a la parte superior (realiza el movimiento que se indica con la flecha roja).

4-El movimiento se detiene cuando la fibra (indicada con la línea punteada amarilla), está bien tirante.

5-En ese momento se hace la lectura del instrumento.

En la/s bobina/s que no tenía/n tensión, el resultado de la medición daba $\approx 0,065$ kg. En las bobinas reguladas a alta tensión, el resultado de la medida era de $\approx 1,300$ kg, lo cuál en la práctica se veía que la maquina trabajaba bastante exigida, y además después costaba mucho más retirar el tubo del mandril. En la **Figura 3.5** se muestran los resultados de esas mediciones. En la izquierda está la medición de baja tensión y en la derecha la de alta tensión.

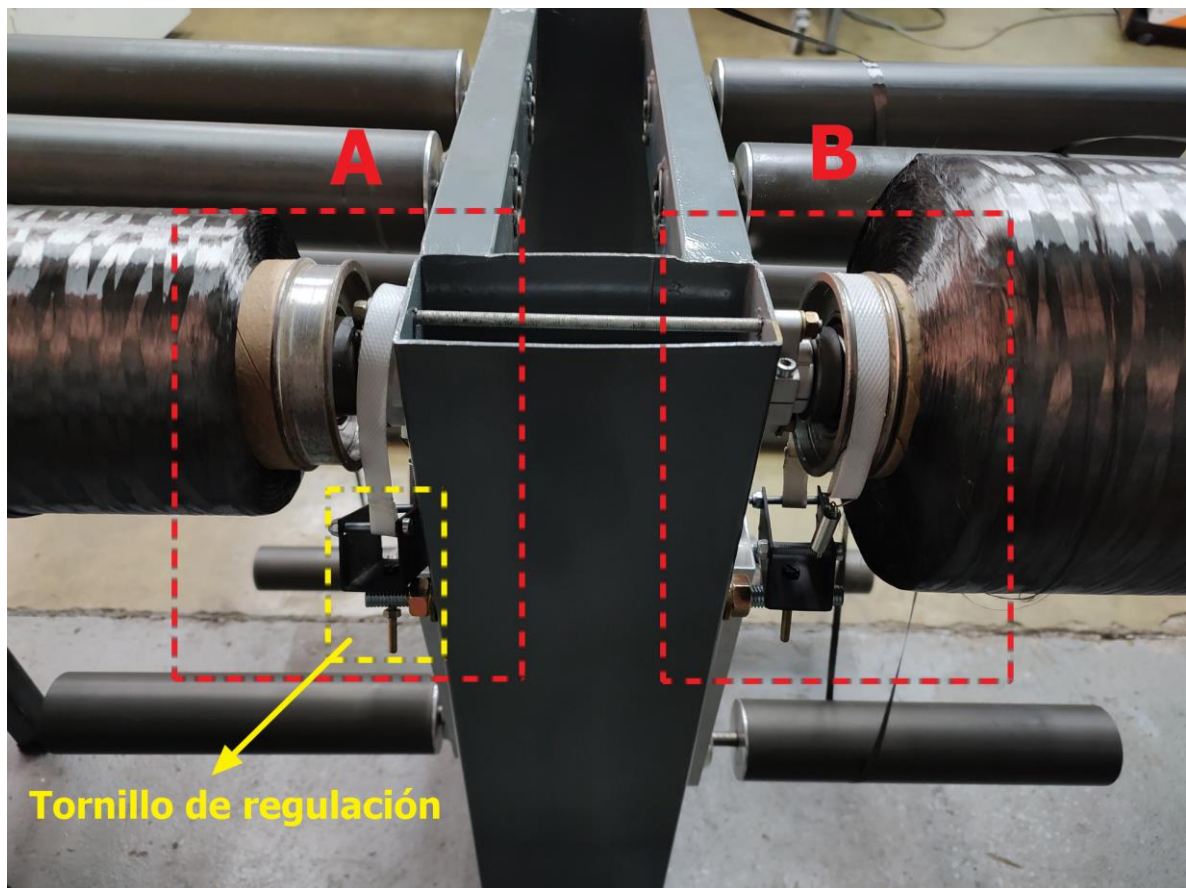


Figura 3.3: Detalle de los Frenos de Cinta del Devanador de la Máquina de EF.

En cuanto a la Guía de Rovings (**Figura 3.6**), la misma se utilizó de manera tal que transporte un filamento o dos filamentos por las razones que se exponen en el **Capítulo 5**, pero como se dijo anteriormente, posee la capacidad de transportar hasta 4 hilos al mismo tiempo. Las líneas punteadas amarillas en la **Figura 3.6** resaltan el recorrido de la fibra.



Figura 3.4: Procedimiento de medición de la Tensión.

La batea de impregnación (**Figura 3.7**), tiene la importante misión de regular cuanta resina se impregna en el proceso y a que temperatura. Lo primero lo consigue gracias al dispositivo llamado “Dr. Blade” (Parte A) y a unos cilindros regulables mediante unos tornillos (Parte B). Lo segundo, mediante un controlador de resistencias (las resistencias se alojan en las partes C y D), en el cuál una termocupla (Parte C) sumergida con la resina de la batea va midiendo la temperatura del líquido y un sistema de control (**Figura 3.8**) va activando o desactivando las resistencias según se necesite calentar o enfriar el líquido en base a una

temperatura preestablecida de control. Junto con la tensión, este también es un parámetro de control establecido en el [Capítulo 5](#).



Figura 3.5: Lectura de la Tensión de la fibra.

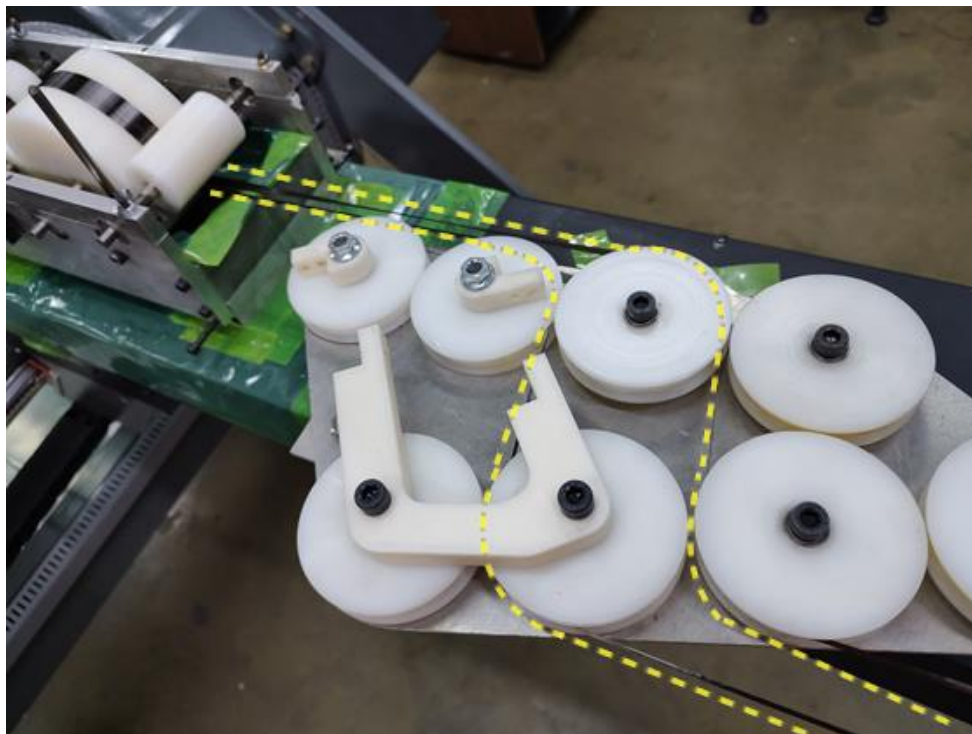


Figura 3.6: Guía de Rovings de la Máquina de EF, transportando dos hilos al mismo tiempo.

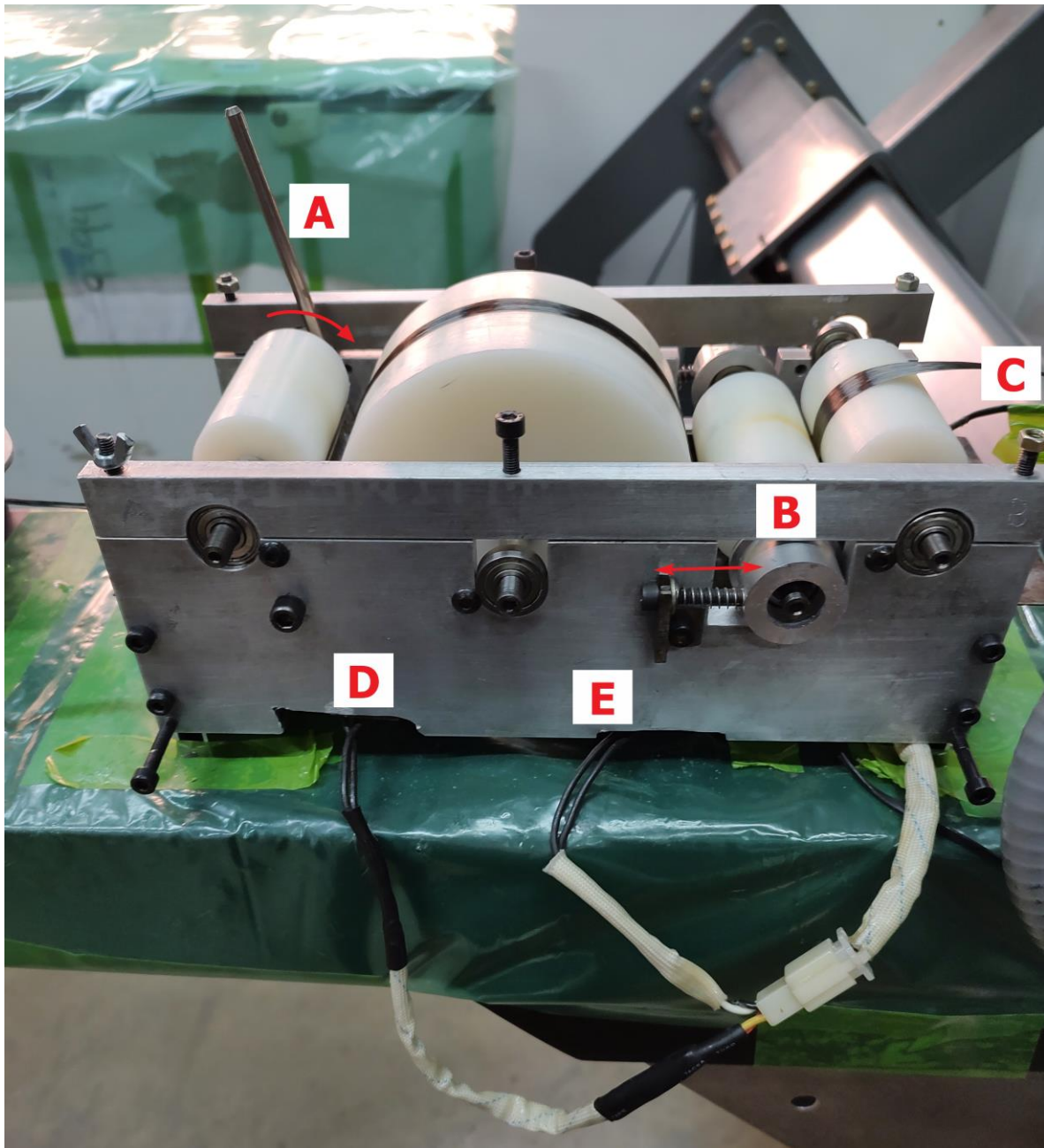


Figura 3.7: Distintas partes de la Batea de la Máquina de EF.

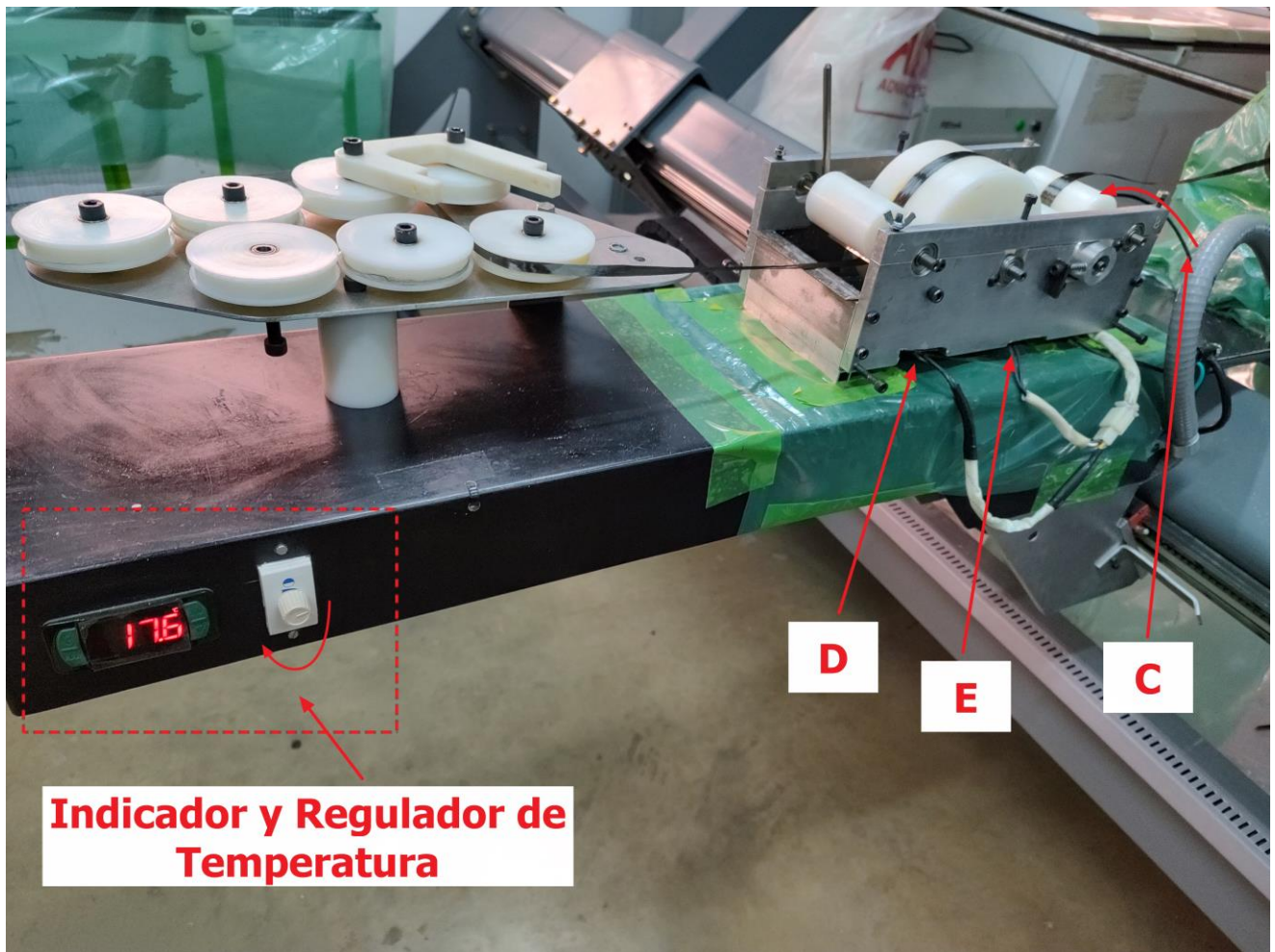


Figura 3.8: Detalles del sistema de control de temperatura de la Batea de la Máquina de EF.

3.3 Movimientos de la máquina de enrollamiento filamentario.

Esta sección es breve pero necesaria para entender qué tipo de movimientos realiza la máquina de EF para hacer los patrones que requiera el tubo de presión compuesto.

Esta máquina en particular consta de 4 ejes que son los siguientes:

-Eje X: Se encarga del movimiento giratorio del mandril. Véase [Figura 3.9](#).

-Eje Y: Se encarga del movimiento de traslación del carro en el sentido longitudinal del mandril. Véase [Figura 3.9](#), en la que entre la fotografía superior y la inferior se denota el desplazamiento realizado.

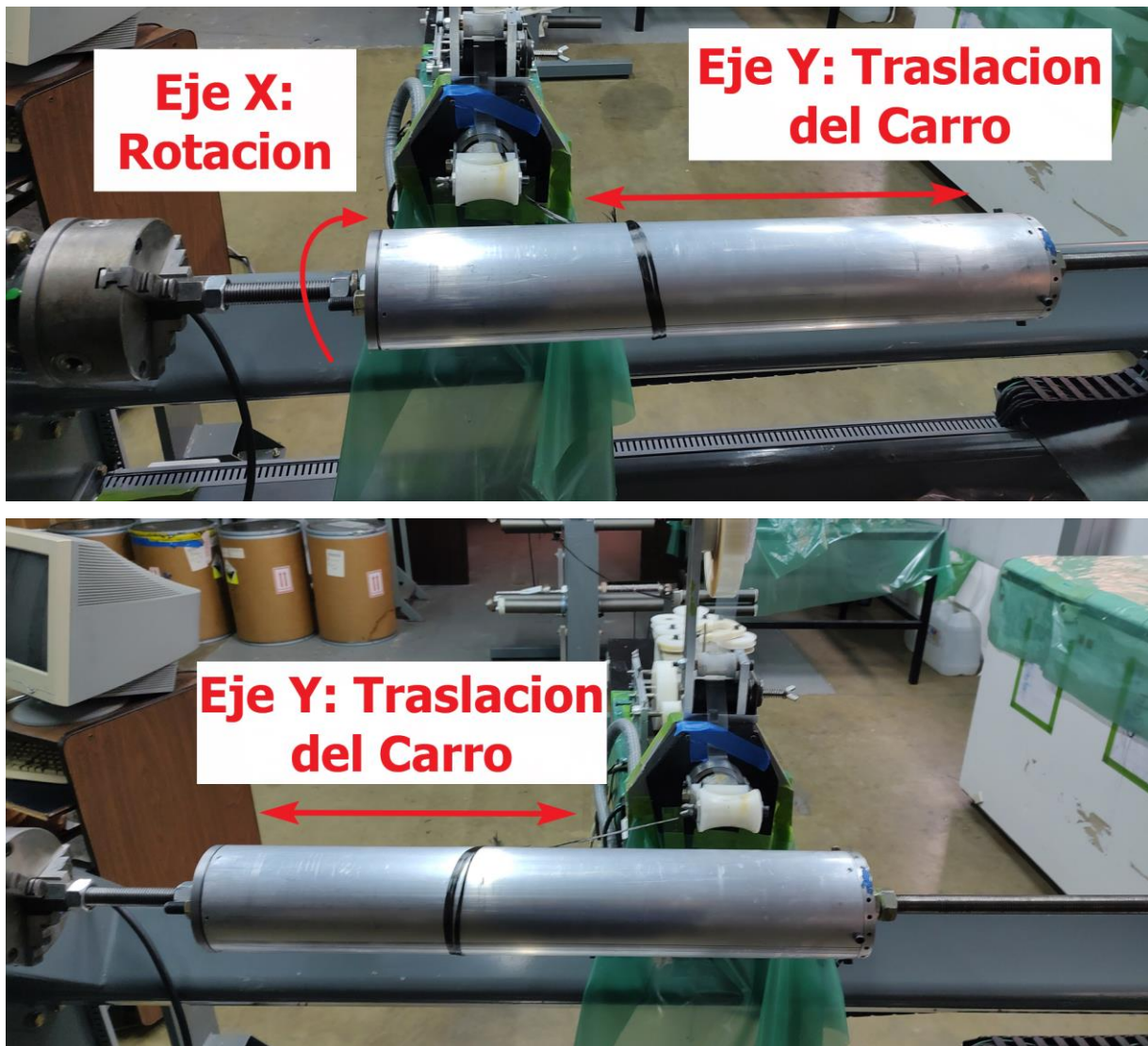


Figura 3.9: Movimiento en el Eje X e Y.

-Eje Z: se encarga de acercar o alejar al ojal del carro respecto del eje del mandril. Véase [Figura 3.10](#). Se aclara que el Eje Z se deja fijo en la práctica para fabricar un cilindro. Sólo es importante su movimiento si se estuviera fabricando un tanque de propano por ejemplo, en la que se necesita que el Eje Z vaya variando su posición durante la rutina del programa que manipula la máquina.

-Eje A: es el movimiento Giratorio del ojal del carro, responsable de dar el ángulo relativo entre la fibra y el eje del mandril. Véase [Figura 3.11](#), en donde cabe destacar en la fotografía superior, el ojal está en un ángulo de 89° y en la fotografía inferior el ojal está en un ángulo

de 45°. No sólo se necesita que el ojal esté convenientemente orientado sino que se necesita una combinación de estos cuatro ejes para hacer todas las combinaciones posibles para fabricar un cilindro de presión.

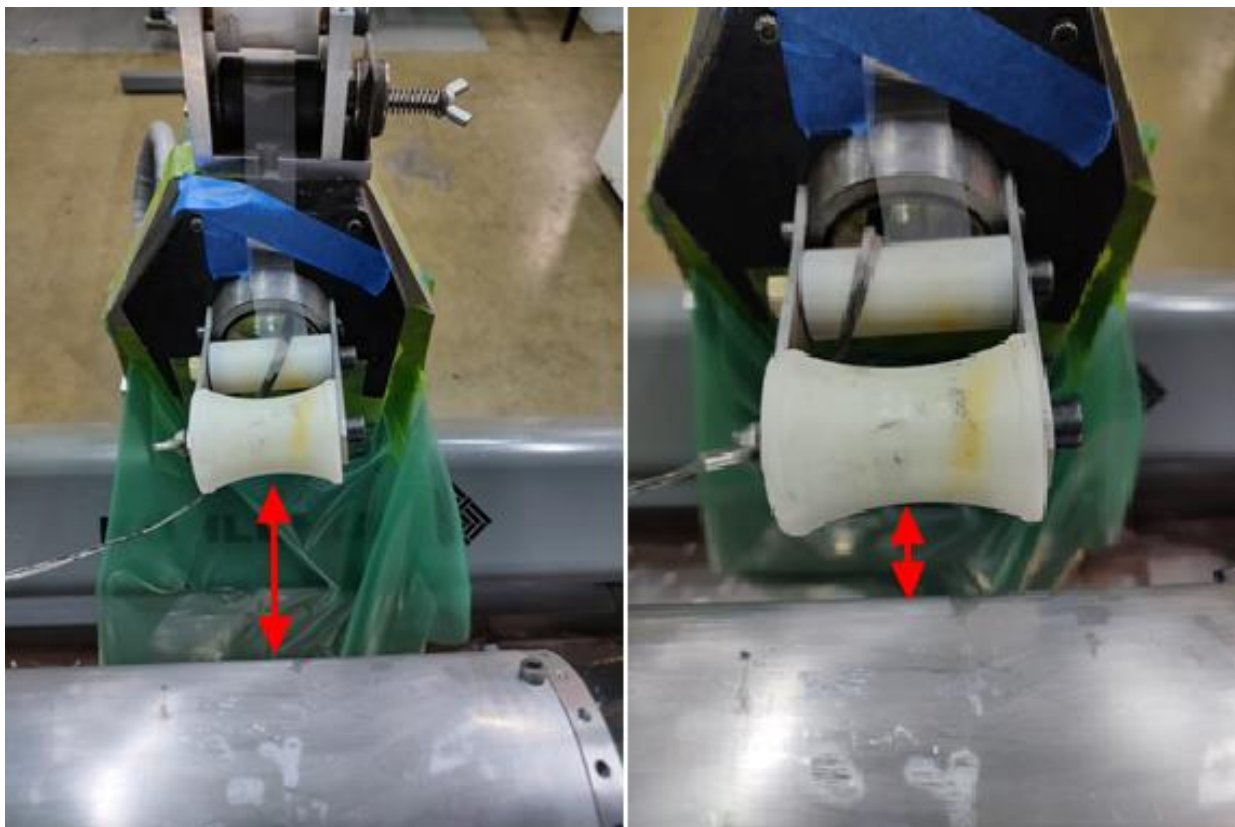


Figura 3.10: Movimiento en el Eje Z.



Figura 3.11: Movimiento en el Eje A.

3.4 Obtención del código G para la fabricación de un tubo enrollamiento filamento.

El Código G contiene las instrucciones mediante las cuáles la máquina de EF realiza los movimientos pertinentes para seguir los patrones preestablecidos. El mismo se obtiene de un software desarrollado por [KOHLENTIA®](#) llamado **Fildwind5**. En la **Figura 3.12** se muestra como completar este software para que el mismo proporcione el Código G. Existe 5 partes principales en las que interactúa el usuario:

- El menú superior (pestaña denominada “File”). Aquí es donde se guarda el proyecto, se genera el Código G o se abre un proyecto preexistente. Véase la **Figura 3.13**.

- Los datos iniciales (en amarillo): parámetros que se deben llenar al comienzo del proceso de generación del Código G. Véase la **Figura 3.14**.

- Los Patrones (en verde): Acá se elige un patrón de entre varias opciones. Véase la **Figura 3.15**.

- El dibujo en 3D del producto final elegido.

- Los parámetros de Proceso (en azul): donde se calculan todos los parámetros restantes en base a la velocidad final del bobinado.

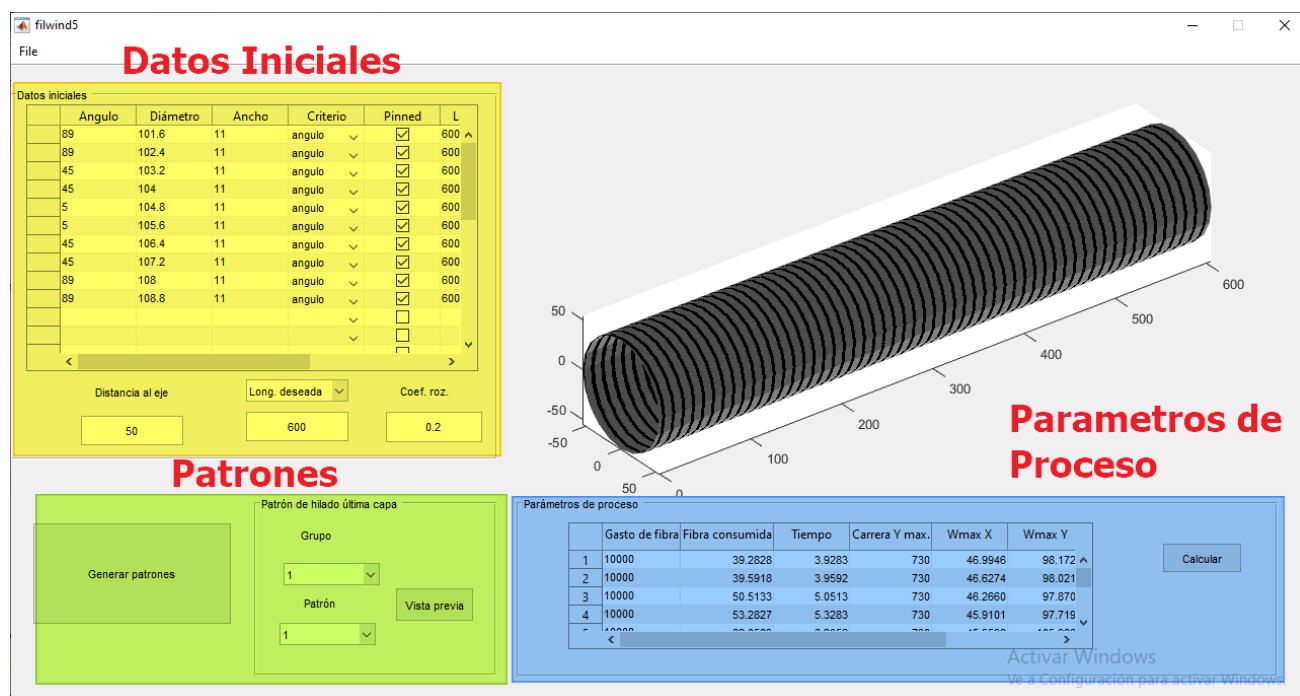


Figura 3.12: Interfaz del Software Filwind5.

A continuación se desglosan cada una de estas partes:

-En “File”, tenemos las opciones de guardar el presente proyecto, con “Save”, lo que me genera un archivo de extensión *.mat* con toda la información del mismo. También, con la opción “Create G-Code” se crea un archivo de extensión *.txt* que es una especie de resumen de los parámetros del proyecto, otro archivo *.txt* con el Código G para correrlo todo seguido, y uno o varios archivos *.txt* más, dependiendo del número de capas. Estos últimos contienen también el código G pero de una sola capa. Esta es la opción que se optó en este trabajo en la parte de fabricación del tubo, ya que para el autor es más cómodo interrumpir la fabricación del tubo para reponer la resina y atender diversas circunstancias que pueden irse presentando a medida que el proceso se va completando. Por último, tenemos la opción de abrir un archivo de un proyecto preexistente con la opción “Open”.

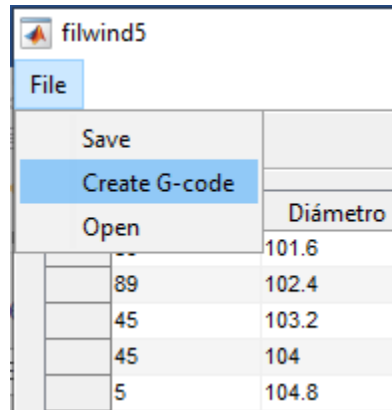


Figura 3.13: Interfaz del Software Filwind5: “File”.

-En la división de los “Datos iniciales” debemos completar la siguiente información del tubo que queremos fabricar:

- El Ángulo de bobinado θ : estos ángulos pueden ir de 5° a 89° (0° sería un ángulo en que la fibra recorre el mandril en forma perfectamente paralela al eje del cilindro, mientras que 90° sería un ángulo en que la fibra está en un plano perfectamente perpendicular a dicho eje). En EF no es práctico hacer un ángulo de 90° , ya que no tendríamos avance. Y para lo que es ángulos bajos, un ángulo inferior a 5° es muy difícil de conseguir. Incluso este ángulo de 5° trajo muchas dificultades para que produzca un patrón prolijo al autor del trabajo. Si bien en este trabajo se trabajó con ese ángulo, se recomienda para futuros trabajos configurar la máquina con un patrón de 10° o 15° que son más sencillos de trabajar.

- Diámetro: el diámetro inicial es el diámetro del mandril (4 in $\approx$ 101.6 mm). Pero capa a capa, como se va depositando material, se tiene que adicional el espesor de la capa. En base a recomendaciones de [KOHLENIA®](#) este espesor lo configuramos en 0,4 mm.

- Ancho: este es el ancho que la fibra va ocupando sobre el mandril. Es importante hacer alguna medición de prueba inicial, porque este parámetro no se conoce a priori ni es obtenible por cálculos. Esto es porque este ancho es el ancho de la fibra “mojada” por la resina, que normalmente es un poco mayor que si la fibra estuviera “seca” (sin resina).

- Criterio: El mismo puede ser o “Ángulo” o “Desfasaje”. Si cortamos una tira del tubo perpendicular al eje, el mismo va a tener una circunferencia, que es π multiplicado por el diámetro que colocamos como parámetro anteriormente. Sin embargo, al hacer las sucesivas pasadas (supongamos N veces), la circunferencia [π *Diámetro] difícilmente sea igual al Ancho efectivo [$\text{Ancho}/\cos\theta$] multiplicado por la cantidad [N] de pasadas. Es por eso que el programa debe realizar una corrección: o corrige levemente el ángulo para que se mantenga la igualdad [π *Diámetro= N*Ancho/cos θ] (criterio llamado “Ángulo”), o permite una pequeñísima superposición entre las fibras, de manera que se cubre todo el mandril, pero respetando a rajatabla el ángulo configurado (criterio llamado “Desfasaje”). El autor de este trabajo prefiere el criterio del ángulo, ya que la otra opción produce una capa levemente mas gruesas e incrementa la posibilidad de existencia de vacíos entre las capas. Para una comprensión más exhaustiva de este concepto, el autor recomienda consultar las obras de Koussios ([Koussios, 2004](#)) y Peters ([Peters, 2011](#)).

- Pinned: Los pines sirven para fijar la posición de la fibra de manera tal que durante el proceso, las fibras no se deslicen sobre el cilindro que se va generando. Es decir, se mantengan lo más posible en su posición teórica. Son más útiles en cuanto más bajo sea el ángulo a seguir por el patrón. Además, al indicarle que el tubo compuesto a realizar es con pines, la longitud de trabajo es más corta (hay menos desperdicios, ya que los extremos siempre se descartan). En este trabajo, todos los tubos se configuraron como “pinned” y todos los tubos tuvieron pines, aunque no los necesitaran, ya que esto era un parámetro de fabricación fijo en cuanto al DOE.

- Distancia al eje: el la distancia del ojal a la superficie del mandril. Se recomienda que sea 50mm o 70mm. En este trabajo se utilizó 50 mm.

- Longitud deseada o Longitud entre pines: Como se dijo anteriormente, los extremos de un tubo fabricado mediante EF siempre se descartan. Esto significa que la parte del tubo que realmente respeta los patrones seleccionados es menor que la longitud bobinada. Podemos configurar el programa entonces de acuerdo a esta “Longitud deseada”, donde el bobinado está tal cual lo requerimos, o podemos elegir la opción “Longitud entre pines”, que simplemente es la distancia de separación entre los pines que colocamos en el mandril. Al trabajar con pines, el autor eligió para realizar el Código G la opción “Longitud entre pines”. Con esta opción se debe tener especial atención frente al hecho de que queda a criterio de uno determinar que porción del mismo tiene la “Longitud deseada” del patrón.

- Coeficiente de Rozamiento: si se tiene un mayor coeficiente de rozamiento, la longitud desperdiciada del tubo será menor, ya que el mismo tiene una mayor fuerza de agarre para seguir la trayectoria geodésica impuesta por el patrón. En este caso, se eligió este coeficiente de rozamiento en base a las recomendaciones de [KOHLENIA®](#). Si se desea una discusión más profunda acerca de la influencia del roce en la trayectoria de los tubos fabricados mediante EF se recomienda la lectura de los trabajos de Koussios ([Koussios, 2004](#)) y Peters ([Peters, 2011](#)).

- Finalmente, el programa por su cuenta calcula la “Longitud útil”, el “Ángulo actualizado” y el “Desperdicio por capa”.

Datos iniciales

	Angulo	Diámetro	Ancho	Criterio	Pinned	L
	89	101.6	11	angulo	☒	560
	89	102.4	11	angulo	☒	560
	45	103.2	11	angulo	☒	560
	45	104	11	angulo	☒	560
	5	104.8	11	angulo	☒	560
	5	105.6	11	angulo	☒	560
	45	106.4	11	angulo	☒	560
	45	107.2	11	angulo	☒	560
	89	108	11	angulo	☒	560
	89	108.8	11	angulo	☒	560
					☐	
					☐	
					☐	

Distancia al eje:
 Long. entre pi.:
 Coef. roz.:

Figura 3.14: Interfaz del Software Filwind5: “Datos iniciales”.

-En la división “Patrones” se generan los diversos patrones posibles. De estos patrones debemos seleccionar el “Grupo” y “Patrón”. Luego se acciona la “Vista previa”, y aparece la representación del tubo.

Surge la cuestión de donde salen los diversos patrones y el porqué de que algunos tubos tienen solo 1 patrón y otros tienen 20, 30 o más. La respuesta está en el concepto Ancho Efectivo. Supongamos que tengo un tubo que tiene el ancho suficiente y el ángulo adecuado como para que en 8 pasadas se cubra todo el mandril. El concepto es el siguiente: luego de la primer pasada de la fibra ¿Dónde va colocada la segunda pasada? Tengo 7 posibilidades. Es decir, que con este tubo tengo 7 posibles patrones. Dados los mismos parámetros iniciales, puedo elegir cualquiera de estos patrones para fabricar el tubo. En este trabajo siempre se eligió el Grupo 1, Patrón 1. Véase la [Figura 3.15](#). En la [Figura 3.16](#) se eligieron convenientemente los parámetros de “Diámetro=80mm”, “Ángulo=45°”, “Ancho=22,21mm” y “Criterio=Ángulo”. Sería la representación gráfica de los diversos patrones del ejemplo anterior.

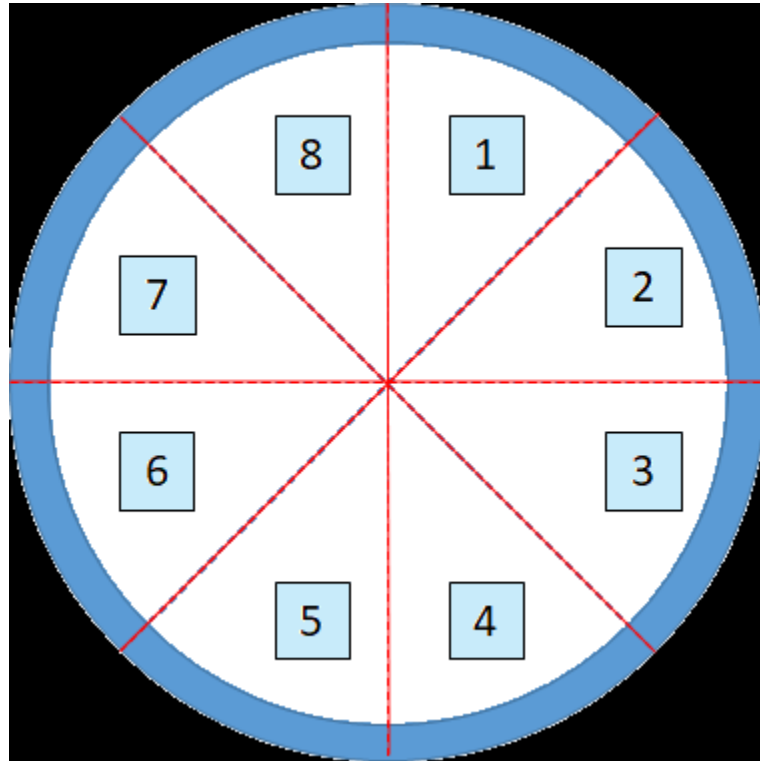


Figura 3.15: Un ancho efectivo que cubre el tubo en 8 pasadas produce 7 patrones útiles.

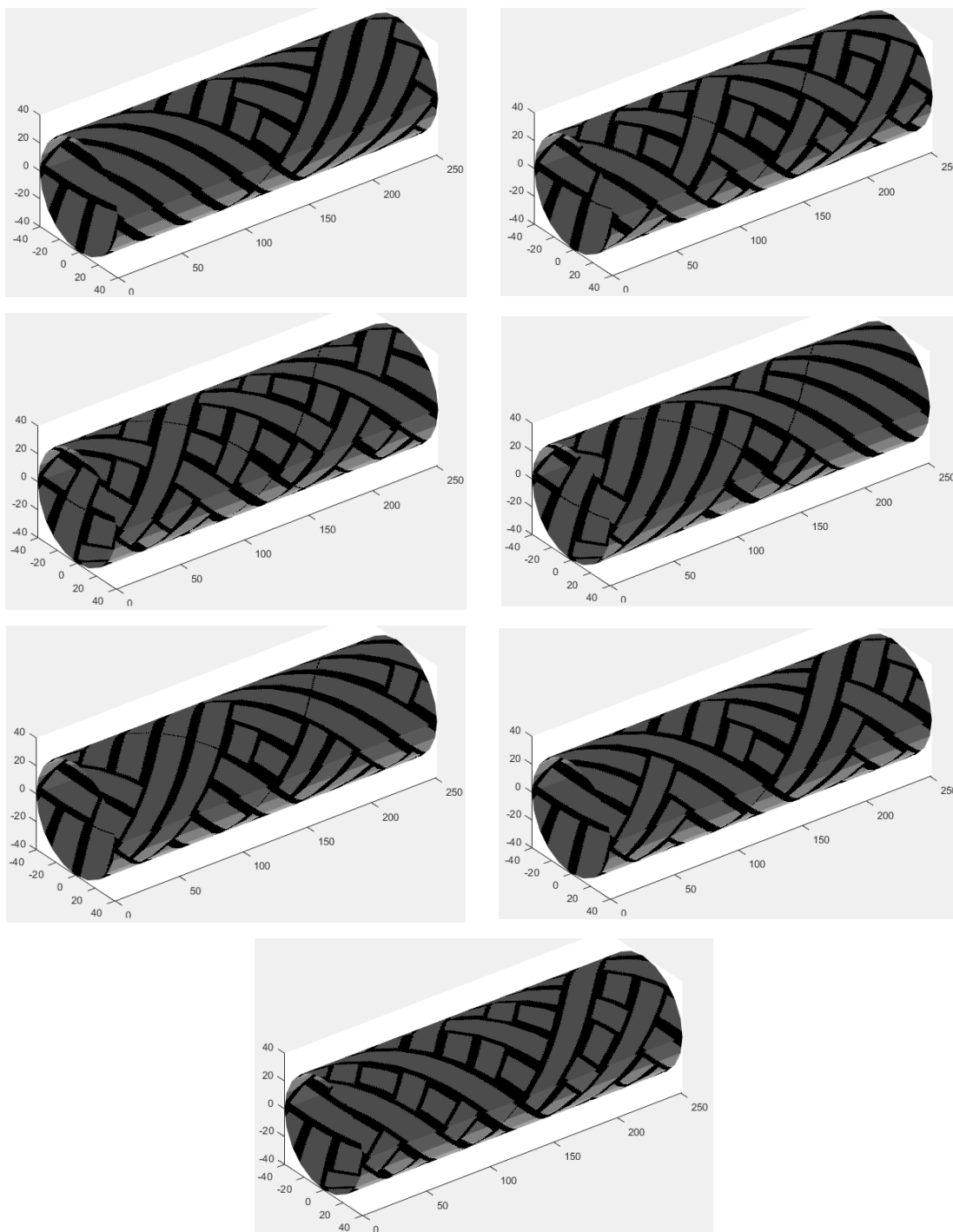


Figura 3.16: Representación en Filwind 5 de un tubo con 7 patrones útiles.

3.5 Preparación de la resina y preparativos preliminares.

Para controlar la aparición de vacíos en la resina, siendo los vacíos, aquellos lugares en el seno del material compuesto que no están llenados ni por fibra ni por la matriz, sino por huecos de aire, se prestó especial atención al vertido de la resina. Hay dos vertidos clave: el vertido desde el contenedor de resina, donde todavía no se ha mezclado con el endurecedor, y luego el vertido de la mezcla sobre la batea de la [Figura 3.7](#).

El efecto del primer vertido se muestra en la [Figura 3.17](#). Se observa la presencia de burbujas sobre la resina (todavía sin mezclar con el endurecedor). Para quitar estas burbujas, se calentaba a baño maría la resina hasta 80°C, se revolvió hasta que se fueran las burbujas, y luego se dejaba enfriar la preparación una hora antes de mezclarlo con el endurecedor. Para las corridas de 5 capas, se preparaban 300 g de resina y 99 g de endurecedor. Para las corridas de 10 capas, se preparaban 500 g de resina y 165 g de endurecedor. Eso se mezclaba, hasta que ya no se distinguiera entre resina y endurecedor, y se colocaba suavemente en la batea, entre capa y capa. Con esa deposición suave en la batea se lograba controlar el segundo vertido. Sin embargo, cabe aclarar, que a medida que la fibra se va impregnando con resina en la batea, se van generando burbujas de aire en el líquido de la batea, por el movimiento entre los rodillos de la fibra y la resina. Es por ello que la presencia de vacíos en el proceso de EF es muy difícil de contrarrestar².

² El vacío actúa (en cuanto a las propiedades mecánicas de un material compuesto) como una tercera fase con una capacidad nula de transporte de cargas mecánicas. El vacío es una propiedad muy influyente en la resistencia al corte interlaminar y la resistencia a flexión y a cualquier otra propiedad mecánica dominada por la matriz. Se pueden llegar a rechazar una pieza con un 1% o 2% de vacíos en la industria aeroespacial, según sea su aplicación ([Peters, 2011](#)).



Figura 3.17: Presencia de burbujas durante el vertido de la resina sobre el recipiente de mezcla (previo a la mezcla con el endurecedor).

En cuanto a los preparativos preliminares, se debe envolver la batea con nylon, y la zona cercana a los extremos del mandril, para evitar que en la varilla roscada queden restos de resina que luego entorpecen la extracción del mandril. También se protejan las bandejas que están debajo del mandril, para no derramar resina sobre el piso de la sala de laminación. Véase [Figura 3.18](#).



Figura 3.18: Protección de diversas partes de la máquina de EF, previo a la fabricación de los tubos.

3.6 Curado de tubos.

Luego de que se realiza el proceso en la máquina de EF, se debe curar la resina. El curado es un proceso exotérmico en el que se termina de completar la reacción:

[Resina] Diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) + **[Endurecedor]** Poli-oxi-propilendiamina (Jeffamine D-230) = **[Matriz epóxica]** DER 383.

Como todo material termoendurecible, disminuye la viscosidad de la mezcla hasta alcanzar el estado líquido y luego sufren una reacción química irreversible (polimerización o curado) en el que las cadenas poliméricas tienen un crecimiento lineal. Luego, estas comienzan a ramificarse y posteriormente a entrecruzarse. A medida que la reacción avanza el peso molecular aumenta rápidamente y varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito. La matriz epóxica alcanza así sus propiedades físicas y mecánicas finales.

El ciclo de curado, es entonces, las condiciones de tiempo y temperatura (con presión o no) que conducen a la obtención de las mejores propiedades posibles. Generalmente, los fabricantes de resina estudian los ciclos y ofrecen un tiempo y temperatura óptimos para el curado. En este caso, nos basamos en el trabajo de David Alejandro Lopez Betancur ([Lopez Betancur, 2022](#)), en cuya tesis se trabajó con el mismo sistema de Resina y Endurecedor. El ciclo se encuentra detallado en la [Figura 3.19](#) y en la [Tabla 3.1](#). En la [Figura 3.20](#) están todos los ciclos de las 10 corridas realizadas en el presente trabajo (los nombres de las corridas se explican en el [Capítulo 5](#)). Se puede observar que las termocuplas registran que se siguió bastante bien el patrón teórico del esquema de curado.

Tabla 3.1: Ciclo del autoclave utilizado.

Descripción	Temperatura [°C]	Tiempo [min]
Inicio	Temp. Amb.	0
Rampa hasta 60°C	60	100
Estabilización a 60°C	60	240
Rampa a 80°C	80	80
Estabilización a 80°C	80	120
Rampa a 100°C	100	80
Estabilización a 100°C	100	120
Enfriamiento en autoclave	Temp. Final	Apertura ³

³ Normalmente se fabricaban los tubos a la mañana; cerca del mediodía se metía en el autoclave; a la mañana siguiente se sacaba del horno. La temperatura del horno siempre estaba encima de la temperatura ambiente.

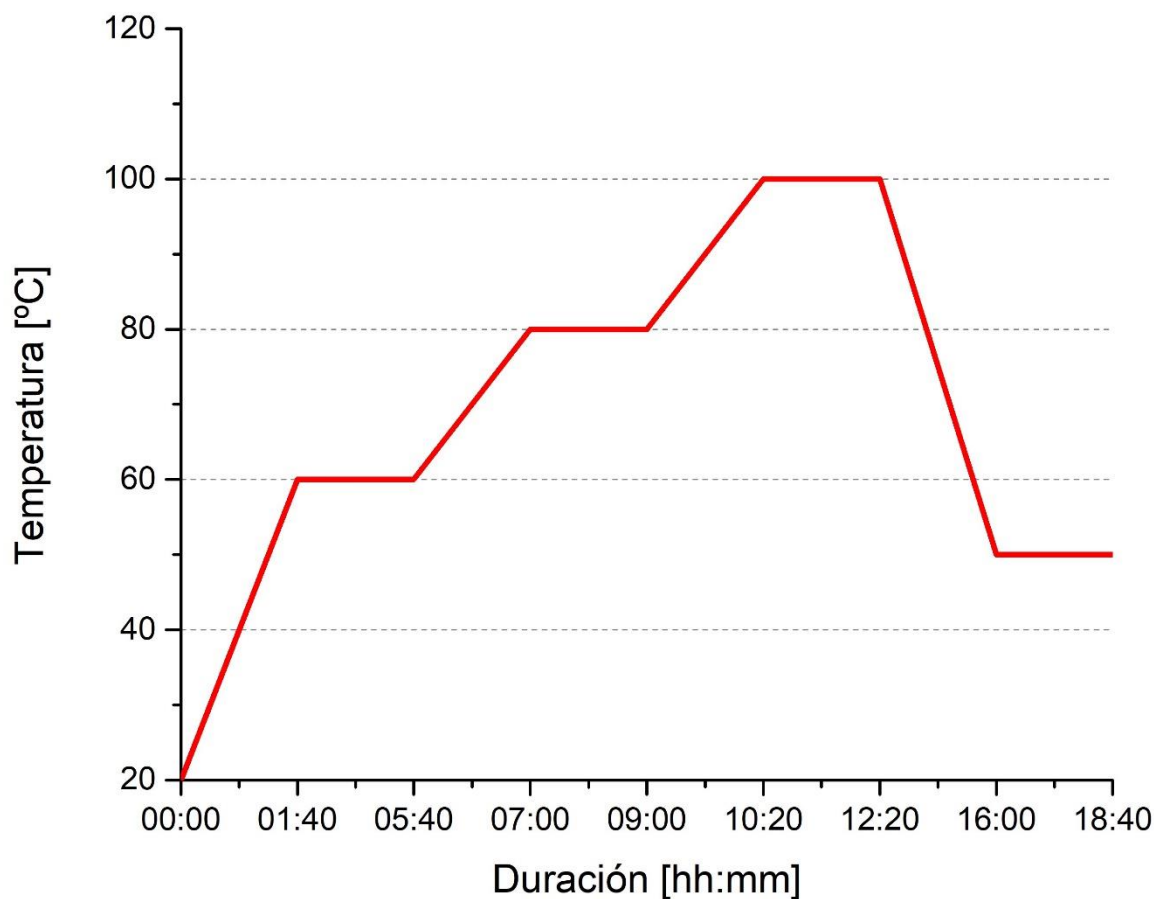


Figura 3.19: Ciclo teórico de curado del autoclave.

3.7 Tecnología de pines.

Durante el transcurso de este trabajo se investigaron diferentes tecnología de pines, los cuales son: pines con tornillos, pines de plástico, pines con alambre y pines con clavos. Como se dijo anteriormente, los pines sirven para mantener fija la fibra para que respeten el patrón seleccionado y acortar también el tubo, generando menos desperdicio. Se investigó entonces cuál tecnología de pines era la más adecuada y la más practica. Se aclara que la utilización de diversos tipos de pines no tiene influencia en los resultados de los patrones, ya que al final la fabricación del tubo y previo a su paso por el autoclave, se colocan unos precintos cerca de los pines, de manera que se mantenga el patrón al iniciarse el curado dentro del horno. Entonces, en el curado se va a mantener el patrón, independientemente de con qué pines se haya fabricado el tubo.

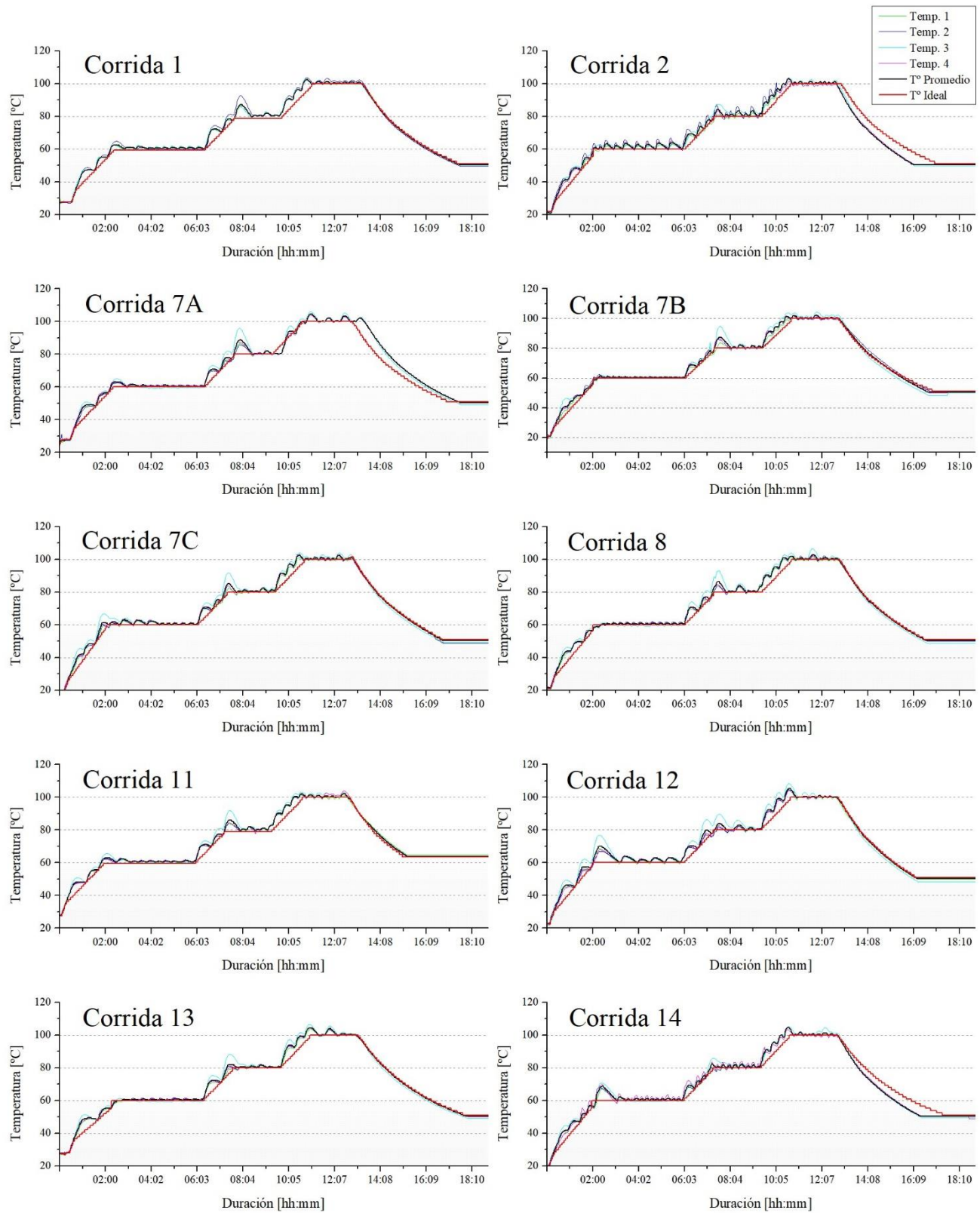


Figura 3.20: Ciclo de curado del autoclave para cada Corrida.

-Pines fabricados con tornillos: al principio se pensó en unos pines gruesos, fabricados a partir de unos tornillos Allen, a las que se sacaba su cabeza y se mecanizaba para que tuvieran una terminación suave en la punta. Se muestra un ejemplo de ellos en la [Figura 3.21](#). Ellos se utilizaron en la mayoría de las pasadas de baja tensión, pero no así en las de alta tensión, ya que tenían el inconveniente de que cortaban la fibra y hacía imposible la fabricación del tubo.

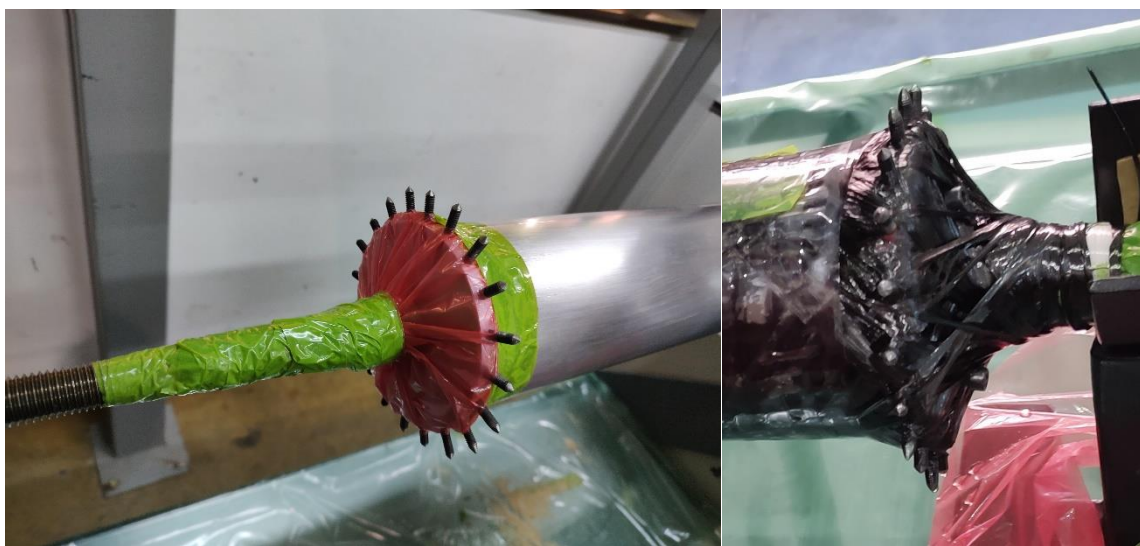


Figura 3.21: Pines de tornillos Allen.

-Pines fabricados con plástico (PET-G): se aprovechó una máquina de impresión 3D del “Departamento de Tecnología de Materiales Compuestos” del CAC para fabricar unos pines de termoplástico PET-G reforzados con fibra. Los mismo funcionaron bien para las corridas en baja tensión, pero se rompían con relativa facilidad en las pasadas a alta tensión. Era el caso contrario al de los pines con tornillos: en un caso, eran tan duros y rígidos, que se rompía la fibra en alta tensión; en el otro caso la fibra rompía los pines al trabajar en alta tensión. Los pines plásticos de muestran en la [Figura 3.22](#).

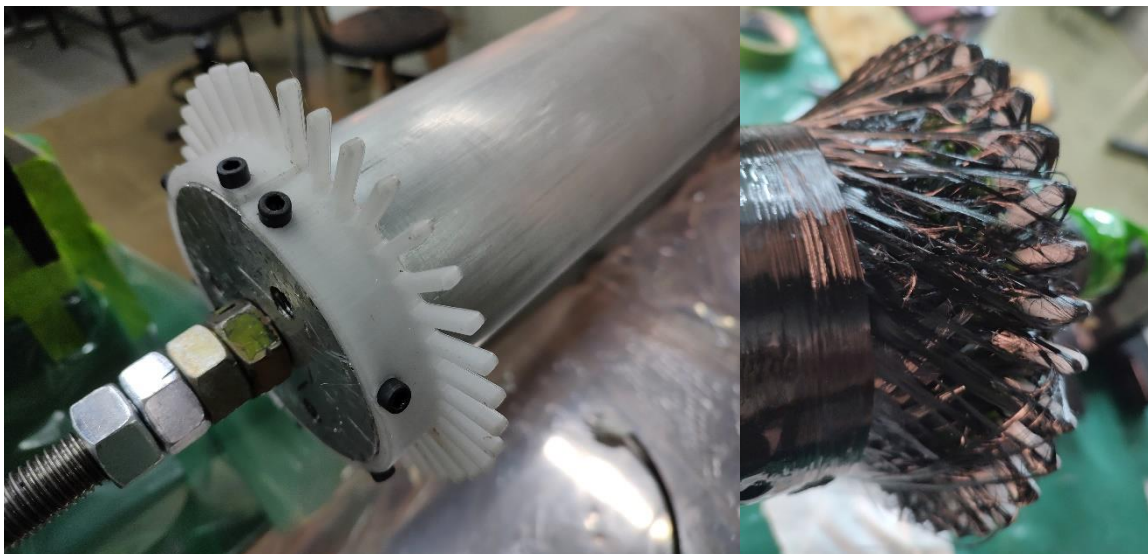


Figura 3.22: Pines de plástico.

-Pines de alambre: se fabricaron pines de alambre de cuerda de piano de 0,9 mm. Para fabricar el mismo, se parte de realizar un “8” sobre dos clavos separados una distancia de 35 mm. Luego se ponen cintas y precintos para hermanarlo en el mandril y que quede fijo. Resultaron tener un excelente desempeño, tanto en alta tensión como en baja tensión. No es económico el alambre de cuerda de piano, pero de una partida de 1 kg se pueden hacer muchísimos pares de pines. Requiere una intervención mínima del operador de la máquina de EF cuando se está fabricando el tubo, por si alguna de las puntas se dobla cuando se trabaja en alta tensión, pero produce trabajos de excelente calidad. Véase [Figura 3.23](#).

-Pines de clavos: Los pines de clavos resultaron de un desempeño excelente, tanto en baja tensión como en alta tensión. El inconveniente que tienen es que siempre deben estar ubicados como las “tapas” del mandril. Es decir, no se pueden usar en ambos extremos los mandriles más largos, que tienen el tratamiento de anodizado, a no ser que la longitud útil del tubo requerida sea igual a la de estos tubos. Para este trabajo de tesis se utilizaron mandriles cortos, con lo cuál no hubo este inconveniente. Si bien son fáciles de fabricar, los mismos no son reutilizables, ya que los clavos quedan flojos para una aplicación posterior y entonces no serían adecuados para fijar la fibra nuevamente. En la [Figura 3.24](#) se aprecian los pines de clavos.

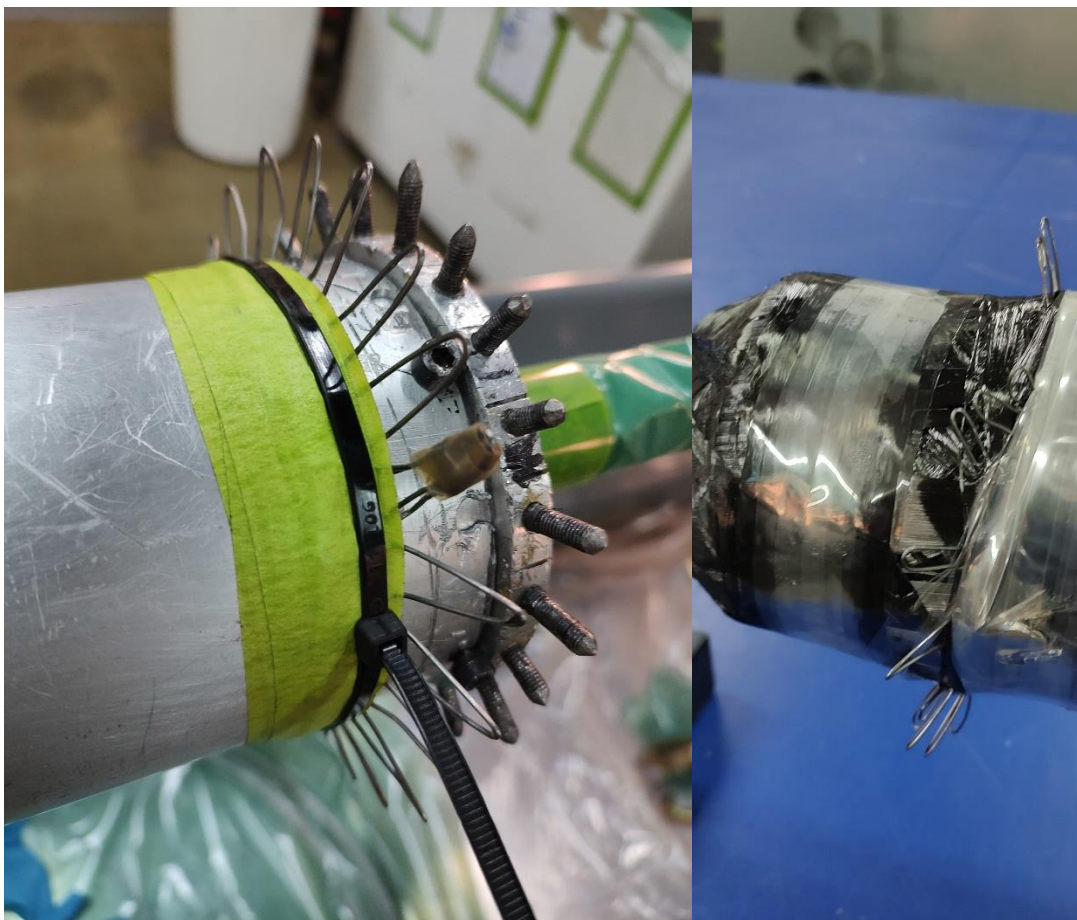


Figura 3.23: Pines de alambre.



Figura 3.24: Pines de clavos.

Capítulo 4:

Tensiones residuales: teoría y modelos

Las tensiones inducidas por procesos, o generalmente llamadas ***Tensiones Residuales***, en materiales compuestos son una consecuencia de diferentes parámetros: el desajuste de expansión térmica entre la fibra y la matriz durante el enfriamiento, la contracción química de la resina durante la polimerización, el curado no uniforme del laminado, la absorción posterior de humedad y también la interacción mecánica herramienta-pieza. Estas TR pueden ser lo suficientemente altas como para causar grietas dentro de la matriz, incluso antes de la carga mecánica. Este micro-craqueo de la matriz puede exponer las fibras a la degradación por ataque químico y, en consecuencia, degradar la resistencia del material del componente. Eventualmente, la pieza falla antes de lo esperado. Además, estas TR pueden causar deformación de componentes y, a menudo, dificultar mucho el logro de las dimensiones especificadas.

Para los polímeros reforzados con fibra, existen TR en tres escalas diferentes:

1. La escala fibra-matriz (constituyente) o micro-tensiones: El desajuste en la contracción entre la matriz y las fibras es la principal fuente para el desarrollo de las TR a nivel micro-mecánico o de los constituyentes.
2. La escala de capas o macro tensiones: Las TR en una escala de capa a capa surge debido a una diferencia anisotrópica en los coeficientes transversales y longitudinales de contracción térmica (laminado vs. laminado).
3. La escala global (estructural). Las TR a través del espesor de un laminado compuesto, que son el resultado de una variación en la contracción a través del espesor.

Las fuentes intrínsecas generan TR a nivel constituyente y el efecto se integra a través de las escalas de longitud. Las fuentes extrínsecas generan tensiones en los límites de la estructura y el efecto se migra hacia abajo a través de las escalas de longitud. Así, las fuentes intrínsecas actúan desde el 'interior y el exterior' y las fuentes extrínsecas actúan desde el 'exterior y hacia adentro'. Las fuentes intrínsecas tienen en general el mayor efecto sobre las tensiones a nivel de matriz y fibra y las fuentes extrínsecas tienen el mayor efecto sobre las tensiones a nivel estructural. Los niveles de matriz y fibra, laminado vs. laminado y

estructural afectan la resistencia del componente, mientras que solo la laminado vs. laminado y las tensiones a nivel estructural afectan la fidelidad dimensional en cualquier grado significativo.

En resumen, la presencia de TR puede no ser evidente en la mayoría de los casos, sin embargo, tenerlas en cuenta en el diseño de la estructura donde se va a desempeñar es importante, debido a que la presencia de TR puede aumentar o disminuir la resistencia del material que está sometido a un determinado esfuerzo. También, las TR que conducen a tensiones superficiales de tracción que normalmente facilitan la formación de grietas, lo que puede causar fracturas inoportunas. Finalmente, puede llegar a haber distorsiones en la pieza fabricada: la distorsión de los compuestos laminados es típicamente el resultado de TR. Los dos procesos principales de creación de TR son durante la fabricación y durante el curado. En cuanto a los métodos disponibles para la medición de TR, existen muchos y muy variados, dividiéndose en dos grandes grupos: métodos destructivos (o también llamados métodos de relajación) y métodos no destructivos ([Shokrieh, M.M., 2014](#)).

En este Capítulo se describe el origen de estas **Tensiones Residuales**, los diversos métodos que existen para estimarlas y el método empleado en esta tesis para su cálculo.

4.1 Tensiones residuales debidas a la fabricación.

Casi todos los procesos de fabricación crean TR. Además, las tensiones también pueden desarrollarse durante la vida útil del componente fabricado. Estas tensiones desarrollan una respuesta elástica a las deformaciones locales incompatibles dentro del componente, por ejemplo, debido a deformaciones plásticas no uniformes. El material circundante debe deformarse elásticamente para preservar la continuidad dimensional, creando así TR. Debido a su carácter auto-equilibrante, la presencia de TR puede no ser evidente y, por lo tanto, pueden pasarse por alto o ignorarse durante el diseño de ingeniería. Sin embargo, son tensiones y deben considerarse de la misma manera que las tensiones debido a la carga externa. En términos de resistencia del material, el efecto principal de las TR es que actúan como una adición a las tensiones de carga externa aplicadas. La contribución de las TR puede ser beneficioso o perjudicial, dependiendo del signo y la ubicación de estas TR. Debido a que

las TR son distintas de cero, pero tienen una fuerza resultante nula, deben ser no uniformes, a veces de manera bastante sustancial, con grandes gradientes de las mismas ([Schajer, 2013](#)).

4.2 Tensiones residuales debidas al proceso de curado.

Un compuesto de polímero reforzado con fibra generalmente está sujeto a un proceso de curado en el que la resina se calienta, las fibras se humedecen y el curado se realiza a altas temperaturas. La necesidad de altas temperaturas en el proceso de curado da como resultado la formación de TR en la estructura laminada final. Estas TR tienen dos causas principales: el desajuste en la expansión térmica de los constituyentes y la contracción química de los polímeros en el compuesto. Es por esto que la medición y caracterización de estas tensiones es compleja. Las TR suelen surgir debido a las discrepancias entre las propiedades mecánicas de la matriz y las fibras de refuerzo. Otros mecanismos que causan TR incluyen: contracción durante la cura, humedad, envejecimiento, temperatura elevada posterior al curado, diferencias en las propiedades del material a escala microscópica, diferencias en el volumen de fibra a través de la matriz y grado no uniforme de curación ([Shokrieh, M.M., 2014](#)).

4.3 Técnicas de medición de tensiones residuales.

El carácter “bloqueado” o “restringido” de las TR los hace muy difíciles de evaluar, independientemente de la técnica de medición utilizada. Incluso con tensiones causadas por cargas externas, las mediciones son indirectas; se mide una aproximación como la deformación o el desplazamiento, a partir del cual posteriormente se calculan las tensiones. El procedimiento típico es hacer mediciones comparativas sobre la estructura sin carga externa aplicada y luego con la carga externa aplicada para finalmente evaluar las tensiones en función de la diferencia de las mediciones. Sin embargo, la dificultad de cuantificar las TR es justamente el hecho de que estas no pueden simplemente eliminarse y aplicarse.

Cuando se utilizan los **Métodos de Medición de Relajación**, las TR se "eliminan" cortando físicamente el material que contiene esas tensiones. Una complicación introducida por este enfoque es que el material que contiene TR se destruye y, por lo tanto, se deben realizar mediciones en el material restante adyacente. Esta separación de las ubicaciones de TR y medición crea desafíos matemáticos que requieren métodos especializados de evaluación de

tensiones. Los **Métodos de Medición No Destructivos** normalmente evitan cualquier eliminación de material y algunos deben utilizar alguna identificación de un estado de referencia “libre de tensiones” al interpretar las mediciones realizadas con TR. Lograr tales estados de referencia puede ser bastante difícil de hacer de manera confiable. Una consecuencia de todos estos desafíos es que las mediciones de TR no suelen alcanzar la precisión o fiabilidad posible cuando se trabaja con tensiones aplicadas. Sin embargo, los diversos métodos de medición de TR están ahora bastante maduros y la brecha de precisión a menudo no es muy grande ([Schajer, 2013](#)).

Algunos de los métodos destructivos de determinación de TR en compuestos se detallan a continuación:

- Método de remoción de capas (layer removal method);
- Método de Sachs (Sachs ‘boring’ method);
- Método de perforado (hole- drilling methods);
- Método de perforado de anillos (ring- core method);
- Método del corte (cutting method);
- Método del contorno (contour method);
- Método del seccionamiento de capas (ply sectioning method);
- Método del corte radial (radial cutting method);
- Método de remoción de la matriz compuesta (matrix removal methods);
- Método de las micro-indentaciones (micro- indentation methods);
- Método del corte incremental o método de flexibilidad de grietas (incremental slitting method o crack compliance method);
- Método de la falla de la primer capa (first- ply failure method);
- Método de medición de la curvatura (measurement of curvature method);
- Métodos de calentamiento (heating methods).

Finalmente, algunos de los métodos no-destructivos de medición de las TR se detallan aquí:

- Método de difracción mediante Rayos-X (X-ray diffraction method);
- Método de difracción mediante neutrones (neutron diffraction method);
- Método de espectropía de Raman (Raman spectroscopy method);
- Método de fotoelasticidad (photoelasticity method);

- Otros métodos ópticos (other optical methods);
- Método de las ondas acústicas (acoustic wave method);
- Métodos basados en interferometría (methods based on interferometry);
- Método de la referencia de curado (cure referencing method);
- Método de medición basado en sensores (measurement methods using sensors);
- Método de la resistencia eléctrica (electrical resistance method).

Para una explicación más exhaustiva de estos métodos, el autor de este trabajo recomienda la lectura del trabajo de Shokrieh ([Shokrieh, M.M., 2014](#)).

En el presente trabajo, y debido a razones de practicidad y experiencia (no tanto por su economía, ya que hay que instrumentar las probetas), se eligió el **Método del Corte** para caracterizar las macro TR de los tubos fabricados (en la escala estructural). El autor de este trabajo hizo una pequeña investigación sobre el Método de Flexibilidad de Grietas (incremental slitting method o crack compliance method), pero no se pueden implementar en este trabajo debido al poco espesor de las muestras y a que el método exige un control estricto del paso de corte de la grita. Para más información, puede consultarse esta investigación, que resuelve el modelo de elementos finitos mediante ANSYS APDL, consultando el siguiente enlace: [“Investigación acerca de la implementación del Método de Flexibilidad de Grietas, por Ing. Gustavo F. Eichhorn”](#).

4.4 Evaluación de las Deformaciones Residuales mediante el Método del Corte.

En el **Método del Corte** las TR presentes en el material se relajan mediante la eliminación de material. En este caso, se realiza justamente un corte de una tira de una muestra cilíndrica, lo que da como resultado la creación de los bordes libres, que se deforman hasta alcanzar el estado de tensión nulo. Opuesta a la zona donde va a realizarse el corte de la tira, se coloca una galga extensométrica (o Strain Gage), la cual mediante un puente de Wheatstone registra el campo de deformación resultante de la muestra, que luego se calcula y se lo relaciona con las TR mediante la TCL o mediante análisis de elementos finitos.

Para el resto de la discusión que sigue, se aclara que no se debe confundir los ejes coordinados de la pieza XYZ ([Capítulo 3.3](#) y [Figura 4.1](#)) con los ejes laminados del material

123 (véase [Anexo A.2.1](#)). La convención de los ejes coordenados (ejes cilíndricos) se va a mantener en todo este trabajo. El eje principal es el **eje X** o eje longitudinal (en rojo); el **eje Y** es el eje circunferencial (en azul); el **eje Z** es el eje radial, en dirección del espesor de la pieza (en verde). El esquema general de la medición se muestra en la [Figura 4.2](#). En la parte superior izquierda se muestra la pieza de partida y los ejes coordenados de la pieza. La parte inferior izquierda muestra el seccionamiento de la pieza de partida. De un cilindro de 300 mm de largo, se lo secciona en aproximadamente 10 piezas más pequeñas de alrededor de 25 mm de largo cada una. De ellas se extrae una muestra de la zona central para medir TR. La excepción a esto son las muestras replicadas de la Corrida 7 (7A, 7B y 7C)¹, de las que se extrajeron 3 muestras para medir TR. Una al comienzo del tubo, otra en el centro y otra al final. El objetivo de esto es evaluar si hay alguna dispersión de valores estadísticamente significativa a lo largo del tubo. La parte superior de una pieza se corta mediante un Dremel en dos lugares para retirar una tira de material, lo que garantiza la medición de una deformación libre y sin interferencias en la propia pieza; debajo está colocada una galga extensométrica unidireccional y en el sentido del eje circunferencial (**eje Y**), ya que son las tensiones más importantes: las que soportarían la carga en caso de que el cilindro compuesto esté presurizado (de todas maneras, las tensiones longitudinales ya se liberaron cuando se extrajo el tubo y las tensiones en la dirección del espesor, en el **eje Z**, para materiales compuestos, siempre se suponen nulas, tanto sea para una placa como para una pieza de revolución). Se mide de esta manera las **deformaciones residuales**.

Las **deformaciones residuales** se obtienen entonces montando un circuito de puente de Wheatstone con la configuración de un cuarto. Esta configuración de $\frac{1}{4}$ significa que, de las cuatro resistencias teóricas que funcionan en un puente de Wheatstone, solo una es la que está activa y varía su valor a lo largo del proceso de medición. Los cuatro brazos o ramales del circuito del puente están formados por las resistencias R_1 a R_4 . Los puntos 2 y 3 del puente designan las conexiones de la tensión de alimentación del puente U_A . La tensión de salida del puente V_0 , es decir, la señal de medida, se encuentra disponible en los puntos 1 y 4.

¹ El por qué de la nomenclatura de estas corridas se ve en el [Capítulo 5](#).

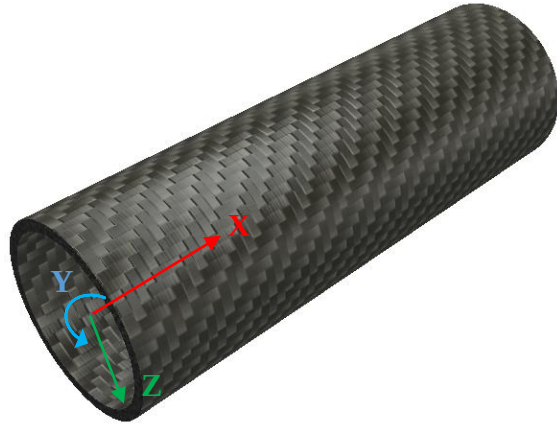


Figura 4.1: Convención de ejes coordenados.

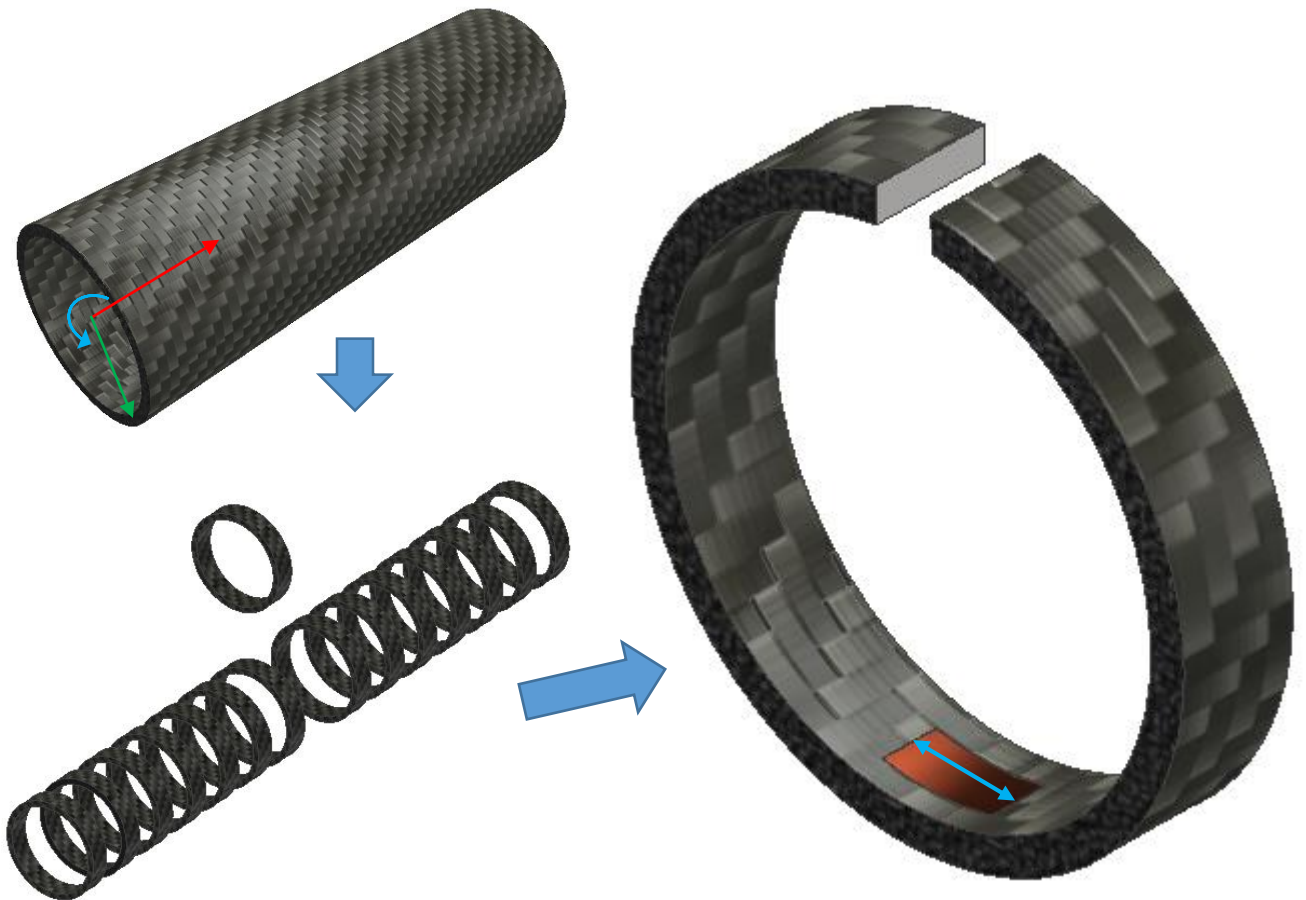


Figura 4.2: Procedimiento de extracción de una muestra para la medición de deformaciones residuales de la parte central del tubo fabricado mediante EF.

Obviamente, la resistencia R_1 se modela como la resistencia variable, ya que es la galga extensométrica en sí (Véase la [Figura 4.3²](#)). En la [Figura 4.4](#) se muestran los datos del fabricante de la galga elegida para este trabajo.

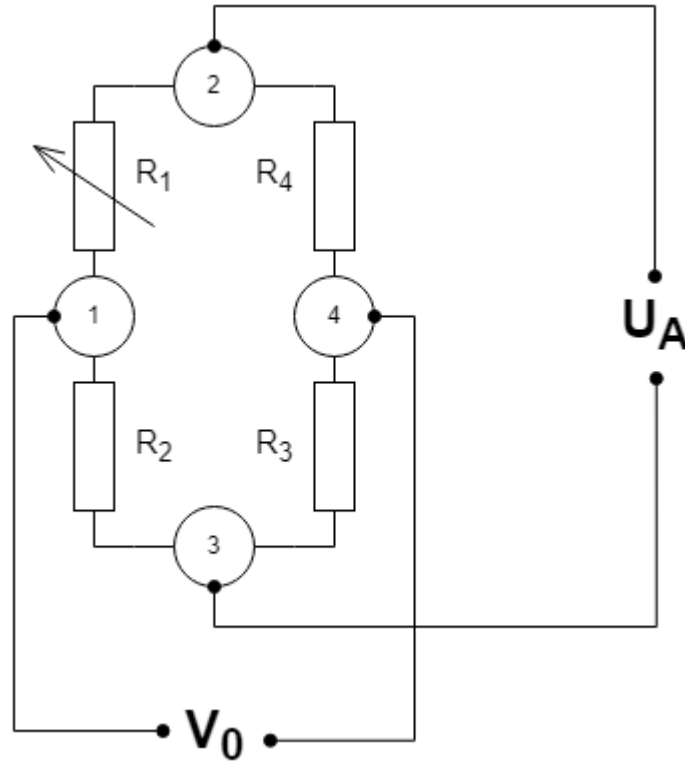


Figura 4.3: Esquema de un cuarto de puente de Wheatstone.

El aparato que registra la medición, muestra el valor de la deformación alcanzada por la galga ya que internamente evalúa siguiente **Ecuación 4.1**:

$$\varepsilon = \frac{4}{k} \frac{V_0}{U_A} - \varepsilon_s \quad \text{Ec. 4.1}$$

En donde ε es la “Deformación efectiva” en el punto de medición, ε_s es la “Deformación aparente” y k es el factor de la galga extensométrica. V_0 y U_A son las ya mencionadas “Tensión de salida del puente” y la “Tensión de alimentación del puente” respectivamente.

² Para una rápida descripción del funcionamiento del puente de Wheatstone, se puede consultar una breve introducción al tema en <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/T01569.pdf>.

En la **Figura 4.5** se muestra el esquema de como debe conectarse el circuito en el registrador de datos para medir las Deformaciones Residuales según una configuración de $\frac{1}{4}$ de puente de Wheatstone. En la **Figura 4.6** se muestra el conexionado físico del puente en la bornera del adquisidor de datos. El cable negro siempre se conecta en la bornera **P+**, el blanco en la bornera **S+** y el rojo en la bornera **D350** (esto último tiene que ver con el valor de las resistencias que completan el puente). En la **Figura 4.7** se muestra el conexionado físico del lago de la galga, la cuál ya se encuentra pegada sobre la muestra con Loctite® 414 (el pegamento debe ser de una calidad que asegure que se transmiten correctamente el campo de deformación de la pieza a la galga para producir la deformación en esta). Acto seguido, se debe configurar el equipo introduciendo los siguientes parámetros: *Select Channels* (se debe seleccionar en qué canal se conecta la galga extensométrica (en todas las experiencias siempre se utilizó el “Canal 1”, por una cuestión de orden, pero se pueden realizar hasta 4 mediciones simultáneas); *Bridge type* (seleccionamos para que la configuración sea la de $\frac{1}{4}$ de puente); *Gage factor/Scaling* (se obtiene de la tablas del fabricante en las que viene empaquetada la galga extensométrica, en este caso es el valor que se ve en la **Figura 4.4** de 2.070 en unidades de medición en microstrains: $1\mu\epsilon \equiv 10^{-6} \epsilon$). Finalmente se realiza el balanceo (**Figura 4.8**), en donde básicamente se fija el cero de la medición. Se puede comprobar presionando en la pieza (intentando estirla o contraerla cerca de la zona de la galga) si el registrador también muestra una variación en la pantalla, luego de realizar el balanceo, para chequear que no haya problemas de conexionado.

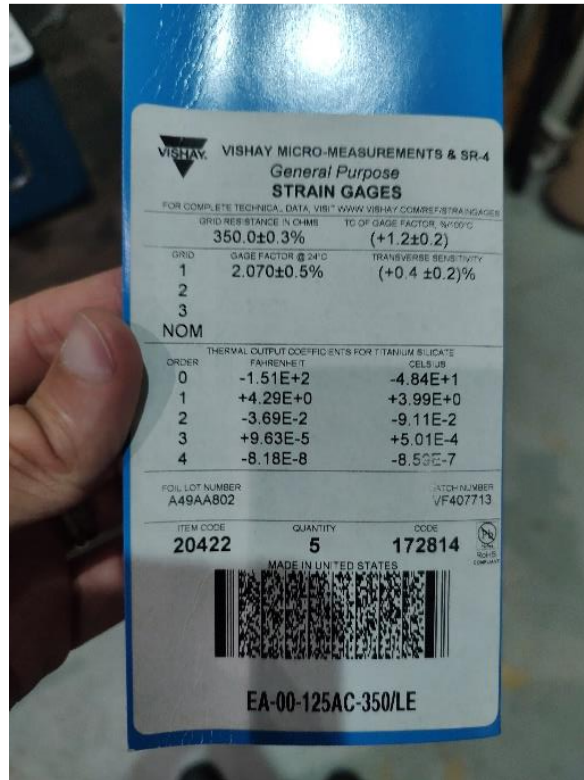


Figura 4.4: Datos del fabricante de la Galga Extensométrica utilizada en este trabajo.

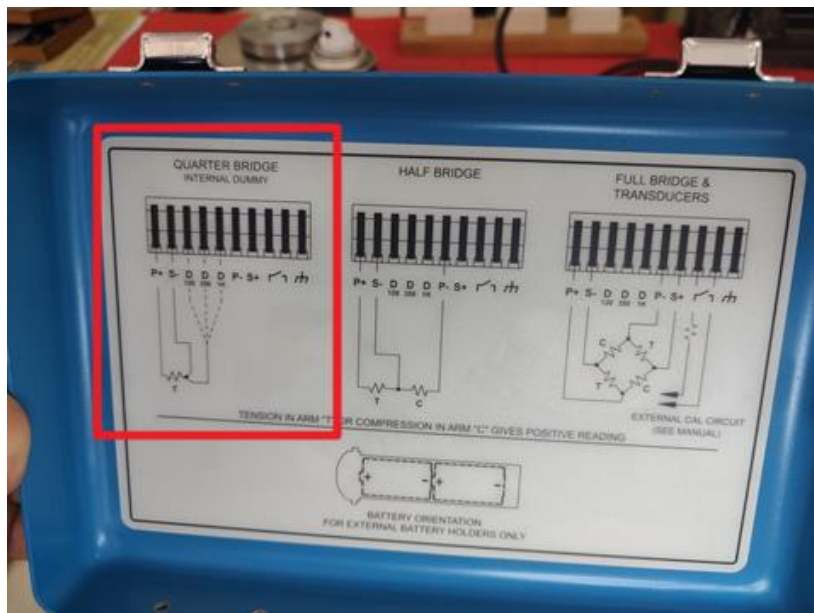


Figura 4.5: Esquema de conexión de un cuarto de puente de Wheatstone en el equipo registrador.

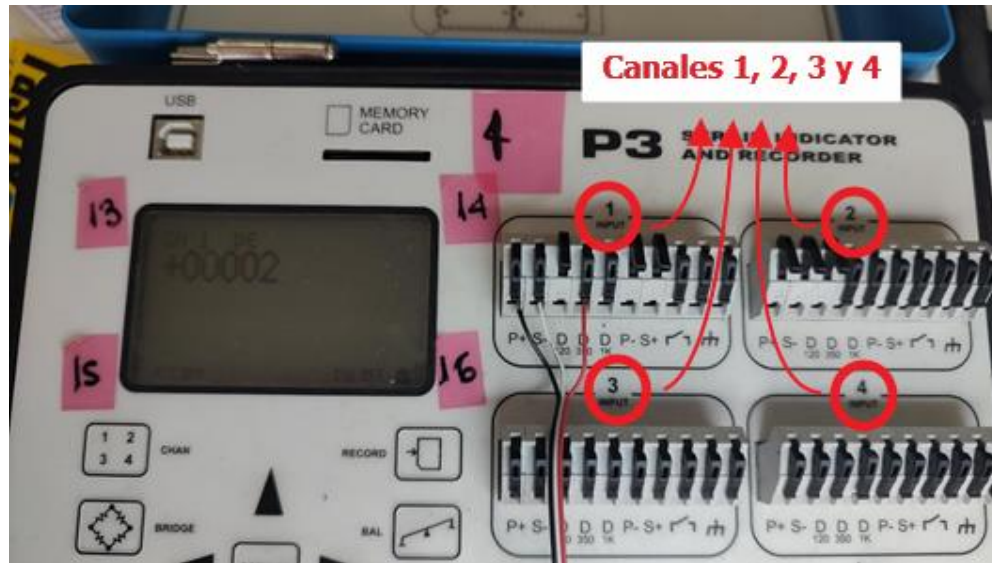


Figura 4.6: Conexión físico de un cuarto de puente de Wheatstone en el equipo registrador de datos.

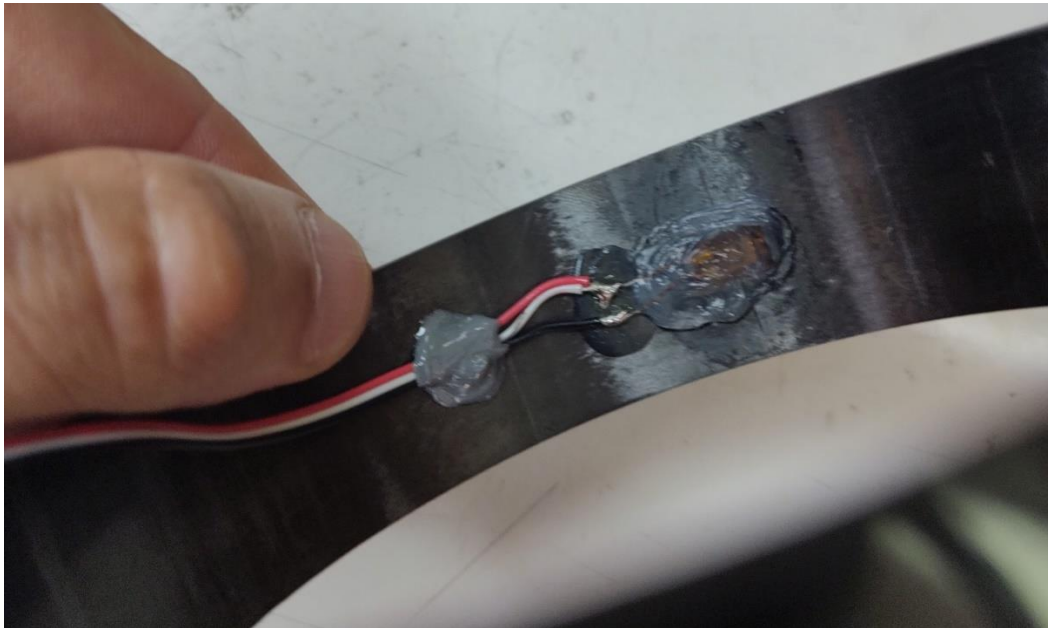


Figura 4.7: Conexión físico de un cuarto de puente de Wheatstone en la galga extensométrica.

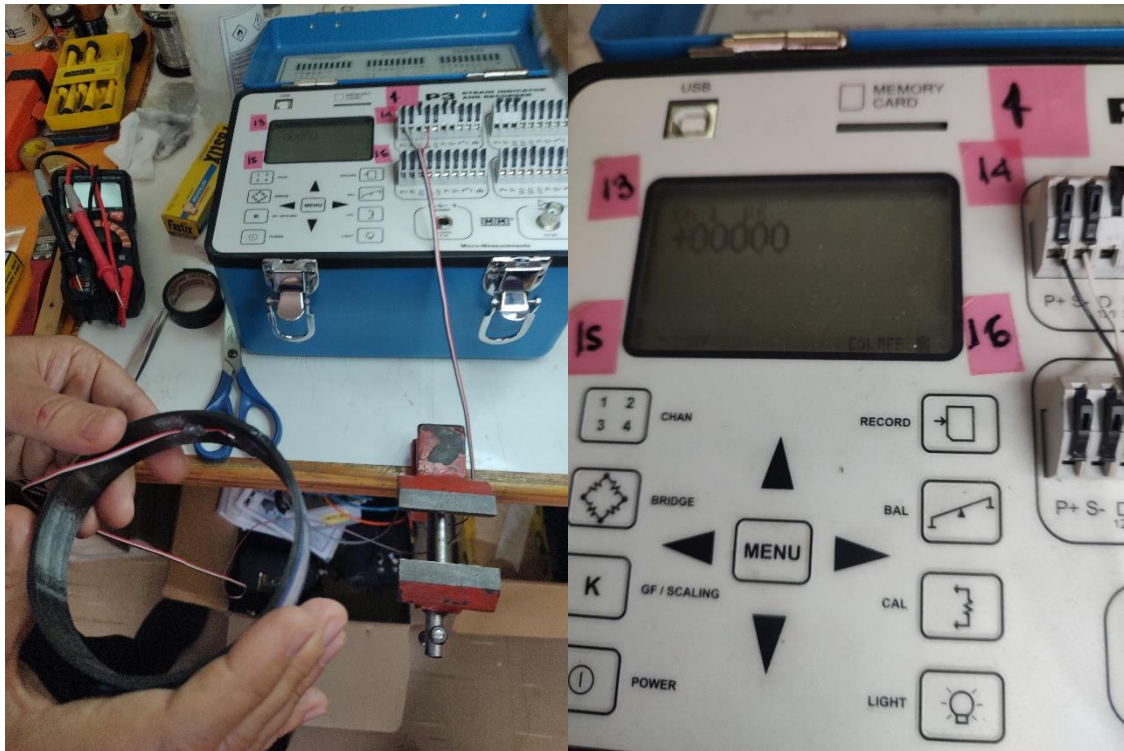


Figura 4.8: Balanceo del puente de Wheatstone previo al corte y posterior medición.

Finalmente, se realiza la experiencia de medición propiamente dicha. Se sujeta la pieza con ayuda de unas pinzas de punta y se realizan dos cortes, tal como se indica en la [Figura 4.2](#). En la [Figura 4.9](#) se muestra el Dremel (el Dremel me asegura un corte fino, preciso y maniobrabilidad) utilizado para hacer el corte y una “carpa” hecha con nylon sobre la caja donde se realizaba el corte. Esto es debido a que el polvillo que se desprende del corte es muy nocivo para el cuerpo humano y se deben tomar medidas para que no se disperse el polvo en el ambiente (se abre la “carpa” para que el experimentador realice el corte y luego la cierra, conteniendo de esta manera el polvo) y además el experimentador debe utilizar protección en los ojos (anteojos), en las manos (guantes de látex), en el cuerpo (usar guardapolvos para que no quede polvillo en la ropa) y protección para nuestros pulmones (máscara con filtro de polvo).



Figura 4.9: Montaje de la caja y la “carpa” donde se realiza el corte de la pieza mediante un dremel.

En la [Figura 4.10](#) se muestra el resultado de la medición: en la parte central se encuentra el segmento del disco que se ha cortado, mientras que la pantalla está registrando un valor (en microstrains). Se debe esperar de 3 a 5 minutos a que se estabilice la medición, porque hay efectos de compensación de cargas propios del instrumento y efectos de temperatura debido al corte efectuado en la pieza que hacen que la medición oscile un poco hasta que se estabilice en un valor. La medición tomada en la experiencia es aquella en la cuál no se muestra una variación en la pantalla del equipo registrador por más de un minuto.

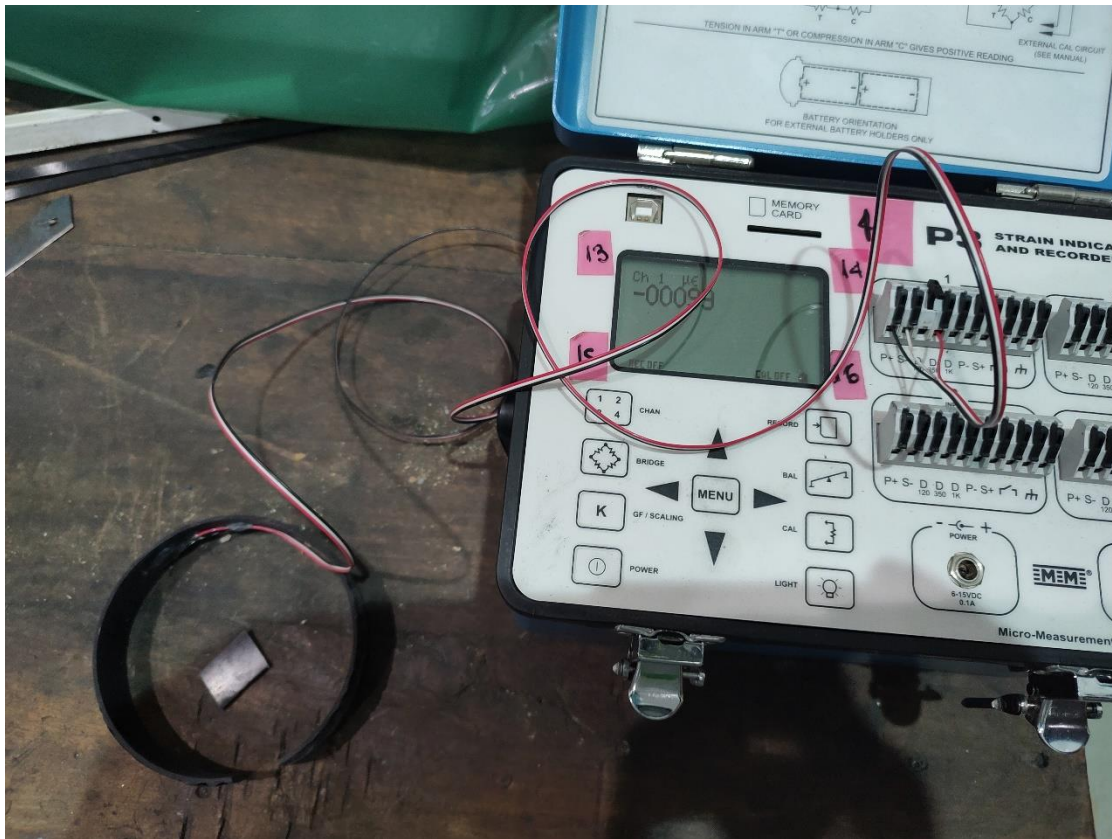


Figura 4.10: Medición de las Deformaciones Residuales: una vez realizado el corte el equipo registra un valor en microstrains ($1\mu\epsilon=1E^{-6} \epsilon$). El segmento cortado se encuentra en el centro del cilindro.

4.5 Cálculo de las Tensiones Residuales.

Los conceptos expuestos a continuación provienen de estudiar los trabajos sobre **Tensiones Residuales** de Cohen ([Cohen, 1997](#)), Schlottermüller ([M. Schlottermüller et al., 2004](#)), Casari ([P. Casari et al., 2006](#)), Seif ([Seif M.A., 2002](#)), J. W. Kim & D. G. Lee ([J. W. Kim & D. G. Lee, 2005](#)) y C. Kang et al. ([C. Kang et al., 2018](#)).

El principal efecto, cuando se liberan las **Tensiones Residuales**, es la liberación de un **Momento Residual**, que tiende a abrir o cerrar la pieza. Lo que mide la galga extensiométrica es la extensión o contracción que el campo de deformación de la pieza producida por el **Momento Residual** ejerce sobre ella, midiéndose así una **Deformación Residual**. El fenómeno físico se muestra explicado en la [Figura 4.11](#). En esta Figura se muestra un cilindro al que se le ha extraído una sección (en negro), para medir sus Deformaciones

Residuales. En primer lugar, se podrá observar si el cilindro de la muestra tiende a abrirse o cerrarse. Esto está asociado al sentido de los **Momentos Residuales** (mostrados en la misma figura en color rojo). Para el primer caso, los **Momentos Residuales** tenderán a abrir el aro, con lo cuál la respuesta en la galga extensométrica (en color violeta) es de tracción. El caso dos es el caso contrario, en la cuál si la sección circular tiende a cerrarse, la galga extensométrica tiende a contraerse. Este comportamiento se puede entender recordando el comportamiento mecánico de una viga, mostrado en la parte inferior de dicha figura. Los momentos tales como los del Caso 1 producen tracción (denotado por flechas punteadas en color verde) en la cara superior, y contracción (denotado por flechas punteadas en color naranja) en la cara inferior. El Caso 2 es el caso exactamente contrario.

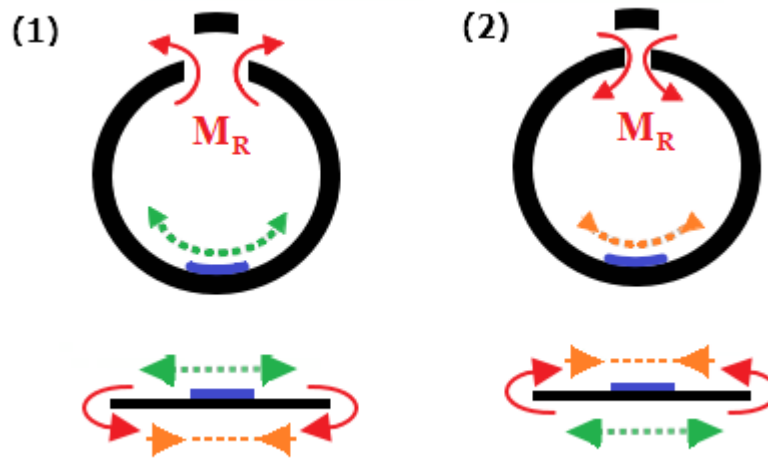


Figura 4.11: Momentos residuales y su relación con las Deformaciones Residuales medidas con Galgas Extensométricas.

La relación entre los **Momentos Residuales** y las **Deformaciones Residuales** está dada por la relación siguiente **Ecuación 4.2**, que se deduce en el **Capítulo 4.29** “Displacements for Symmetrical Stress Distributions” en la obra de Timoshenko y Goodier ([Timoshenko y Goodier, 1951](#)).

$$M = \frac{(\delta/a)E_x^b \ln\left(\frac{b}{a}\right) \left\{ (b^2 - a^2)^2 - 4a^2b^2 \left[\ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2 \right\}}{16\pi(b^2 - a^2)} \quad \text{Ec. 4.2}$$

El momento obtenido está en unidades de Newtons, ya que se trata de un momento por unidad de ancho. E_x^b (en GPa) es el módulo elástico de flexión en la dirección X (el cuál se especificará su calculo más adelante, mediante la **Ecuación 4.6**), a (en mm) es el radio interior de la sección y b (en mm) es el radio exterior. δ (en mm) es el desplazamiento obtenido por cálculo conociendo el dato de la Longitud l_0 (en mm) de la galga, el valor de deformación medido y la relación siguiente (**Ecuacion 4.3**):

$$\delta = l - l_0 = \varepsilon l_0 \quad \text{Ec. 4.3}$$

La longitud de la galga, se obtiene teniendo en cuenta los datos del fabricante de la misma. Sabiéndose que el código de identificación de la galga es EA-00-125AC-350/LE y por la información contenida en el [catálogo de Vishay®](#), que la longitud de la galga en mils es de 125 mil $\equiv$ 3.175 mm. Véase la **Figura 4.4** en la que se muestra el código de identificación de la galga extensiométrica.

Una vez calculados los momentos se hallan las **Tensiones Residuales** evaluadas en el radio vector de la sección, según la **Ecuación 48** (aquí **Ecuación 4.4**) del **Capítulo 4.27** “Pure Bending of Curved Bars” de la obra de Timoshenko y Goodier ([Timoshenko y Goodier, 1951](#)).

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{4M}{N} \left[\frac{a^2 b^2}{r^2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + b^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) + a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right) \right] \\ \sigma_y &= -\frac{4M}{N} \left[-\frac{a^2 b^2}{r^2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + b^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) + a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right) + b^2 - a^2 \right] \\ \sigma_{yz} &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.4}$$

En donde N (en mm^4) se obtiene de la **Ecuacion 4.5**:

$$N = (b^2 - a^2)^2 - 4a^2 b^2 \left[\ln\left(\frac{b}{a}\right) \right]^2 \quad \text{Ec. 4.5}$$

El valor de r (en mm) es el valor del radio vector, comprendido entre a y b . La **Figura 4.12** aclara dicho concepto. Al estar calculado M en unidades de Newtons, σ_z y σ_y quedan en N/mm^2 , y por tanto en unidades de MPa.

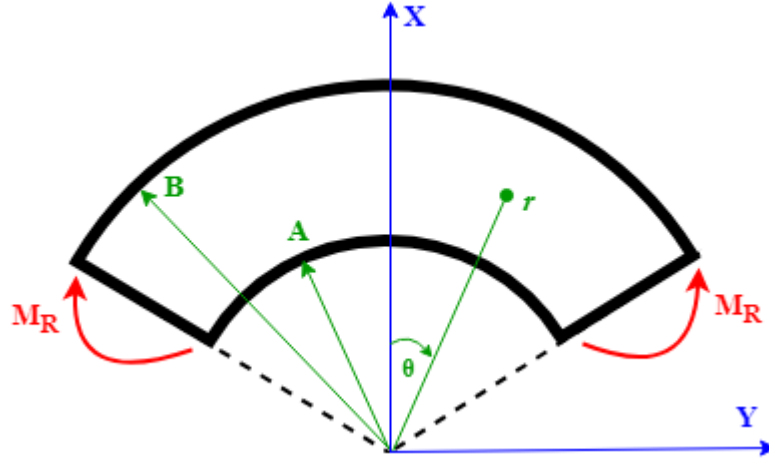


Figura 4.12: Radiovector r y convención de momentos positivos (los que producirían una extensión en una galga extensométrica).

El módulo E_x^b (en GPa) se calcula (**Ecuación 4.6**) a partir de las Ecuaciones 6.36 del trabajo de Barbero ([Barbero, 2011](#)):

$$E_x^b = \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{t^3 D_{22}} \quad \text{Ec. 4.6}^3$$

En donde t (en mm) es el espesor de la pieza y D_{11} , D_{22} y D_{12} se calculan a partir de la Ecuación 6.16 de Barbero (aquí **Ecuación 4.7**):

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N (\Phi_{ij})_k \left(t_k z_k'^2 + \frac{t_k^3}{12} \right); i, j = 1, 2 \quad \text{Ec. 4.7}^4$$

En donde k es la capa k -ésima del laminado, t_k es el espesor de esa capa, z_k' es la coordenada de esa capa (Ver **Figura 4.13**). Las constantes D están en GPa mm^3 .

Las ecuaciones para calcular Φ_{11} , Φ_{22} y Φ_{12} se presentan a continuación la **Ecuación 4.8**, reproducida de las Ecuaciones 5.49 de Barbero ([Barbero, 2011](#)):

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \Phi_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \Phi_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.8}$$

³ Este tipo de relaciones están en todos los libros referentes a materiales compuestos, por ejemplo, el trabajo de Jones ([Jones, 1999](#)).

⁴ Se modificó la notación original del trabajo original de Barbero ([Barbero, 2011](#)): los símbolos $\bar{Q}$ y $\bar{z}$ se cambiaron por los símbolos Φ y z' por conveniencia en la redacción.

Y los valores de Q_{11} , Q_{22} , Q_{66} y Q_{12} se calculan como se muestra a continuación en la **Ecuación 4.9** (Ecuaciones 5.20 y 5.23; [Barbero, 2011](#)):

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.9}$$

Para cada uno de los valores Q_{11} , Q_{22} , Q_{12} y Q_{66} , hay que calcular los valores de E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12} que dependen del volumen de fibra. Cada Corrida del material tendrá un volumen de fibra medido diferentes entre sí. Ergo, todos los tubos van a tener módulos E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12} diferentes (así como espesores diferentes y diferentes ángulos por capa, con lo cuál también los Φ se calculan diferente en cada caso). En cuanto a las unidades, los módulos E_1 , E_2 y G_{12} están expresados normalmente en GPa. Por tanto los Q_{ij} están en GPa y los Φ_{ij} en GPa también.

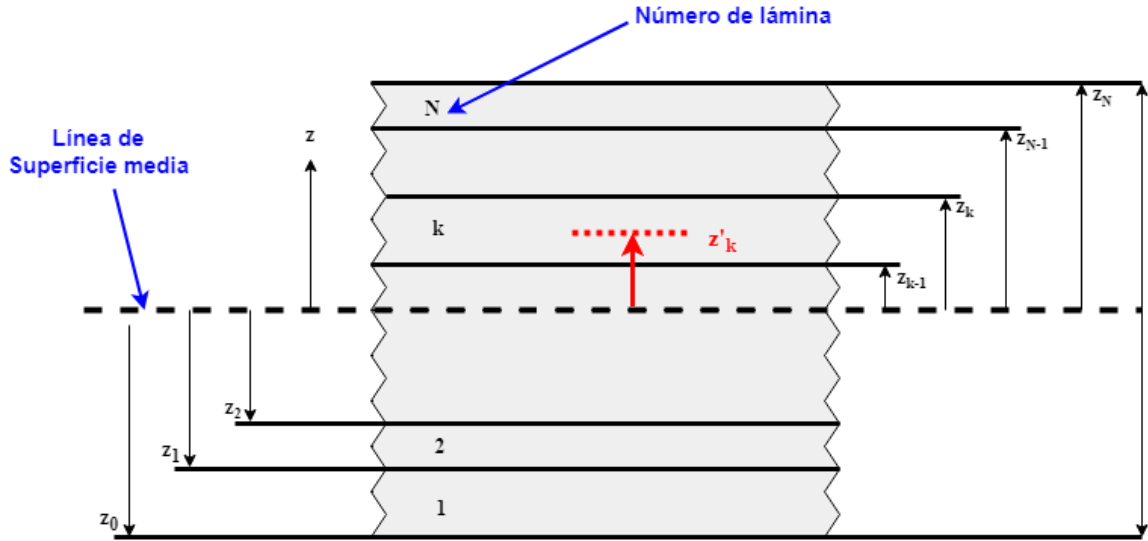


Figura 4.13: Coordenada z' de la capa k -ésima.

Entonces, el método general para obtener los resultados de las **Tensiones Residuales** se resume a continuación:

- i. Fabricación del tubo según el patrón establecido y siguiendo las prácticas descritas en el [Capítulo 3](#).
- ii. Seccionamiento del tubo, preparación de muestras.
- iii. Obtención de los parámetros de calidad de las muestras.
- iv. Medición del volumen de Resina, volumen de Fibra y vacíos mediante técnicas de la micrografía.
- v. Medición de las **Deformaciones Residuales** para cada muestra.
- vi. Obtención de las constantes ingenieriles por medio de las fórmulas de la micromecánica para cada muestra ([Anexo 2](#)).
- vii. Evaluación de las constantes Q, mediante las **Ecuaciones 4.9**.
- viii. Evaluación de las constantes Φ , mediante las **Ecuaciones 4.8**.
- ix. Calcular las **Tensiones Residuales** para cada capa, según las **Ecuaciones 4.4** (evaluando antes las **Ecuaciones 4.7, 4.6, 4.5, 4.3 y 4.2**).

El método general se encuentra diagramado en la [Figura 4.14](#).

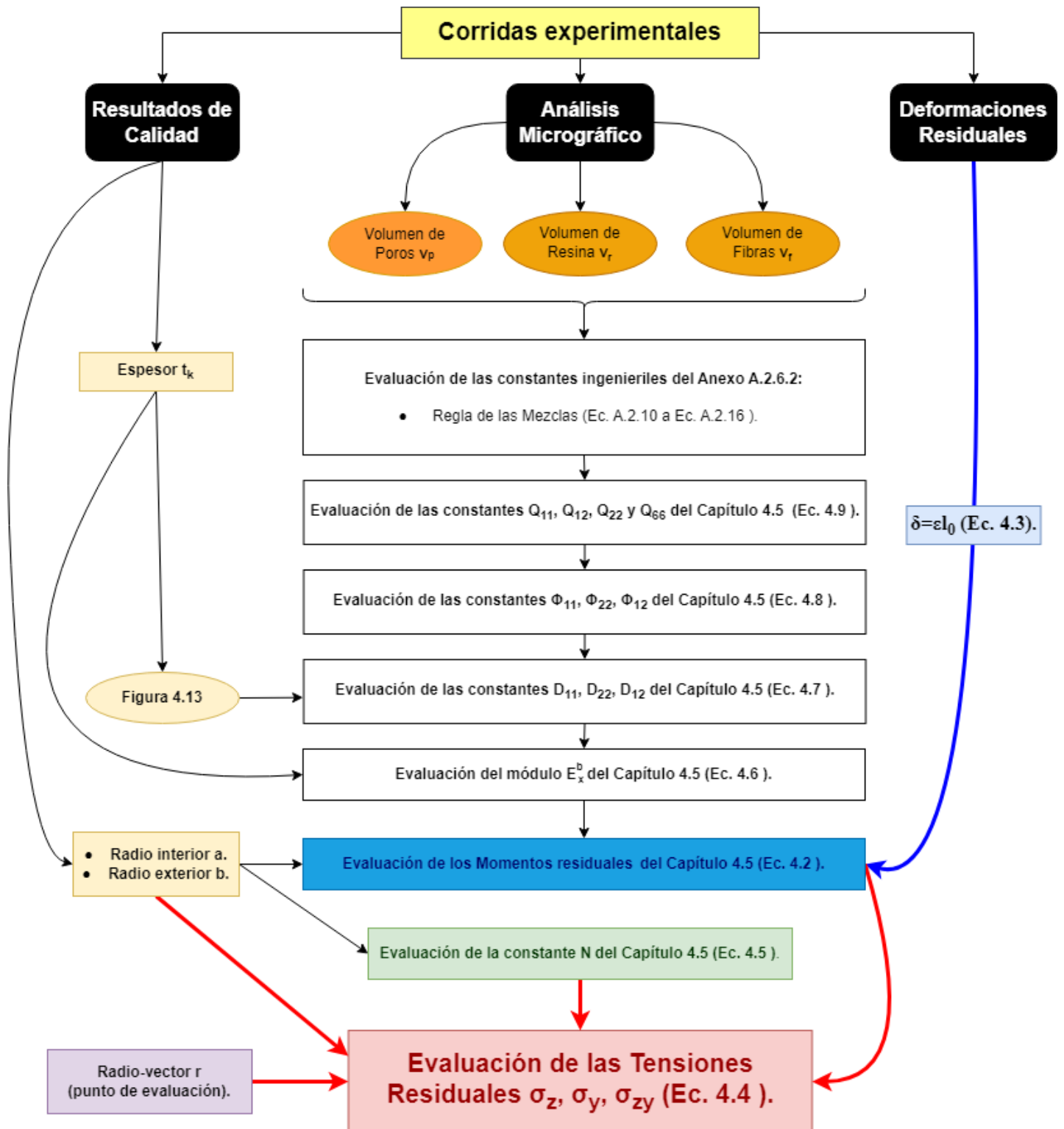


Figura 4.14: Resumen del método general para obtener los resultados de las Tensiones Residuales.

4.6 Modelo de predicción de Deformaciones Residuales.

Se desarrolla a continuación un modelo muy sencillo para deducir las **Deformaciones Residuales** en base a las temperaturas que se alcanzan en el autoclave durante el curado de la pieza. Se parte del estudio del ciclo de curado (en nuestro caso, el detallado en el [Capítulo 3.6](#)). Para los compuestos de polímeros termoestables, un proceso de curado típico consta de dos pasos: curado a una temperatura elevada constante y enfriamiento térmico desde la temperatura de curado hasta la temperatura ambiente. Durante el curado, el polímero se encoge como resultado de una reacción puramente química (polimerización) y sus características materiales cambian drásticamente a través de la transición de un estado líquido a un estado sólido, mientras que el refuerzo permanece sin cambios. Para el enfriamiento térmico, tanto el polímero como el refuerzo se contraen, pero en diferentes cantidades y, además, el polímero puede cambiar su rigidez significativamente. Por lo tanto, la acumulación de TR a lo largo del tiempo se rige por el cambio de volumen y las propiedades del material durante el proceso de curado completo. El estudio exacto del ciclo de curación y el control de los parámetros que gobiernan las tensiones podrían conducir a obtener durante el proceso menores TR.

Para controlar estas tensiones, primero es necesario estimar su magnitud, y luego relacionar este número con las condiciones de procesamiento. Uno de los parámetros clave para encontrar las TR analítica o numéricamente es la temperatura a la que estas tensiones comienzan a acumularse en el laminado durante su curación. Bajo esta condición, generalmente se asume que la deflexión máxima de un laminado asimétrico se reduce a cero y la temperatura relevante se define como temperatura libre de tensión o libre de deformación (el punto de gel). Se supone que las TR se generan al enfriarse a partir de esta temperatura. La diferencia de temperatura entre la temperatura libre de tensión y la temperatura de servicio es una fuerza impulsora importante para la formación de TR.

Para intentar predecir las TR, recurrimos entonces a la TCL, que es una herramienta predictiva de uso común, que evolucionó en la década de 1960. Esta permite analizar los efectos de acoplamiento complejos que pueden ocurrir en laminados compuestos. Es capaz de predecir las deformaciones, desplazamientos y curvaturas que se desarrollan en un laminado a medida que se carga mecánica y térmicamente. El método es similar a la teoría

de placas isotrópicas, con la principal diferencia que aparece en las relaciones entre tensión de lámina y deformación. Al igual que con cualquier técnica analítica, se deben hacer algunas suposiciones para que el problema sea solucionable:

1. La placa (en nuestro caso: tubo laminado) consiste en lámina ortotrópica unida entre sí, con los ejes materiales principales de la lámina ortotrópica orientada a lo largo de direcciones arbitrarias con respecto a los ejes X-Y.
2. El grosor de la placa (en nuestro caso: tubo) t , es mucho más pequeño que cualquier dimensión característica.
3. Los desplazamientos u , v y w son pequeños en comparación con t .
4. Las deformaciones en el plano ϵ_x , ϵ_y y ϵ_{xy} son pequeñas en comparación con la unidad.
5. El corte transversal es insignificante, $\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = 0$ (estado de tensión plana en cada capa).
6. Se supone que los desplazamientos u y v son funciones lineales de la coordenada de espesor z (sin deformación).
7. Los supuestos 5 y 6 juntos definen la hipótesis de Kirchhoff.
8. La deformación normal transversal ϵ_z es insignificante.
9. Cada capa obedece la Ley de Hooke.
10. El espesor de la placa (tubo) es constante en todo el laminado.
11. Tensión de corte transversal es σ_{xz} y σ_{yz} desaparecen en las superficies laminadas $z = \pm t/2$.

Estos supuestos sientan las bases para la teoría y permiten la predicción del comportamiento del laminado compuesto. Para los compuestos laminados asimétricos, las tensiones inducidas por el proceso no están equilibradas internamente. El compuesto se deforma para alcanzar un nuevo equilibrio de TR interna. Debido a que las TR causan deformación en los compuestos laminados asimétricos y también causan una forma inesperada del producto final, los compuestos con secuencias de apilamiento asimétricas no son prácticos. Las aplicaciones de los laminados asimétricos se limitan principalmente a la investigación académica. Para este trabajo se trabajará con todos laminados simétricos.

Aclarado esto, un modelo básico bastante simplificado basado en la TCL para predecir TR prediciendo primero las **Deformaciones residuales**. Más adelante, se comparará este

modelo con las **Deformaciones Residuales** obtenidas experimentalmente, y las **Deformaciones Residuales** obtenidas mediante un Modelo de correlación. Se propone a partir de las ecuaciones 5.49, 6.15, 6.16, 6.58 y 6.59 del trabajo de Barbero ([Barbero, 2011](#)):

$$\varepsilon_y^0 = \frac{\Delta T}{A_{22}} \sum_{k=1}^N (\Phi_{12}^k \alpha_x^k + \Phi_{22}^k \alpha_y^k + \Phi_{26}^k \alpha_{xy}^k) * t_k \quad \text{Ec. 4.10}$$

En donde ΔT es la fuerza impulsora térmica y se calcula teniendo en cuenta que el pico exotérmico ocurre a los 64°C y la temperatura de servicio de fija por convención a 20°C. Por tanto, $\Delta T = -44^\circ\text{C}$. t_k es el espesor de la capa k . Φ_{12}^k y Φ_{22}^k están definidos mediante la **Ecuación 4.8**, mientras que Φ_{26}^k se calcula como (**Ecuación 4.11**):

$$\Phi_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \quad \text{Ec. 4.11}$$

Por otra parte, teniendo en cuenta las ecuaciones 6.56 y 5.33 de Barbero (aquí **Ecuación 4.12**):

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ 2 \cos \theta \sin \theta & -2 \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 4.12}$$

Entonces (**Ecuación 4.13**):

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \cos^2 \theta + \alpha_2 \sin^2 \theta \\ \alpha_1 \sin^2 \theta + \alpha_2 \cos^2 \theta \\ 2 \cos \theta \sin \theta (\alpha_1 - \alpha_2) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Los materiales compuestos tienen dos coeficientes de expansión térmica. Uno es α_1 , dominado por las propiedades de las fibras, y el otro es $\alpha_2 = \alpha_3$, dominado por las propiedades de la matriz. Para calcularlos, reproducimos acá las Ecuaciones 4.72 y 4.73 de Barbero (aquí **Ecuación 4.14**):

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_A V_f E_A + \alpha_m V_m E_m}{E_1} \quad \text{Ec. 4.14}$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_T \sqrt{V_f} + (1 - \sqrt{V_f}) \left(1 + V_f v_m \frac{E_A}{E_1}\right) \alpha_m$$

En donde α_A , α_T y α_m son los coeficientes de expansión térmica de la fibra en dirección axial o longitudinal, el coeficiente de expansión térmica de la fibra en dirección transversal y el coeficiente de expansión térmica de la matriz respectivamente. V_f y V_m son las fracciones en volumen de fibra y de resina o matriz respectivamente. E_A , E_m y E_1 son los módulos elásticos de la fibra en dirección axial o longitudinal, de la matriz y del laminado del

compuesto en la dirección 1 respectivamente. Finalmente, v_m es la relación de poisson de la matriz.

Excepto las propiedades que dependen de V_f y V_m , como E_1 , se resumen en la **Tabla 4.1** las propiedades necesarias para calcular las TR según la TCL.

Tabla 4.1: Propiedades necesarias para calcular las Tensiones Residuales según la Teoría clásica de laminados (TCL).

Propiedad	Valor	Referencia
α_A	$-0.38 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$	Tabla 2.2
α_T^*	$9,5 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$	Tabla 2.2
α_m	$5,76 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$	Tabla 2.4
E_A	239,4 GPa	Tabla 2.1
E_m	3,4 GPa	Tabla 2.3
v_m	0,31	Tabla 2.3

Finalmente, el Coeficiente A_{22} de la **Ecuación 4.10** se calcula (teniendo en cuenta la Ecuación 6.16 de Barbero) como:

$$A_{22} = \sum_{k=1}^N (\Phi_{22})_k t_k \quad \text{Ec. 4.15}$$

Entonces, el método general para obtener los resultados de las **Deformaciones Residuales** se resume a continuación:

- Fabricación del tubo según el patrón establecido y siguiendo las prácticas descritas en el **Capítulo 3**.
- Seccionamiento del tubo, preparación de muestras.
- Obtención de los parámetros de calidad de las muestras.
- Medición del volumen de Resina, volumen de Fibra y vacíos mediante técnicas de la micrografía.
- Obtención de las constantes ingenieriles por medio de las fórmulas de la micromecánica para cada muestra (**Anexo 2**).
- Evaluación de las constantes Q, mediante las **Ecuaciones 4.9**.

- vii. Evaluación de las constantes Φ , mediante las **Ecuaciones 4.8 y 4.11**.
- viii. Calcular las Constantes α_1 y α_2 mediante las **Ecuaciones 4.14** para luego calcular las Constantes α_x , α_y y α_{xy} mediante las **Ecuaciones 4.13**.
- ix. Calcular el Coeficiente A_{22} mediante la **Ecuación 4.15**.
- x. Evaluar finalmente las Deformaciones Residuales predichas mediante un modelo muy simplificado según la TCL mediante la **Ecuación 4.10**.

El método general se encuentra diagramado en la **Figura 4.15**.

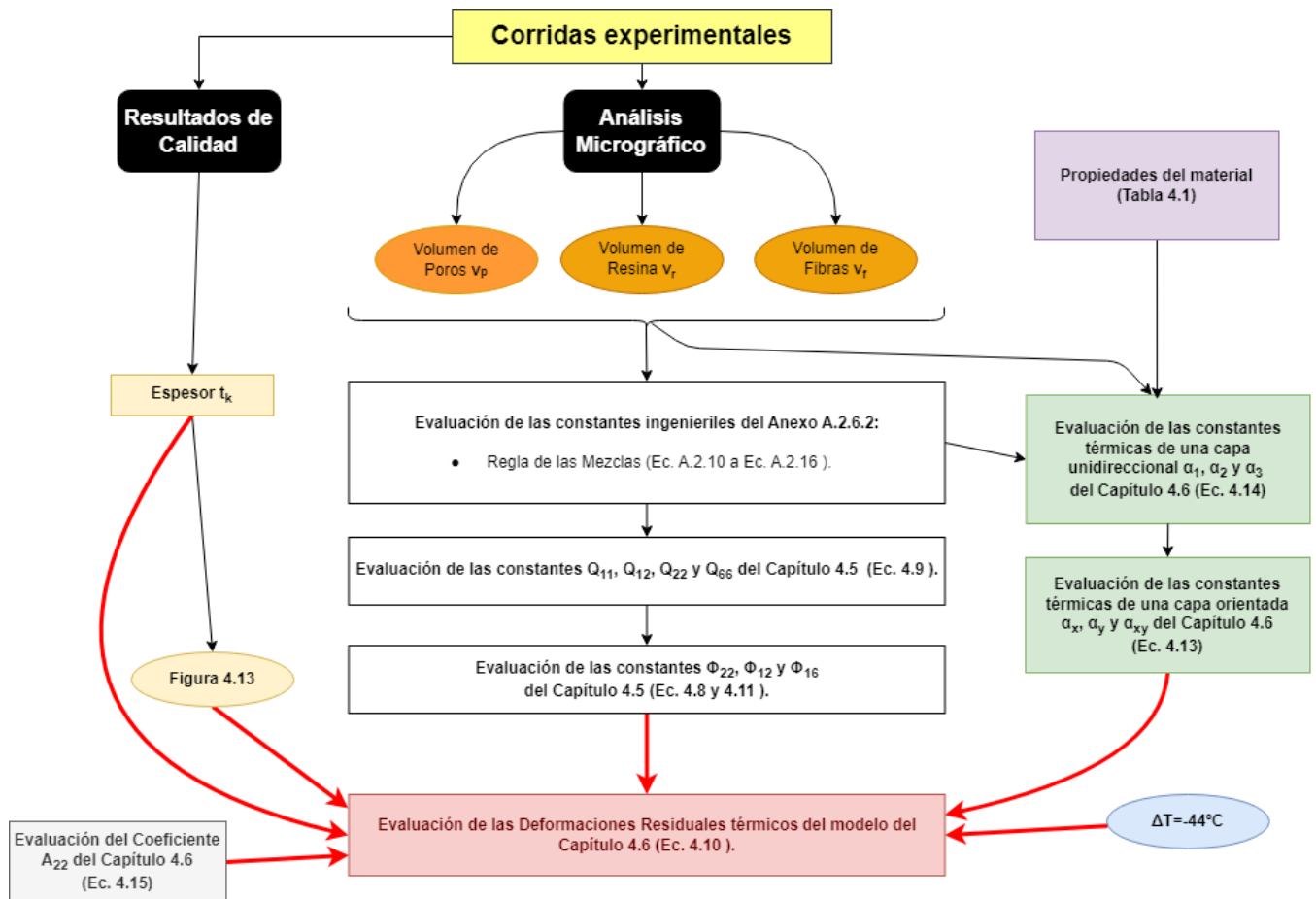


Figura 4.15: Resumen del método general para obtener los resultados de las Deformaciones Residuales según el modelo simplificado según la TCL.

Capítulo 5:

Diseño de experimentos: Variables y Respuestas.

5.1. Introducción.

El diseño estadístico de experimentos (o DOE, del inglés “*Design of experiments*”) es una de las formas más eficaces de hacer pruebas. Consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras.

En general, cuando se quiere mejorar un proceso existen dos maneras básicas de obtener la información necesaria para ello: una es observar o monitorear vía herramientas estadísticas, hasta obtener señales útiles que permitan mejorarlo; se dice que ésta es una estrategia pasiva. La otra manera consiste en experimentar, es decir, hacer cambios estratégicos y deliberados al proceso para provocar dichas señales útiles. Al analizar los resultados del experimento se obtienen las pautas a seguir, que muchas veces se concretan en mejoras sustanciales del proceso. En este sentido, experimentar es mejor que sentarse a esperar a que el proceso nos indique por sí solo cómo mejorarlo. El diseño de experimentos es un conjunto de técnicas Activas, en el sentido de que no esperan que el proceso mande las señales útiles, sino que éste se “manipula” para que proporcione la información que se requiere para su mejoría.

El objetivo de los métodos estadísticos es lograr que el proceso de generar conocimiento y aprendizaje sea lo más eficiente posible mediante un proceso iterativo en el que interactúan dos polos: por un lado están la teoría, los modelos, las hipótesis, las conjeturas y los supuestos; por el otro, están la realidad, los hechos, los fenómenos, la evidencia y los datos.

Los resultados experimentales obtenidos mediante el diseño de experimentos son observaciones muestrales, no poblacionales. Por ello, se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales (experimentales) son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (o a nivel proceso). La

técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza o ANOVA (acrónimo en inglés).

Para el trabajo de investigación actual, se requiere llevar a cabo una investigación de diseño experimental de las VARIABLES de fabricación y diseño que afectan la calidad, resistencia y rigidez de los recipientes fabricados con materiales compuestos, y sobre todo medir el impacto de estas variables en el valor de las TR obtenidas. Para esto se consideraron de interés experimental 4 diferentes tipos de cilindros (en relación a la configuración de la secuencia de apilamiento). En estos cilindros se requieren medir las RESPUESTAS frente a estas variables importantes para definir estas piezas:

- Longitud¹.
- Diámetro interior¹.
- Espesor¹.
- La fracción en volumen de las fibras.
- Resistencia aparente mediante el estándar [ASTM D 2290](#).
- Deformaciones residuales mediante el método del corte.

Los primeros parámetros, son parámetros de calidad como la longitud, el diámetro interior y el espesor. Los otros tres parámetros son las RESPUESTAS del diseño de experimentos: Fracción en volumen de las fibras, Resistencia aparente circunferencial y las TR obtenidas.

Todos estos parámetros se deben medir, teniendo en cuenta además que deben variarse cinco importantes VARIABLES en el proceso de enrollamiento filamentario:

- Tensión de bobinado (Alta o baja).
- Gradiente de ángulo entre pasadas (Grande o chico).
- Tiempo de bobinado (Largo o corto).
- Grosor de las capas (Grueso o Fino).
- Temperatura de la batea (40°C o ambiente).

Si se varía una a una las variables de bobinado y teniendo en cuenta todas las posibles variaciones, se tienen que realizar una importante cantidad de experimentos. La [Tabla 5.2](#) resume los mismos. Se contabilizan en total $2^5=32$ experimentos, con lo cuál, dada la enorme cantidad de variables a medir, hace imperiosa la necesidad de reducir la cantidad de

¹ Estos son simplemente parámetros de calidad del experimento. Mediante el presente DOE no se espera ni se desea cambiar o mejorar estos parámetros.

experimentos necesaria y obtenerse a la vez conclusiones provechosas y estadísticamente fundamentadas. Esas conclusiones nos permitirán tener a mano las variables adecuadas que permitan optimizar el diseño de componentes fabricados mediante EF a futuro.

La herramienta fundamental que nos permitirá reducir los experimentos es un método estadístico llamado “Diseño de experimentos” (DOE), el cual, aplicado a nuestro caso, se desarrollará a continuación. El Nivel de cada una de las variables es 2 (para hacer correctamente el diseño de experimentos se deben variar las variables entre dos valores extremos llamados Niveles). El experimento definido así se define como de Factorial 2^5 Fraccionado a $\frac{1}{4}$ (un cuarto), con lo que en este caso serían 8 corridas, con Resolución 3 (Véase la [Figura 5.1](#)). En las siguientes secciones se desarrollará mas a fondo cada uno de estos conceptos, siguiendo la aplicación del método según la siguiente bibliografía: “Análisis y diseño experimentos” de Humberto Gutiérrez Pulido ([H. G. Pulido, 2008](#)) y “Diseño de experimentos: estrategias y análisis en ciencias e ingenierías” de Jorge Dominguez Dominguez ([Jorge Dominguez Dominguez, 2010](#)).

Diseños factoriales disponibles (con resolución)															
	Factores														
Corri	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Com	III													
8		Com	IV	III	III	III									
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	III
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	IV

Figura 5.1: Diseños Factoriales (imagen extraída del software Minitabs®).

Cabe mencionar que el experimento original consistía en estudiar 6 factores, pero por cuestiones de facilidades, equipos disponibles para tal fin, instrumentación necesaria para evaluar ciertos parámetros y tiempo, se redujo la experiencia al estudio de 5 variables. Se pasó de estudiar 16 corridas a realizar 8. Sin embargo, el Departamento de diseño de estructuras en el CAC está interesado en realizar esas experiencias a futuro. Es por ello que más adelante se explicará el proyecto de realizar un dispositivo adecuado para tal fin ([Anexo 4](#)).

5.2. Selección de las variables a estudiar.

Las variables de fabricación para un tubo estructural mediante enrollamiento filamentario son muchas y de origen muy diverso. Según el trabajo de Cohen, pueden llegar a ser 50 ([Cohen, 1997](#)). Se mencionan a continuación alguna de las variables que el autor considera que influyen en el presente estudio, reflejadas en la **Tabla 5.1**. Las variables resaltadas en cursiva son las VARIABLES del estudio para el diseño de experimentos (DOE) elegidas por el autor del presente trabajo. En rojo, se encuentra una variable más que es de interés a futuro que es la temperatura del mandril.

En el [Anexo 4](#) se explica más a fondo cómo se desea estudiar en un futuro esa variable. Básicamente, se desea estudiar las corridas experimentales como se realizaron en el presente trabajo, con el mandril a temperatura ambiente, sin precalentar previo al proceso, versus el mandril calentado a 80°C (según la bibliografía, el mandril calentado a esa temperatura inicia el curado rápidamente y previo a la entrada en el autoclave, lo cual reduce las TR, además que tendría el beneficio de que facilitaría la extracción del mandril).

Para elegir estas variables el autor tuvo en cuenta aquellas que puede controlar adecuadamente mediante el proceso, son de interés propio y del Departamento de Diseño (consideradas de interés para futuros proyectos en CNEA) y son además de interés práctico. Los materiales y la geometría del mandril son variables puestas a priori, ya que dependen del sistema que se quiere estudiar en el Departamento, en base a futuros proyectos.

Las variables Aleatorias, como su nombre lo indican, no se pueden controlar adecuadamente en la experiencia por el investigador. Más allá de que se realizaron las laminaciones en ambientes controlados mediante aires acondicionados, no se pudo asegurar adecuadamente la invariabilidad de las condiciones medioambientales en cada experiencia. El daño que se produce en las fibras durante el proceso y su variabilidad de resistencia tampoco puede controlarlas adecuadamente el experimentador.

Otras variables detalladas en la **Tabla 5.1** dependen de las calibraciones previas que se realizan en la maquina y que el investigador tiene incidencia directa.

Finalmente, las condiciones a variar en el DOE son las siguientes:

- Tensión de bobinado: Alta o baja (+1y -1).
- Gradiente de ángulo entre pasadas: Grande o chico (+1y -1).

- Tiempo de bobinado: Largo o corto (+1y -1).
- Grosor de las capas: Grueso o Fino (+1y -1).
- Temperatura de la batea: 40°C o ambiente (+1 y -1).
- Temperatura del mandril:** 80°C o ambiente (+1 y -1).

Para el DOE es conveniente adoptar una nomenclatura muy común en la bibliografía. Se adopta como **+1** cuando la variable ocurre o tiene su valor máximo, y **-1** cuando no ocurre o tiene su valor mínimo.

Tabla 5.1: Variables más importantes del proceso de EF.

Variables Aleatorias
Temperatura Ambiente
Humedad Relativa
Variabilidad en la resistencia de las fibras
Daño de la fibra durante el enrollamiento
Variables propias del compuesto
Tipo y calidad de la fibra
Tipo y calidad del sistema resina-endurecedor
Variables Controlables por el operador
Diámetro del Tubo
Longitud a laminar
Preparación de la Resina
Impregnación de la fibra
Contenido de resina
Tiempo de enrollamiento entre pasadas
Calibración del Dr. Blade
Calibración de la posición 0° del ojal
Presencia o no de pines
Tipos de pines
Distancia entre pines
Distancia del Devanador a la máquina
Ciclo de curado
Tipo y calidad de la Mylar
Tensión del Mylar
Sistema de Extracción de los tubos
Temperatura del Mandril
Variables Controlables por el operador & DOE
<i>Tension durante el enrollamiento</i>
<i>Gradiente angular entre pasadas (Secuencia de apilamiento)</i>
<i>Tiempo total del proceso de enrollamiento</i>
<i>Grosor de las capas</i>
<i>Temperatura de la Batea</i>

5.3. Selección de las respuestas a estudiar.

Se desean obtener los siguientes 5 parámetros medidos directamente luego del proceso de curado en los tubos fabricados:

- La fracción en volumen de las fibras.
- La fracción en volumen de resina.
- La fracción en volumen de poros.
- Resistencia aparente mediante el estándar [ASTM D 2290](#).
- Deformaciones residuales mediante el método del corte.

Se obtienen también los siguientes parámetros que tienen que ver con mediciones de calidad que se harían a cualquier tubo fabricado: longitud del tubo, diámetro final interior y el espesor.

Las TR obtenidas mediante el Método de Corte se comparan con las TR del modelo teórico y se realizará un análisis cualitativo de esta diferencia, y de las diferencias ente los perfiles de TR obtenidos para cada capa.

5.4. Fundamentos de un Diseño de experimentos.

Como se explicó anteriormente, investigar todos los factores (VARIABLES) que influyen en un proceso requiere de muchísimas pruebas experimentales (denominados TRATAMIENTOS) y por tanto mucho tiempo y dinero. Mediante el “Diseño de experimentos” puedo obtener un menor número de experimentos, y aún así obtener conclusiones relevantes sobre los parámetros a estudiar.

Debido a las características del proceso de enrollamiento filamentario se decidió analizar ciertas variables de interés. Las Respuestas se seleccionaron en base a la facilidad de comprensión e implementación.

Las VARIABLES que el investigador eligió, no varían punto a punto en un amplio rango, sino que solo se utilizan dos valores (o NIVELES en la terminología del DOE), lo más extremos posibles, para conducir a conclusiones interesantes sobre que cuales de estas VARIABLES inciden más en las respuestas. Es por ello que mediante este método no se estudian meramente los valores medios sino su variabilidad, su varianza. Es por ello que en el DOE es tan importante el Análisis de Varianzas (o ANOVA). Es decir, queremos saber si por ejemplo, según nuestras

hipótesis, al aumentar más la Tensión, se aumenta la el porcentaje de fibra, estudiando si al variar desde un NIVEL mínimo a uno máximo el nivel de tensión, se observa una importante variabilidad en la RESPUESTA. Esto se denomina en la jerga como “Diseño factorial fraccionado a dos niveles”. Sea 2^k el numero de experimentos de factorial completo o total a dos niveles, k es el numero de variables a analizar. En nuestro caso: 2^5 son 32 experimentos. Se denomina 2^{k-p} al fraccionamiento que se desea utilizar. Si $p=1$, el fraccionamiento es a la mitad (se reduce a la mitad de experimentos de la variable original). Si $p=2$, el fraccionamiento es de un cuarto de los experimentos. Si $p=3$ el fraccionamiento se reduce una octava parte.

El Diseño de Experimentos mediante Factoriales Fraccionados se basa en dos principios: el Principio de Pareto (al incluir una elevada cantidad de factores en la fase inicial de un experimento, solamente unos pocos son los responsables de una mayor variabilidad de la respuesta) y el Principio de Jerarquización de Efectos (Son mas importantes los efectos principales, seguidos por las interacciones dobles, las triples, etc.). Se espera que las interacciones de orden superior tienen, de manera relativa, un mayor efecto sobre la respuesta que el efecto de interacciones de orden menor, o que el efecto principal de cada factor. Entonces, en un diseño factorial 2^5 , se podría pensar a priori que el efecto de las interacciones dobles es de menor importancia que los efectos simples. Según la **Figura 5.1**, las 8 experiencias que tenemos que realizar para 5 FACTORES, nos indican resolución de tipo III. Esto quiere decir que se espera una “Confusión” de efectos entre los simples y los dobles. A pesar de ello, aplicando la teoría, se considera que los efectos de las interacciones dobles son despreciables. Es por ello que también es interesante a futuro realizar el estudio de una variable más, aprovechando la experiencia del actual trabajo, y alcanzando una Resolución IV, es decir, que los efectos simples ya no quedan “confundidos” con los dobles, aunque puede haber confusiones con interacciones de grado superior.

Se describirá ahora, como se implementará el diseño de experimentos en el presente trabajo. En primer lugar, se ve en la **Tabla 5.2** que se necesitan al menos 32 experimentos para analizar como influyen las VARIABLES en las 5 respuestas a obtenerse.

Como se dijo anteriormente, por requerimientos de equipamiento, facilidades y tiempo, se redujo el número de experimentos a 8 CORRIDAS, de unas 16 en el DOE original. Las 16 corridas con 6 factores se detallan en la **Tabla 5.3**.

Tabla 5.2: Diseño factorial completo a dos niveles de 5 factores.

Orden de la Corrida	Tensión de Bobinado	Tiempo de Bobinado	Diferencia de Angulo e/ capas	Grosor de capa	Temperatura Batea	Notación de Yates*
1	-1	-1	-1	-1	-1	(1)
2	+1	-1	-1	-1	-1	a
3	-1	+1	-1	-1	-1	b
4	+1	+1	-1	-1	-1	c
5	-1	-1	+1	-1	-1	d
6	+1	-1	+1	-1	-1	e
7	-1	+1	+1	-1	-1	ab
8	+1	+1	+1	-1	-1	ac
9	-1	-1	-1	+1	-1	ad
10	+1	-1	-1	+1	-1	ae
11	-1	+1	-1	+1	-1	bc
12	+1	+1	-1	+1	-1	bd
13	-1	-1	+1	+1	-1	be
14	+1	-1	+1	+1	-1	cd
15	-1	+1	+1	+1	-1	ce
16	+1	+1	+1	+1	-1	de
17	-1	-1	-1	-1	+1	abc
18	+1	-1	-1	-1	+1	abd
19	-1	+1	-1	-1	+1	abe
20	+1	+1	-1	-1	+1	acd
21	-1	-1	+1	-1	+1	ace
22	+1	-1	+1	-1	+1	ade
23	-1	+1	+1	-1	+1	bcd
24	+1	+1	+1	-1	+1	bce
25	-1	-1	-1	+1	+1	bde
26	+1	-1	-1	+1	+1	cde
27	-1	+1	-1	+1	+1	abcd
28	+1	+1	-1	+1	+1	abce
29	-1	-1	+1	+1	+1	abde
30	+1	-1	+1	+1	+1	acde
31	-1	+1	+1	+1	+1	bcde
32	+1	+1	+1	+1	+1	abcde

* La notación de Yates en diseño de experimentos es una forma de organizar los datos de un experimento factorial 2^k en una secuencia que simplifica el cálculo (que se verá más adelante) de las sumas de cuadrados y los efectos.

Tabla 5.3: Diseño factorial fraccionado a dos niveles de 6 factores.

Orden de la Corrida	Tensión de Bobinado	Tiempo de Bobinado	Diferencia de Angulo e/ capas	Grosor de capa	Temperatura Batea	Temperatura del Mandril
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	+1	-1
3	-1	+1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	-1	+1
5	-1	-1	+1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	+1	+1
11	-1	+1	-1	+1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1	-1
15	-1	+1	+1	+1	-1	+1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Las 8 corridas elegidas, que son una reducción del problema inicial de la [Tabla 5.3](#) se presentan a continuación en la [Tabla 5.4](#). Estas corridas no son las que presentarían los resultados del análisis del DOE con menor aberración². Sin embargo esos resultados se complementarían muy bien en un futuro con un DOE de Resolución IV con 16 corridas (recordar que a futuro se quiere estudiar la influencia del calentamiento del mandril). Cabe aclarar que existen varios patrones candidatos que cumplan las condiciones de la Diferencia de Ángulo entre capas y Grosor de capas. Se decidió implementar en base a los patrones que el

² Existen $\binom{32}{8}=10.518.300$ formas (teniendo en cuenta el orden en que se realizan las experiencias) de elegir 8 tratamientos de 32 posibles para un DOE de 5 factores fraccionado a un cuarto, y solo unos pocos producen la menor aberración posible. Debido a que el Diseño de Experimento adoptado en la presente tesis no es el estándar que aparece por defecto en cualquier software de estadística tal como Minitabs®, Statgraphics® u otros, se van a explicitar todos los pasos para explicar cómo se calculan los Contrastes, Efectos, Alias y Confusiones a mano utilizando una planilla de cálculo como aliada. El uso de software especializado como Minitabs® se utilizará de forma complementaria, ya que trae consigo las herramientas para analizar rápidamente cada uno de los ítems anteriores con relativa facilidad y sirve para verificar los resultados obtenidos a mano.

autor decidió que eran más interesantes para estudiar, los patrones detallados en la misma **Tabla 5.4**. La nomenclatura de como se especifican los patrones puede consultarse en cualquier libro de compuestos, como por ejemplo en el Capítulo 6.3.1 del trabajo de Barbero [Barbero, 2011](#)).

Tabla 5.4: Diseño factorial fraccionado a dos niveles de 5 factores.

Orden nominal Establecido *	Nº de Corrida del DOE original (2 ⁶)**	Tensión de Bobinado	Tiempo de Bobinado	Diferencia de Angulo e/ capas	Grosor de capa	Temperatura Batea	Patrón
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	[±89 ±45 ±5 ±45 ±89] _T
18	2	+1	-1	-1	-1	+1	[±89 ±45 ±5 ±45 ±89] _T
7	7	-1	+1	+1	-1	-1	[±45] _S
24	8	+1	+1	+1	-1	+1	[±45] _S
27	11	-1	+1	-1	+1	+1	[±89 ₂ ±45 ₂ ±5] _S
12	12	+1	+1	-1	+1	-1	[±89 ₂ ±45 ₂ ±5] _S
29	13	-1	-1	+1	+1	+1	[±89 ₂ ±5 ₂ ±89] _S
14	14	+1	-1	+1	+1	-1	[±89 ₂ ±5 ₂ ±89] _S

* Véase **Tabla 5.2**.

** Véase **Tabla 5.3**. De ahora en más “Nº de Corrida”.

5.5. Interacción de factores, cálculo de contrastes y confusiones.

La **Tabla 5.4** muestra el orden de las corridas y los factores simples. Se renombran a continuación (para simplificar la información de las tablas que siguen) simplemente como: Factor A= Tensión de Bobinado, Factor B= Tiempo de Bobinado, Factor C= Diferencia de Angulo e/ capas, Factor D= Grosor de capa, Factor E= Temperatura Batea. Se detallan a continuación la tabla con los factores simples (**Tabla 5.5**), interacciones dobles (**Tabla 5.6**), interacciones triples (**Tabla 5.7**), interacciones cuádruples e interacciones quíntuples (**Tabla 5.8**). Son 31 factores para 32 posibles corridas. Se aclara en cada tabla se reproduce la notación de Yates, en base al orden nominal establecido de la **Tabla 5.2**. Esto es muy importante para calcular luego los Contrastes.

El cálculo del valor de una casilla con una interacción doble se calcula realizando el producto que encabeza la columna. Por ejemplo, la interacción ab de la Corrida 7 es **-1 x +1=-1**. Mediante estas tablas se puede conocer también lo que en la jerga del DOE se llama como “Relación

definidora”. Son aquellas interacciones que tienen en toda su columna el mismo signo, tales como las de las interacciones triples ADE, BCD en la [Tabla 5.7](#) y la interacción cuádruple ABCE en la [Tabla 5.8](#).

Tabla 5.5: Factores simples.

Notación de Yates	Nº de Corrida	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	Factor E
(1)	1	-1	-1	-1	-1	-1
abd	2	+1	-1	-1	-1	+1
ab	7	-1	+1	+1	-1	-1
bce	8	+1	+1	+1	-1	+1
abcd	11	-1	+1	-1	+1	+1
bd	12	+1	+1	-1	+1	-1
abde	13	-1	-1	+1	+1	+1
cd	14	+1	-1	+1	+1	-1

Tabla 5.6: Interacciones Dobles.

Notación de Yates	Nº de Corrida	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
(1)	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
abd	2	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
ab	7	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
bce	8	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
abcd	11	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
bd	12	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
abde	13	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
cd	14	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1

Tabla 5.7: Interacciones Triples.

Notación de Yates	Nº de Corrida	ABC	ABD	ABE	ACD	ACE	ADE	BCD	BCE	BDE	CDE
(1)	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
abd	2	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
ab	7	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
bce	8	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
abcd	11	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
bd	12	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
abde	13	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1
cd	14	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1

Tabla 5.8: Interacciones Cuádruples y Quintuples.

Notación de Yates	Nº de Corrida	ABCD	ABCE	ABDE	ACDE	BCDE	ABCDE
(1)	1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
abd	2	-1	+1	+1	+1	-1	-1
ab	7	+1	+1	-1	-1	+1	-1
bce	8	-1	+1	-1	-1	-1	-1
abcd	11	+1	+1	-1	+1	-1	+1
bd	12	-1	+1	-1	+1	+1	+1
abde	13	+1	+1	+1	-1	-1	+1
cd	14	-1	+1	+1	-1	+1	+1

Gracias a la Notación de Yates, se puede saber la expresión de los contrastes para cada factor o interacción. Se multiplica cada expresión contenida dentro de la notación por cada fila, por +1 o -1, según corresponda. El contraste se calcula sumando cada una de estas expresiones sobre cada columna. Por ejemplo, para el Factor ACD, el contraste se calcula como: **Contraste_ACD=(-1x(1))+(+1x abd)+(+1x ab)+(-1x bce)+(+1x abcd)+(-1x bd)+(-1x abde)+(+1x cd)=-(-1)+abd +ab-bce+abcd-bd-abde+cd**. Estas expresiones de contraste se calculan fácilmente en una planilla tal como el Excel®, en donde los “+1” y “-1” se convierten previamente en “+” y “-” respectivamente y luego se utilizan fórmulas de concatenación para evaluar las expresiones resultantes. Cuando dos contrastes tienen una expresión exactamente igual se dice en la jerga que se “confunden” el uno con el otro. Es decir, no se puede diferenciar

[illegible]

Figura 5.3: Análisis de contrastes y alias negativos mediante el software Excel®.

Tabla 5.9: Tabla de expresiones de Contrastes y alias.

Interacción Principal de mayor orden	Alias	Expresión para evaluar el contraste
I*	+ADE+BCD- ABCE	---
A	-DE+BCE-ABCD	-(1)-ab+bd+cd+abd+bce-abcd-abde
B	-CD+ACE- ABDE	-(1)+ab+bd-cd-abd+bce+abcd-abde
C	-BD+ABE- ACDE	-(1)+ab-bd+cd-abd+bce-abcd+abde
D	-AE-BC+ABCDE	-(1)-ab+bd+cd-abd-bce+abcd+abde
E	-AD+ABC -BCDE	-(1)-ab-bd-cd+abd+bce+abcd+abde
AB	+CE- ACD- BDE	+(1)-ab+bd-cd-abd+bce-abcd+abde
AC	+BE-ABD-CDE	+(1)-ab-bd+cd-abd+bce+abcd-abde

*Relación definidora.

5.5. Cálculo de los Efectos.

Los Efectos de cada factor e interacción se calculan fácilmente sabiendo la expresión de los contrastes (**Ecuación 5.1**):

$$Efecto\ X = \frac{Contraste\ X}{2^{k-p-1}} = \frac{Contraste\ X}{4} \quad \text{Ec. 5.1}$$

En donde k son los factores del DOE (en este caso k=5) y p es el grado de fraccionamiento (en este caso es un cuarto: $\frac{1}{4}=2^{-2}$, por tanto p=2).

5.6. Gráficas de Daniel y Diagramas de Pareto.

Mediante el cálculo de Efectos se puede evaluar cuáles de ellos son más importantes que otros de manera visual mediante las Gráficas de Daniel y los Diagramas de Pareto.

5.6.1 Gráfico de efectos en papel normal (Gráfica de Daniel).

Gráfico que permite visualizar cuáles efectos pueden ser significativos: entre más se aleje un punto de la línea, más importante será el correspondiente efecto. Al usar los efectos como sumas de variables aleatorias (diferencia de medias), Daniel (1959) se dio cuenta de que los efectos no significativos deben seguir una distribución normal con media igual a cero y varianza constante. Esto implica que si los efectos se grafican en papel probabilístico normal, los que no son significativos tenderán a formar una línea recta, mientras que los efectos activos aparecerán alejados de la línea de normalidad. Para realizar este gráfico se debe hacer una tabla con los efectos ordenados del mayor al menor, siendo los mismos el eje X del gráfico. En el eje Y va la llamada “proporción”. Siendo “i” el índice de un dado efecto, la proporción del mismo se calcula como $proporción = (i - 0,5)/N$, donde N es el número de efectos evaluados.

5.6.2 Diagrama de Pareto de efectos.

Gráfico de barras que representa los efectos ordenados en forma descendente de acuerdo con su magnitud absoluta. Se complementa esto además con una asíntota vertical que tiene el valor absoluto del efecto estandarizado, que se calcula en base a la distribución T de Student, con el valor α de significancia prefijado (normalmente $\alpha = 0,05$) y los grados de libertad del error. En Excel® esto se calcula como $t = -INV.T(\alpha/2; GL_{error})$. El diagrama de Pareto para los efectos sin estandarizar representa una manera práctica de ver cuáles efectos son los más grandes en cuanto a su magnitud. El Pareto representa de manera descriptiva la realidad observada de los efectos, pero sin considerar supuestos distribucionales. En la gráfica de efectos en papel de probabilidad normal (gráfico de Daniel) es más difícil apreciar la importancia relativa de los efectos, pero es mejor que el Pareto para señalar cuáles efectos son activos. Por ello, lo mejor es utilizar ambas gráficas para decidir cuáles efectos mandar al error. En este trabajo, sin embargo, se trabajará con el Diagrama de Pareto de Efectos, por su sencillez y practicidad.

Con el Pareto y el gráfico de Daniel muchas veces se logran detectar claramente los efectos significativos, y una vez que se construya el error, el ANOVA sólo confirmará lo que ya se ha encontrado con estos gráficos.

5.7. Construcción del ANOVA de los efectos más importantes.

Con ayuda de las gráficas anteriores se pueden saber de antemano cuales efectos son menos importantes que otros, pero hace falta saber si el efecto es estadísticamente importante en cuanto al cambio en las respuestas. Es por eso que se realiza el análisis de varianzas, más conocido como ANOVA.

El análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. En el caso de un diseño completamente al azar se separan la variabilidad debida a los tratamientos y la debida al error. Cuando la primera predomina “claramente” sobre la segunda, es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto, o dicho de otra manera, las medias son diferentes. Cuando los tratamientos no dominan contribuyen igual o menos que el error, por lo que se concluye que las medias son iguales.

Para esto se deben establecer unos conceptos adicionales importantes:

-Suma de cuadrados:

Para los efectos no depreciables, la suma de cuadrados se calcula como (**Ecuación 5.2**):

$$SC_x = \frac{(\text{Contraste } X)^2}{2^{k-p}} = \frac{(\text{Contraste } X)^2}{8} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Para el total, se suman todas las sumas de cuadrados, tanto las depreciables como las que no. Y para la suma del cuadrado del error, se resta la total respecto de la suma de cuadrados de efectos importantes (**Ecuación 5.3**), ya que:

$$SC_{total} = \sum SC_{trat. \text{ no depreciables}} - SC_{error} = \sum_{i=1}^{N \text{ efectos}} SC_i \quad \text{Ec. 5.3}$$

-Grados de libertad:

En el caso de los efectos importantes serían 1. Los grados totales de libertad del experimento serían $2^k-1=2^5-1=31$. Los grados de libertad del error es 2^5-1-w , donde w es el número de defectos importantes hallados con las Gráficas de Daniel y Pareto.

-Cuadrados medios:

Las sumas de cuadrados divididas entre sus respectivos grados de libertad se llaman cuadrados medios. Los dos que más interesan son el cuadrado medio de tratamientos y el cuadrado medio del error (**Ecuación 5.4**).

$$\begin{aligned} CM_{trat} &= \frac{SC_{trat}}{k-1} \\ CM_{error} &= \frac{SC_{error}}{N-k} \end{aligned} \quad \text{Ec. 5.4}$$

-Cálculo del estadístico F_0 y del valor -p:

Siendo Y_{ij} el valor que toma una RESPUESTA de un dado tratamiento i , se postula que su valor puede predecirse mediante la fórmula $Y_{ij}=\mu+\tau_i+\varepsilon_{ij}$. μ sería la media global (no la media muestral). τ_i son los residuos de cada RESPUESTA, calculados como $\tau_i=\mu_i-\mu$, donde μ_i es la media del tratameinto. ε_{ij} es el error (desconocido) de la medición de la RESPUESTA. Entonces, un ANOVA consiste en verificar si se acepta la hipótesis nula H_0 , confirmandose que los efectos sobre la RESPUESTA de los k tratamientos son estadísticamente nulos (iguales a cero), y en caso de rechazar se estaría concluyendo que al menos un efecto es diferente de cero e incide sobre la RESPUESTA. En formato de fórmulas (**Ecuación 5.5**):

$$\begin{aligned} \text{Hipotesis nula } H_0: \mu_1 &= \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \\ \text{Hipotesis alternativa } H_A: \mu_i &\neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j \end{aligned} \quad \text{Ec. 5.5}$$

O de forma equivalente (**Ecuación 5.6**):

$$\begin{aligned} \text{Hipotesis nula } H_0: \tau_1 &= \tau_2 = \dots = \tau_k = 0 \\ \text{Hipotesis alternativa } H_A: \tau_i &\neq 0 \text{ para algún } i \end{aligned} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Entonces, bajo el supuesto de que la hipótesis H_0 es verdadera, el estadístico³ siguiente (**Ecuación 5.7**):

$$F_0 = \frac{CM_{trat}}{CM_{error}} \quad \text{Ec. 5.7}$$

sigue una *distribución F* con $(k - 1)$ grados de libertad en el numerador y $(N - k)$ grados de libertad en el denominador. Si F_0 es grande, se contradice la hipótesis de que no hay efectos de tratamientos; en cambio, si F_0 es pequeño se confirma la validez de H_0 . Así, para un nivel de significancia α prefijado, se rechaza H_0 si $F_0 > F_{\alpha, k-1, N-k}$, donde $F_{\alpha, k-1, N-k}$ es el percentil $(1 - \alpha) \times 100$ de la *distribución F*. También se rechaza H_0 si el *valor-p* $< \alpha$, donde el *valor-p* es el área bajo la distribución $F_{k-1, N-k}$ a la derecha del estadístico F_0 , es decir, el *valor-p* $= P(F > F_0)$. Toda la información necesaria para calcular el estadístico F_0 hasta llegar al *valor-p* se escribe en la llamada tabla de análisis de varianza (ANOVA) que se muestra en la **Tabla 5.10**.

Tabla 5.10: Tabla ejemplo del cálculo de ANOVA para un diseño factorial 2⁵⁻³ donde tres de los factores no son depreciables.

Fuente de Variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor-p
Efecto A	SC _A	GL=1	CM _A	CM _A / CM _{error}	$P(F > F_0^A)$
Efecto C	SC _C	GL=1	CM _C	CM _C / CM _{error}	$P(F > F_0^C)$
Efecto AB	SC _{AB}	GL=1	CM _{AB}	CM _{AB} / CM _{error}	$P(F > F_0^{AB})$
Error	SC _{error}	GL _{error} =4	CM _{error}		
Total	SC _{total}	GL _{total} =7			

Se puede evaluar mediante tablas que siempre están presentes en los libros de estadística si $F_0 > F_{\alpha=0,05;GL;GL_{error}}$. Entonces se rechaza la hipótesis nula, y se deduce que el efecto produce cambios importantes en la RESPUESTA. Sin embargo, es más sencillo utilizar fórmulas para evaluar el *valor-p* del estadístico F_0 con un software de planilla de cálculo como el Excel®.

Se evalúa la función siguiente: “**valor-p**=DISTR.F.CD(F_0 ;GL;GL_{error})”.

³ Un estadístico se define como cualquier función de los datos muestrales que no contiene parámetros desconocidos. Un ejemplo de estadístico es la media muestral $\bar{X}$ con la cual se tratan de hacer afirmaciones sobre la media, μ , que es un parámetro poblacional.

Si el *valor-p* calculado es menor que el grado de significancia $\alpha = 0,05$, entonces se rechaza H_0 y se acepta que el factor o interacción en cuestión incide sobre la respuesta.

5.8. Verificación del DOE mediante MINITABS®.

El proceso anterior de generación a mano del DOE puede generar muchos errores. Con lo cual conviene siempre contrastar los resultados mediante un software para estudios estadísticos. En este trabajo se propone el software Minitabs® para realizar la verificación del DOE. Hay que realizar primero una construcción de un diseño estándar para un DOE de 5 factores con fracción $\frac{1}{4}$. Se selecciona la pestaña “Estadísticas”→“DOE”→“Factorial”→ “Crear Diseño Factorial”. Véase la [Figura 5.4](#).

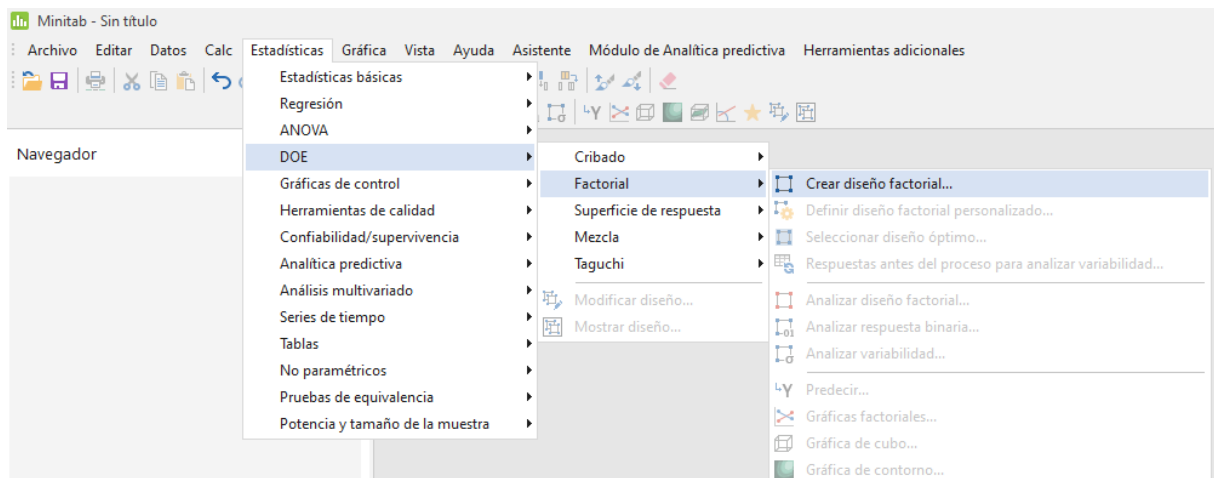


Figura 5.4: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Crear Diseño Factorial.

Luego se elige la opción “Factorial de 2 Niveles (generadores predeterminados)”, y en el Botón “Diseños”, elegimos la fracción de $\frac{1}{4}$. Véase la [Figura 5.5](#).

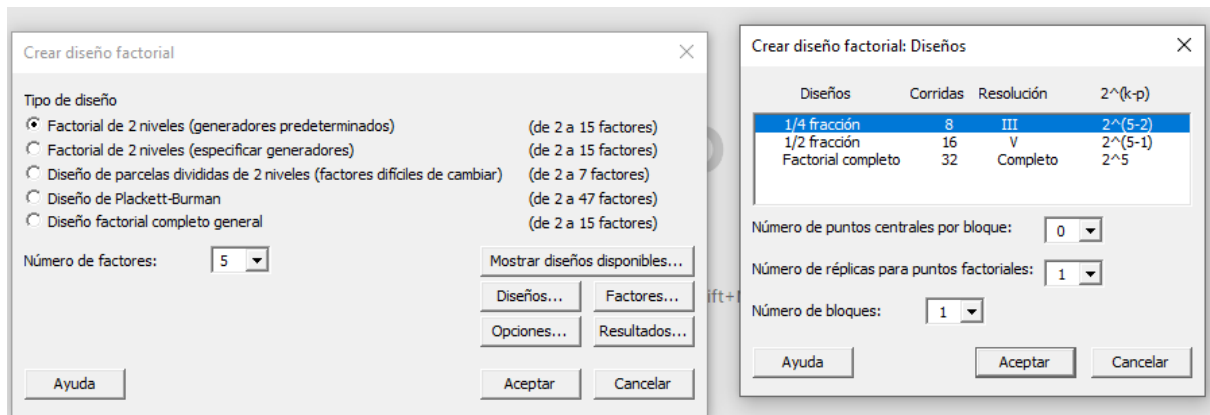


Figura 5.5: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de la Fracción de 1/4.

En el botón “Factores”, se pueden cambiar los nombres por defecto (A, B, C, D y E) por nombres mas descriptivos, como así también el tipo de dato de entrada y los valores “Bajos” y “Altos” por las magnitudes físicas del experimento. Estas últimas modificaciones no alteran el resultado final, pero por conveniencia se mantendrá la convención de tener el valor “Bajo” como **-1** y el valor “Alto” como **+1**. Véase la [Figura 5.6](#).

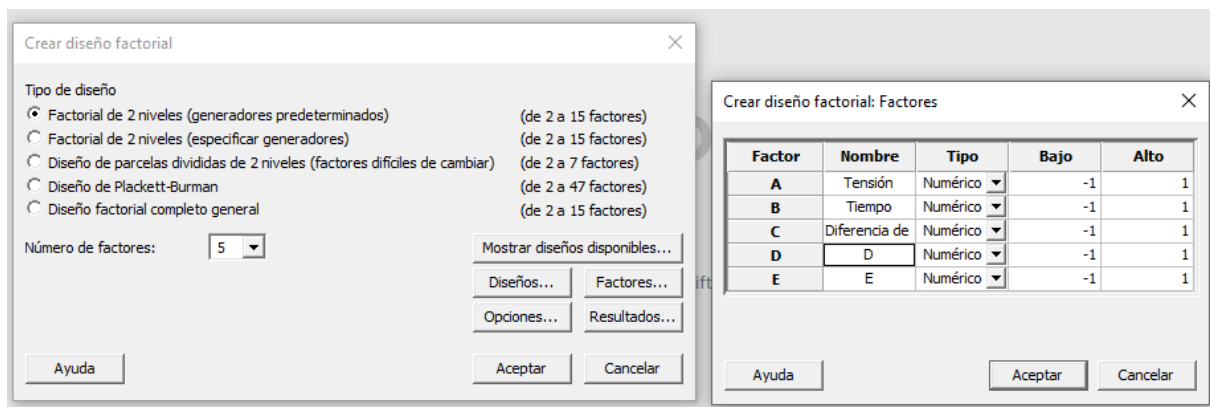


Figura 5.6: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Modificación de la visualización de los factores.

En cuanto al botón de “Opciones” simplemente debemos verificar que no esté activada la opción de “Aleatorizar corridas”, y en cuanto al botón “Resultados” nos aseguramos de que el programa nos proporcione toda la información posible. Esto se muestra en la [Figura 5.7](#), a la izquierda el panel de “Opciones” y a la derecha el de los “Resultados”.

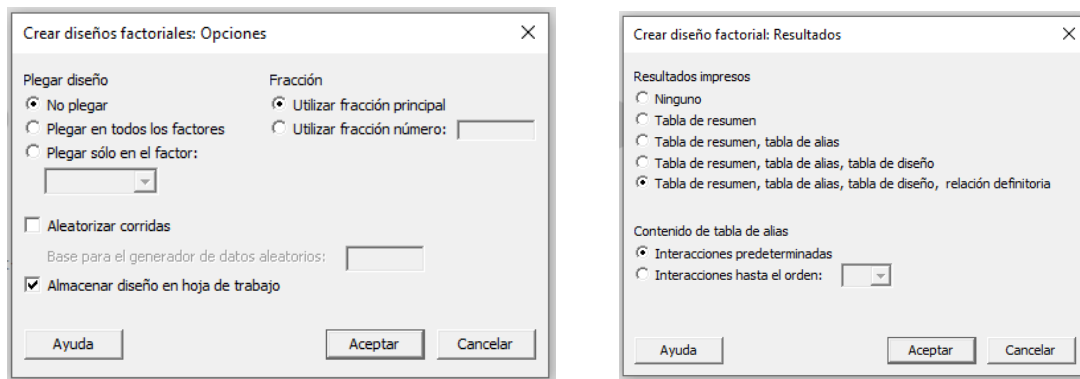


Figura 5.7: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Opciones y Resultados.

Una vez hecho esto, aceptamos y nos va a aparecer toda la información del estudio, tal como se muestra en la [Figura 5.8](#). Sin embargo, se debe notar que los valores de los signos **+1** y **-1** son diferentes a los de la [Tabla 5.5](#). Esto es porque por defecto Minitabs® reproduce la corrida con menor aberración que aparece en las bibliografías. Si embargo, esto se soluciona fácilmente, ya que se cambian manualmente los coeficientes de la tabla para que sean iguales a los de la [Tabla 5.5](#). Se deben agregar manualmente también los resultados a evaluar por el estudio en una columna adicional ([Figura 5.9](#)). Se pueden agregar tantos resultados como queramos.

Diseño factorial fraccionado

HOJA DE TRABAJO 7

Diseño factorial fraccionado

Resumen del diseño

Factores: 5 Diseño de la base: 5; 8 Resolución: III
Corridas: 8 Réplicas: 1 Fracción: 1/4
Bloques: 1 Puntos centrales (total): 0

* NOTA * Algunos efectos principales se confunden con interacciones de dos factores.

Generadores del diseño: D = AB; E = AC

Relación definitoria: I = ABD = ACE = BCDE

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Tensión	Tiempo	Diferencia de angulo	Grosor	Tº Batea
1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1
2	2	2	1	1	1	-1	-1	-1	-1
3	3	3	1	1	-1	1	-1	-1	1
4	4	4	1	1	1	1	-1	1	-1
5	5	5	1	1	-1	-1	1	1	-1
6	6	6	1	1	1	-1	1	-1	1
7	7	7	1	1	-1	1	1	-1	-1
8	8	8	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5.8: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Información del DOE por defecto.

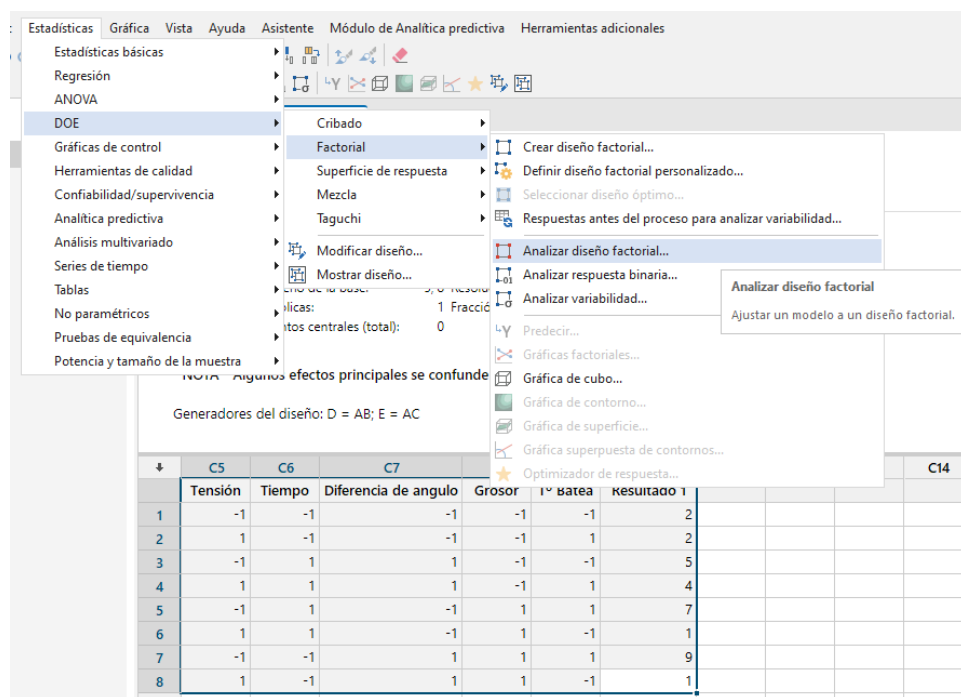


Figura 5.9: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Información del DOE modificado por el usuario y ejemplo de calculo de resultados.

En la **Figura 5.9** también se ve cómo empezar a evaluar los resultados. Se selecciona la pestaña “Estadísticas” → “DOE” → “Factorial” → “Analizar Diseño Factorial”. En este caso, hay un solo resultado en el ejemplo con valores aleatorios, pero aquí se deben evaluar posteriormente los resultados del % de Fibra, % de Poros, % de Resina, Tensión máxima (Disco partido), Carrera máxima (Disco partido) y Deformaciones Residuales. Estos resultados van a tener que seleccionarse en las RESPUESTAS del estudio. Véase **Figura 5.10**.

El botón “Términos” (**Figura 5.11**) indica los efectos que serán analizados en el ANOVA del DOE. En principio, deberíamos analizar todos los efectos que aparecen en la **Tabla 5.9**. Posteriormente hay que analizar las Gráficas de Daniel y Diagramas de Pareto que te ofrece el software, para hacer foco solo en los efectos de las variables más importantes. Se analizan entonces primeramente A, B, C, D, E, AB y AC y luego se realiza un nuevo estudio con los efectos de entre estos último que se consideren más importantes. Esto es porque se realiza un primer ANOVA con todos los efectos, y luego se va mejorando el análisis para incluir solo los efectos importantes, y todos los otros efectos se envían al error. Esto último se conoce como el “mejor ANOVA posible” del DOE analizado.

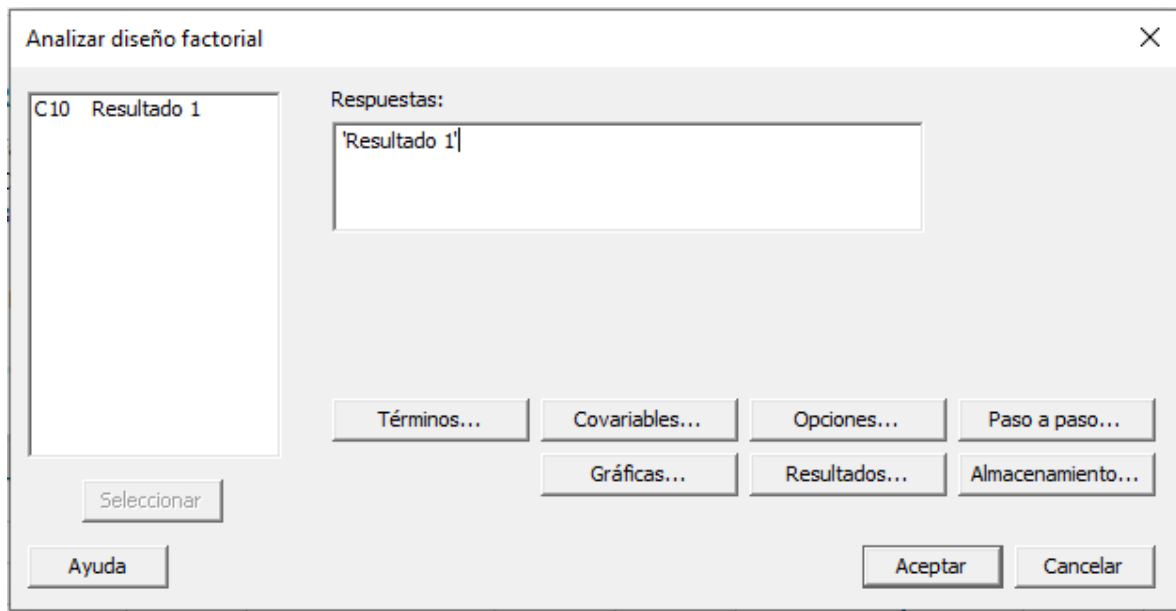


Figura 5.10: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de las RESPUESTAS a evaluar según el DOE establecido.

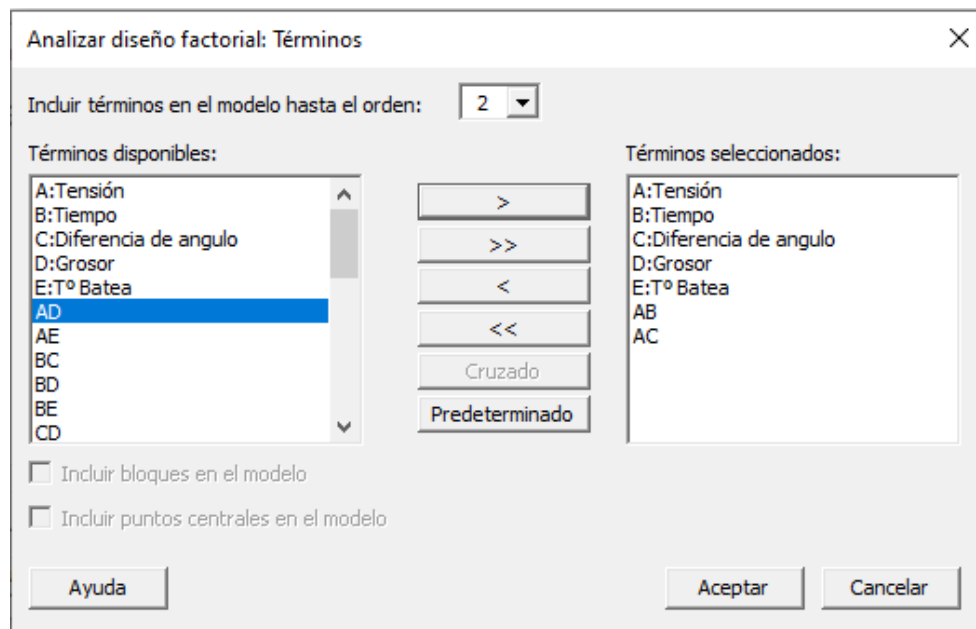


Figura 5.11: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de los Términos (efectos) a analizar en el DOE.

En cuanto a los botones de las “Gráficas”, “Resultados” y “Almacenamiento”, configuramos el estudio como se muestra en la **Figura 5.12**, **Figura 5.13** y **Figura 5.14** respectivamente. Los botones “Covariables”, “Opciones” y “Paso a paso” los dejamos configurados tal cómo están.

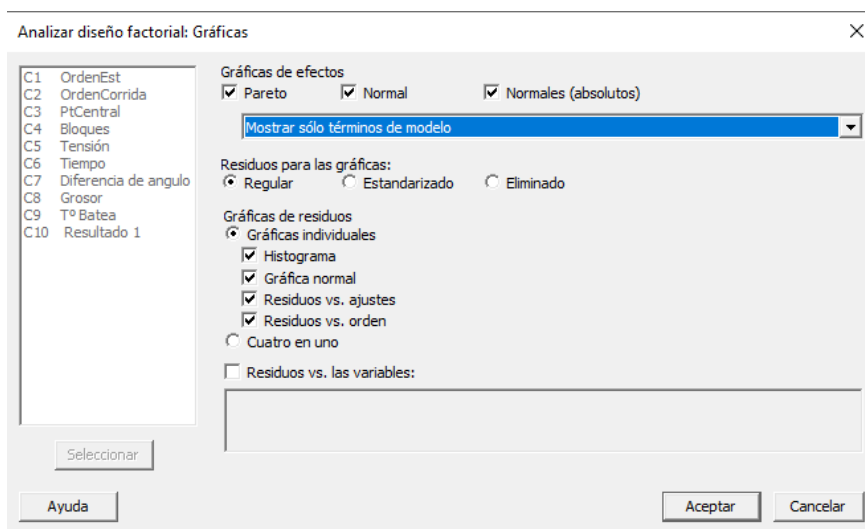


Figura 5.12: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Configuración de las gráficas a obtener durante el estudio.

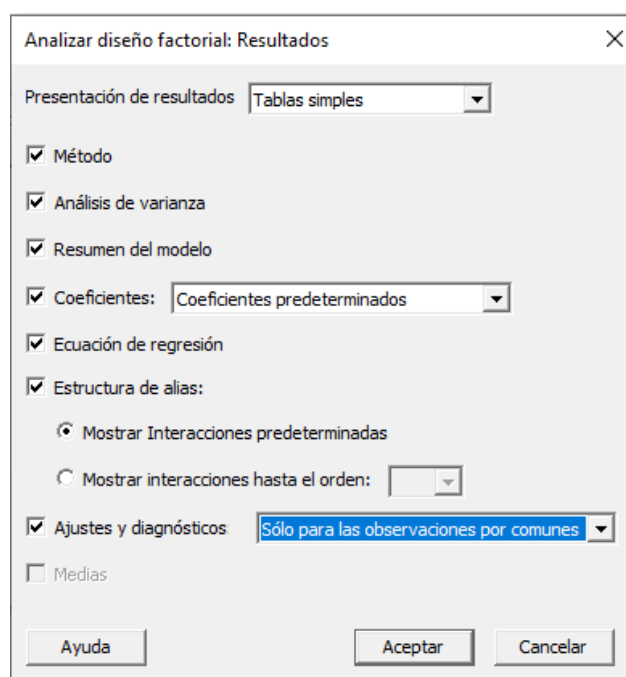


Figura 5.13: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Configuración de los Resultados a obtener durante el estudio.

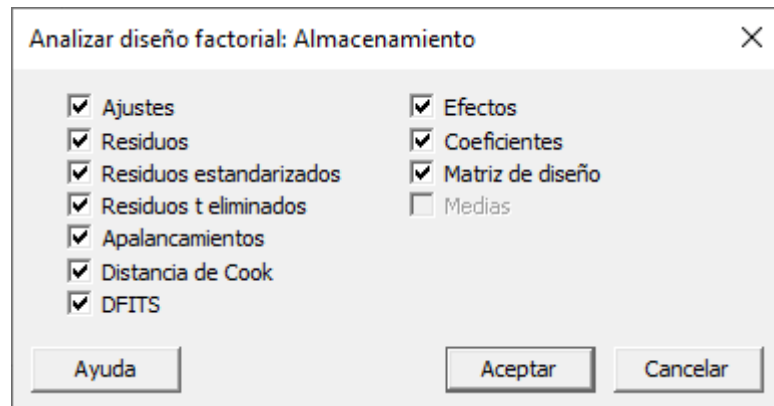


Figura 5.14: Verificación de resultado mediante Minitabs®. Selección de las variables que serán almacenadas durante el estudio.

5.9. Procedimiento General del DOE y cálculos estadísticos complementarios del presente trabajo.

Se presenta a continuación el esquema general de trabajo que conecta los procedimientos experimentales anteriormente descriptos con el DOE y demás cálculos estadísticos explicado en este capítulo:

- i. Fabricación del tubo según el patrón establecido y siguiendo las prácticas descritas en el [Capítulo 3](#).
- ii. Seccionamiento del tubo, preparación de muestras.
- iii. Medición de las diferentes RESPUESTAS de cada experiencia (%Fibra, %Poros, Resistencia, Deformaciones Residuales, etc.).
- iv. Evaluar, utilizando el DOE, los contrastes mediante la [Tabla 5.9](#) y luego evaluar los efectos para cada RESPUESTA.
- v. Evaluar los efectos más preponderantes mediante Gráficas de Daniels y Pareto para cada RESPUESTA.
- vi. Descartar efectos que no son importantes (realizar el “mejor ANOVA”).
- vii. Completar la Tabla del ANOVA de la RESPUESTA correspondiente, en base a la [Tabla 5.10](#).
- viii. Corroborar resultados contrastándolos con los del software Minitabs®.

- ix. Aceptación o rechazo de Hipótesis: evaluar para cada efecto, si tiene una influencia significativa en las RESPUESTA estudiada en ese momento.
Continuar con todas las RESPUESTAS estudiadas.
- x. Elaborar conclusiones pertinentes.

Para el “mejor ANOVA” se debe informará también el valor de los estadísticos R-Cuadrado (R^2) y R-Cuadrado Ajustado (R_{aj}^2) obtenido mediante Minitabs®. Estos estadísticos miden la proporción o porcentaje de variabilidad en los datos experimentales que es explicada por el modelo considerado. Por ello, son deseables valores próximos a 100. En general, para fines de predicción se recomienda un coeficiente R_{aj}^2 de al menos 70% (siempre se cumple que $R_{aj}^2 < R^2$).

Capítulo 6:

Obtención de los resultados experimentales

Como se mencionó anteriormente, las respuestas de los resultados experimentales son las siguientes:

- Longitud.
- Diámetro interior.
- Espesor
- La fracción en volumen de las fibras.
- Resistencia aparente mediante el estándar [ASTM D 2290](#).
- Deformaciones residuales mediante el método del corte.

Los primeros parámetros, son parámetros de calidad como la longitud, el diámetro interior y el espesor. Los otros tres parámetros son las RESPUESTAS del diseño de experimentos: Fracción en volumen de las fibras, Resistencia aparente circunferencial y las deformaciones residuales obtenidas.

Casi todos los parámetros a calcular a lo largo de este capítulo, dependen del cálculo del volumen de Fibras y de Resina, tal como se muestran en la [Figura 4.15](#) y en la [Figura 4.16](#), que resume todos los cálculos involucrados en el presente capítulo.

6.1. Parámetros de calidad de los cilindros compuestos.

Los siguientes son los parámetros de calidad de los tubos compuestos medidos, que no es más que un muestreo de la dispersión que se tiene al fabricar los tubos mediante EF.

6.1.1 Longitud del Tubo compuesto.

Luego que se ha pasado por todas las etapas de fabricación incluido el Curado en el horno, se procede a seccionar el tubo. El método elegido fue mediante el corte de disco mediante una sierra cortadora sensitiva (Véase la [Figura 6.1](#)). Se utilizó un disco de corte de 310 mm de diámetro y 3 mm de espesor, que es suficiente para cortar tubos de al menos 4 pulgadas de diámetro (101.6 mm de diámetro) como es el caso del presente trabajo.

Cabe aclarar que se consideró cortar con sierra sinfín, pero tenía el inconveniente de que la sierra es para acero. Cómo para cortar un compuesto no se puede refrigerar, la velocidad de corte tenía que ser extremadamente baja. La calidad del corte no era la adecuada y el ancho del disco cortado tenía mucha dispersión. También se ensayó un dispositivo de fabricación propia que hermanaba con una amoladora con disco diamantado, pero tenía el inconveniente que los tubos de gran espesor no los cortaba en toda su profundidad. Finalmente, el autor del presente trabajo optó por la sierra sensitiva, por su sencillez de operación su rapidez y adecuada repetitividad en el ancho de los discos de la probeta.

Los cortes se realizaban quitando los extremos del cilindro compuesto (una vez ya extraídos del mandril, por supuesto), obteniéndose cilindros de aproximadamente 300 mm de largo. Estos a su vez se seccionaban en 10 u 11 partes, para obtener todas las probetas que sean necesarias para los ensayos. Se apartaba una probeta para el estudio del porcentaje en volumen de fibra, resina y poros, una probeta para el ensayo de tracción mediante disco partido y una probeta para los ensayos de TR. En el caso de la Corrida 7, se ensayaban 3 probetas para la medición de TR, para evaluar si hay alguna dispersión importante en la medición de la misma a lo largo de la longitud del tubo.

En la **Tabla 6.1** se resumen las longitudes de los tubos obtenidas y la cantidad de probetas obtenidas de cada tubo. El ancho de corte elegido era de aproximadamente 30 mm. Se optó por esta medida ya que el autor del trabajo se aseguraba que superara el ancho mínimo con cierta holgura, especificado en la norma del ensayo de tracción de disco partido [ASTM D 2290](#) y resumida en la **Tabla 2.6**. El autor obtuvo cierta dispersión en el espesor al cortar los discos, por ello se obtienen diferentes cantidades de probetas por tubos. En la **Figura 6.2** se observan todos los tubos previos al corte, en la **Figura 6.3** se observa cómo se etiquetaban cada una de las probetas luego del corte y en la **Figura 6.4** se muestran todos los tubos ya cortados y etiquetados.



Figura 6.1: Sierra Cortadora Sensitiva.

Tabla 6.1: Longitud y cantidad de partes por tubo.

Tubo	Longitud	Partes obtenidas x tubo
Corrida N° 1:	298 ±0.5 mm	10 partes
Corrida N° 2:	301 ±0.5 mm	11 partes
Corrida N° 7A:	297 ±0.5 mm	10 partes
Corrida N° 7B:	308 ±0.5 mm	11 partes
Corrida N° 7C:	301 ±0.5 mm	11 partes
Corrida N° 8:	300 ±0.5 mm	10 partes
Corrida N° 11:	299 ±0.5 mm	10 partes
Corrida N° 12:	298 ±0.5 mm	10 partes
Corrida N° 13:	299 ±0.5 mm	10 partes
Corrida N° 14:	300 ±0.5 mm	10 partes



Figura 6.2: Tubos obtenidos en el presente trabajo mediante EF.



Figura 6.3: Proceso de etiquetado de las partes de cada tubo luego de su seccionamiento.



Figura 6.4: Todos los tubos convenientemente etiquetados en la presente tesis.

6.1.2 Diámetro Interior.

El diámetro interior de los tubos se obtuvo midiendo con un calibre digital 5 discos de cada tubo anteriormente cortado. De esta manera se obtiene la media del diámetro interior de cada tubo y su desvío estándar. Los resultados se muestran en la [Tabla 6.2](#). El promedio y el desvío estándar no tienen en cuenta los valores extremos (máximo en rojo y mínimo en azul).

6.1.3 Espesor de cada tubo.

El espesor de los tubos se obtuvo de manera similar al caso del diámetro interior, midiendo con un calibre digital 5 discos de cada tubo anteriormente cortado. De esta manera se obtiene la media del espesor de cada tubo y su desvío estándar. Los resultados se muestran en la [Tabla 6.3](#). El promedio y el desvío estándar no tienen en cuenta los valores extremos (máximo en rojo y mínimo en azul).

Tabla 6.2: Diámetro interior de los tubos.

Tubo	Diámetro Interior [mm]						Desvío Estándar
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio	
Corrida N° 1:	101,49	101,45	101,38	101,49	101,54	101,48	0,023
Corrida N° 2:	101,27	101,03	101,62	101,64	101,89	101,51	0,208
Corrida N° 7A:	101,78	101,96	101,64	101,60	101,71	101,71	0,070
Corrida N° 7B:	102,04	101,88	101,83	101,48	101,84	101,85	0,026
Corrida N° 7C:	101,30	102,02	102,01	101,74	102,18	101,92	0,159
Corrida N° 8:	101,25	101,86	101,65	101,83	101,55	101,68	0,142
Corrida N° 11:	101,37	101,06	101,35	101,77	101,23	101,32	0,076
Corrida N° 12:	101,74	101,38	100,06	101,75	101,38	101,50	0,208
Corrida N° 13:	101,09	101,08	101,33	101,68	100,86	101,17	0,142
Corrida N° 14:	101,54	101,18	101,36	101,49	101,56	101,46	0,093

Tabla 6.3: Espesor de los tubos.

Tubo	Espesor [mm]						Desvío Estándar
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio	
Corrida N° 1:	1,70	1,68	1,48	1,86	1,87	1,75	0,10
Corrida N° 2:	1,61	1,52	1,49	1,54	1,34	1,52	0,03
Corrida N° 7A:	1,93	1,69	1,75	1,61	1,67	1,70	0,04
Corrida N° 7B:	2,18	1,25	1,88	1,85	1,80	1,84	0,04
Corrida N° 7C:	1,43	1,55	1,50	1,55	1,51	1,52	0,03
Corrida N° 8:	1,37	1,44	1,42	1,34	1,38	1,39	0,03
Corrida N° 11:	2,81	3,05	3,11	3,21	2,59	2,99	0,16
Corrida N° 12:	2,57	2,73	2,74	2,47	2,66	2,65	0,08
Corrida N° 13:	2,74	2,67	2,62	2,57	2,70	2,66	0,04
Corrida N° 14:	3,98	3,42	3,53	3,24	3,17	3,40	0,15

6.1.4 Resumen de los parámetros de calidad de los tubos fabricados.

Se resumen a continuación, en la [Tabla 6.4](#), los parámetros de calidad de los tubos fabricados.

Tabla 6.4: Resumen de parámetros de calidad de los tubos.

Tubo	Longitud*	Diámetro Interior*	Espesor*
Corrida N° 1	298 ±0.5	101,48	1,75
Corrida N° 2	301 ±0.5	101,51	1,52
Corrida N° 7A	297 ±0.5	101,71	1,70
Corrida N° 7B	308 ±0.5	101,85	1,84
Corrida N° 7C	301 ±0.5	101,92	1,52
Corrida N° 8	300 ±0.5	101,68	1,39
Corrida N° 11	299 ±0.5	101,32	2,99
Corrida N° 12	298 ±0.5	101,50	2,65
Corrida N° 13	299 ±0.5	101,17	2,66
Corrida N° 14	300 ±0.5	101,46	3,40

*Medidas en mm.

6.2. Fracción en Volumen de las Fibras.

A continuación, se presentan la fracción en volumen de las fibras, aunque también se obtiene información del porcentaje de resina, de poros, la orientación de las fibras y su distribución. Esto se realizó mediante técnicas de micrografía, ya que experiencias anteriores con Digestión ácida no fueron satisfactorias. Esta técnica ha ido actualizándose desde sus primeros pasos ([M. C. Waterbury and L. T. Drzal, 1989](#)) hasta hoy en día, que mediante softwares mas modernos permiten analizar una gran cantidad de imágenes ([Brian Hayes & Luther Gammon, 2010](#)). Las mismas consisten en sacar micrografías mediante el microscopio óptico OLYMPUS BX60M de la Gerencia de Materiales del Centro Atómico Constituyentes (CAC) con aumentos sucesivos de 5X y 10X. El autor de este trabajo realizo unas 5 micrografías con cada aumento para cada una de las muestras de las diversas Corridas. Una

excepción a esto son las corridas 11, 12, 13 y 14 que tienen más capas, por lo que el autor de este trabajo decidió realizar 25 micrografías con los aumentos de 10X. Se realizaron micrografías de 20X, las cuales se utilizaron solo con el fin de contrastar los resultados del volumen de fibra que se estaban obteniendo. Esto es debido a que haría falta un gran trabajo muestral (es decir, básicamente tomar muchas más fotos con los aumentos de 20X), para abarcar todos los defectos que se pueden observar. Se necesita abarcar una superficie equivalente con un aumento mayor, con lo cuál hay que aumentar el número de fotografías. Como sólo se sacaban fotos de 20X en las regiones de la muestra relativamente limpias, con el objeto de tener una mejor resolución y estar más seguro de los porcentajes de fibra obtenidos, no se tuvieron en cuenta en el recuento final ya que no daban debida cuenta de los poros. Como en todos los casos hubo un buen acuerdo entre el porcentaje de fibra obtenido mediante las micrografías de 5X y 10X con las de 20X, los resultados no se muestran en este trabajo. Los aumentos de 50X son más convenientes para chequear la orientación de las fibras utilizadas en cada capa. Pero dado que las orientaciones de las fibras daban cuenta de esto en forma notoria, por lo que tampoco se las incluyó en el presente análisis.

6.2.1 Procedimiento de obtención y preparación de las muestras.

El procedimiento de obtención de las micrografías se explica a continuación:

- 1- En primer lugar, se extraen las muestras de los tubos mediante un disco diamantado o dremel. El autor de este trabajo recomienda el dremel, ya que el disco de corte es más fino y tiende a desgarrar menos la fibra. La muestra así obtenida requiere de un lijado previo al proceso de inclusión de las muestras. El tamaño de las muestras es de aproximadamente 15x15mm. Véase la [Figura 6.5](#).
- 2- Sigue el proceso de inclusión propiamente dicho, en donde las muestras se pegan en un vidrio levemente con “la gotita”, y se les coloca una seccion de un tubo eletrico de aproximadamente 40 mm de diametro exterior por 20 mm de altura. Luego se mezcla una cucharada de polimero Vaicril con su correspondiente proporción de monómero (la proporción adecuada es en la que la mezcla alcanza una consistencia parecida a la de la miel). El proceso de

solidificación es rápido, por lo que debe revolverse durante un minuto. Luego se deja simplemente reposar por dos horas. Véase la **Figura 6.6**.



Figura 6.5: Muestras de los tubos para el análisis mediante micrografías.

- 3- Luego de transcurrido ese tiempo, ya se puede iniciar el proceso de desbaste. El mismo consiste en pasar sucesivamente lijas al agua de tamaño de grano 220, pasando luego por los tamaños de 300, 440 y 600. El lijado de la pasada de 200 debe eliminar la superficie que estaba en contacto con el vidrio donde se realizó la inclusión. Las otras pasadas se realizan rotando 90° la muestra entre pasadas. Esto se hace a fin de estar seguros cuando finalizar una determinada pasada, que es cuando se borran las líneas de la pasada anterior. Hasta acá es recomendable usar las máquinas circulares para realizar el desbaste más rápidamente. En las primeras dos etapas (pero sobre todo en la primera, donde el tamaño de grano es el más grande) hay que tener más cuidado con los facetados que se pueden llegar a generar en las muestras incluidas. Luego se pasa a un lijado manual mediante lijas de 1000, 1200 y finalmente 1500. A esta altura del pulido, mejor utilizar el microscopio para asegurarse de eliminar todas las líneas de las pasadas anteriores. Puede llegar a haber poco contraste entre la muestra y el acrílico, pero lo más importante es

no ver rayas en las direcciones incorrectas. En la [Figura 6.7](#) se muestra el autor de este trabajo en el proceso de desbaste.



Figura 6.6: Proceso de inclusión de las muestras.

- 4- Finalmente se realiza el pulido de la muestra. Esto se hace con paños de $6\ \mu\text{m}$ y luego mediante un paño de $1\ \mu\text{m}$ en máquinas rotativas, llamadas “pulidoras”. Acá las muestra ya se distingue claramente del acrílico utilizado durante la inclusión. Las fibras ya se notan más brillantes, mientras que la resina tiene un tono mas oscuro y opaco. Los poros y los rayados de pulido (o desbaste) son siempre negros. Véase la [Figura 6.8](#).



Figura 6.7: Proceso de desbaste de las muestras.

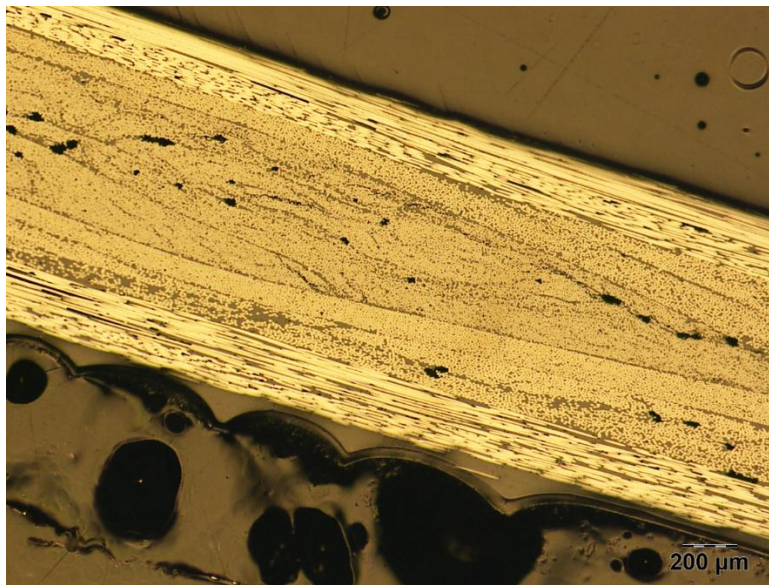


Figura 6.8: Proceso de pulido ya finalizado de las muestras.

6.2.2 Procedimiento de obtención de las Micrografías y post-procesado.

Una vez obtenidas las muestras están listas para que se realicen las micrografías mediante una cámara montada en un microscopio. De la muestra obtenida se obtienen las micrografías: 5 micrografías de 5X de aumento, 5 micrografías de 10X de aumento, 5 micrografías de 20X de aumento y 5 micrografías de 50X de aumento. Para muestras de 10 capas, se realizaron

25 micrografías de 10X de aumento, para abarcar mejor todo el espesor de la muestra. Se debe tener especial cuidado en que la imagen esté bien enfocada y este bien configurado la regla de medición de la esquina inferior derecha: a igual aumento debe corresponderle la misma regla de medición.

Luego de obtenidas las micrografías, se debe post-procesar la imagen para obtener la información que necesitamos. En este caso los porcentajes de fibra, resina, poros, su morfología, distribución y ángulo de las fibras. Esto se realiza mediante el software ImageJ®^{1,2}:

- a) Primero se recorta la imagen de manera tal que desaparezca la regla de medición de la imagen a analizar. Esto es porque al ser blanca y negra influye en lo que después se desea medir. Véase la **Figura 6.9**. Además, mediante un programa como Paint®, se quitan los bordes de la muestra y se borra el fondo del acrílico, ya que interfiere en la forma que se obtiene el porcentaje de fibra y de resina.
- b) Después se debe convertir la imagen mediante el software ImageJ® a un formato de 8 bits. Es decir, en blanco y negro, ya que es la manera más sencilla que existe para operar mediante imágenes. Véase la **Figura 6.10**. En el menú del software imageJ®: → Image → Type → 8-bit. En este paso, el autor guardó cada imagen que género en cada paso, pero eso depende de cada uno.
- c) Se le ajusta el brillo y el contraste a la imagen generada. → Image → Adjust → Brightness/Contrast. Con ayuda del gráfico del panel de “Brillo y contraste” (B&C), vamos moviendo los botones de control para mejorar la definición de la imagen y se guardan los cambios. En la **Figura 6.10** se aprecia claramente que se debe ajustar el valor máximo, ya que se muestra en un gráfico en gris la distribución de los pixeles, y hay un rango sin aprovechar en los tonos claros bastante importante. Este proceso mejora y facilita la calidad de la imagen en el procedimiento que viene después.

¹ Para más información sobre este software, visitar la página <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>.

² El procedimiento seguido está adaptado de un tutorial de la NASA respecto del tema: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170001570/downloads/20170001570.pdf>.

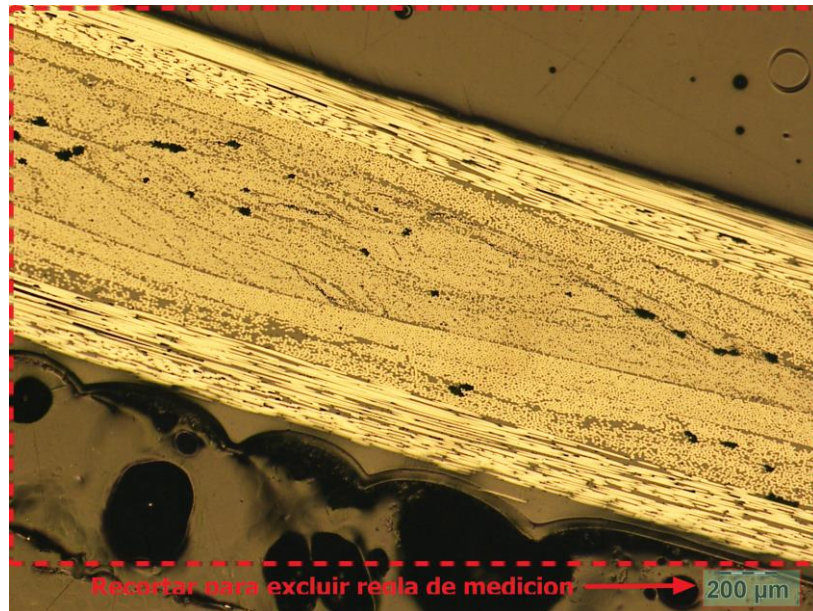


Figura 6.9: Recorte de la micrografía original.

- d) Ajuste del Threshold para medir el porcentaje de fibra. Realizamos → Image → Adjust → Threshold. Esto me transforma todos los pixeles en un rango que yo elija a rojo, manipulando los botones de control. Véase la **Figura 6.11**. Esto último también me sirve para medir el porcentaje de fibra y de resina en el próximo paso. Esta parte tiene mucho de observación y apreciación. Sin duda es la parte mas subjetiva y, por tanto, objetable en este método, ya que depende mucho del análisis de la persona que está manipulando la foto. En este caso, determinar de la escala de grises, cuáles son los “grises” en todo el rango que representan a las fibras. Es por ello que mediante esta técnica se debe ser cuidadoso y tener un muestreo con muchas fotos para fundamentar bien los resultados obtenidos.

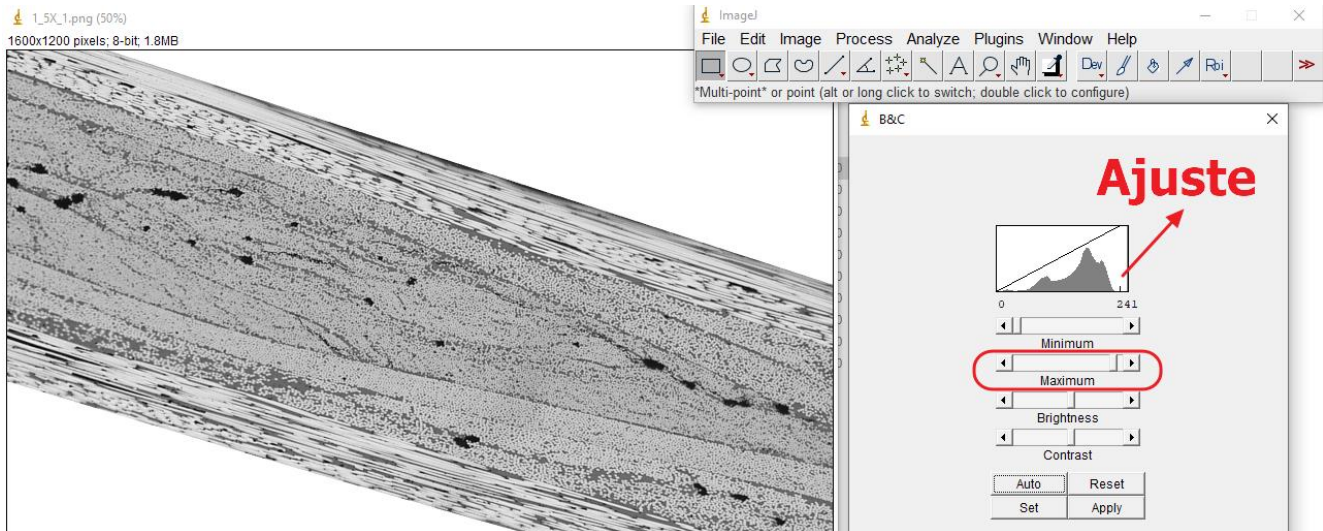


Figura 6.10: Ajuste de Brillo y contraste.

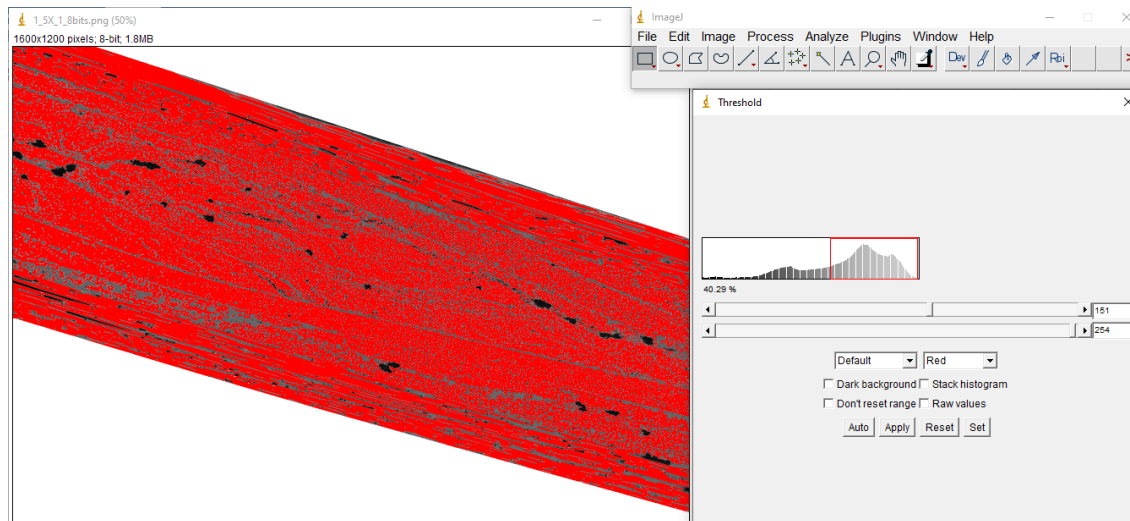


Figura 6.11: Ajuste del Threshold para las Fibras.

- e) Medición del área ocupada por las fibras: simplemente el software cuenta cuantos pixeles están en la escala de grises definida y las mide. Esto se realiza mediante → Analize → Measure. Esto nos va guardando en un cuadro (que luego se puede guardar en formato CVS para importarlo en Excel®). Véase la **Figura 6.12**.

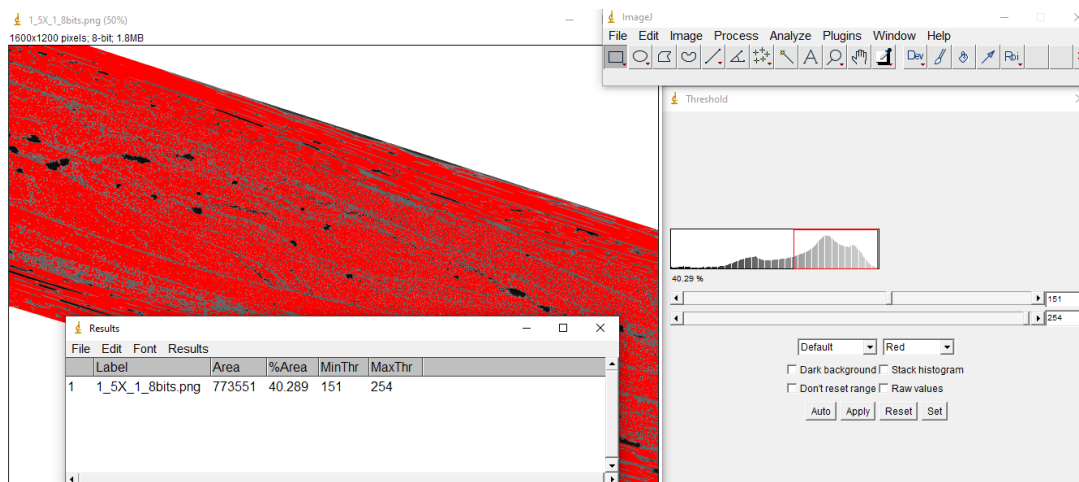


Figura 6.12: Medición del área ocupada por las fibras.

- f) Realizamos los mismos pasos para la resina y los poros, obteniéndose los resultados en una tabla, tal como se muestra en la [Figura 6.13](#). Para el calculo final del porcentaje, sumamos todas las áreas (exportamos los resultados a formato CVS y luego los procesamos en una planilla de Excel®) que pertenecen a una misma micrografía obviamente. A cada área ya sea de fibra, resina o poros, la dividimos por esta área total y tenemos el porcentaje de fibra, resina o poros.

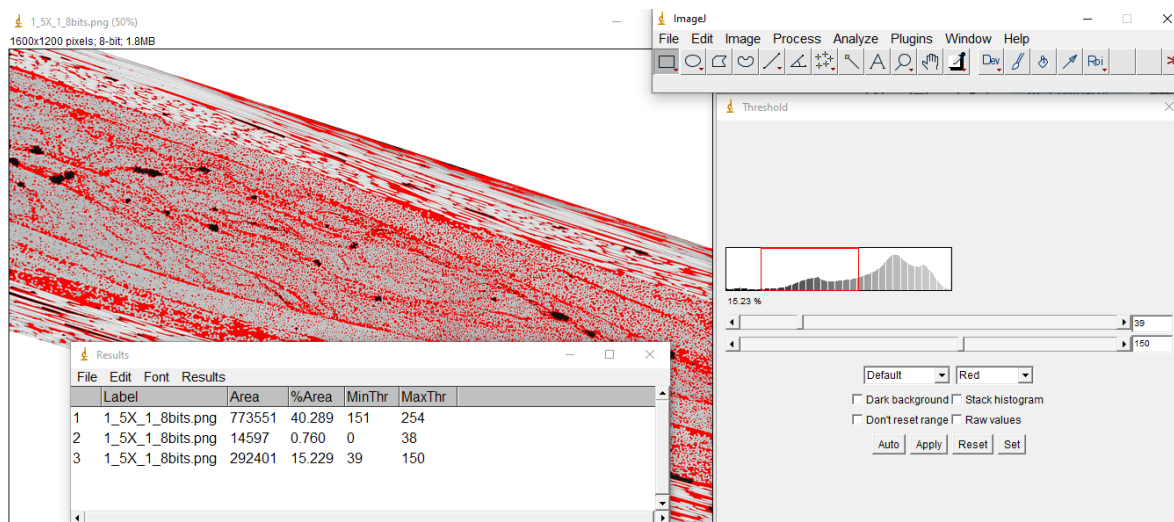


Figura 6.13: Medición de los porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la muestra.

Para las fotos de 10X, en general tenemos la lectura directa del % de área y no se necesita hacer esa operación. Esto es debido a que en las fotos de 5X se tubo que quitar el fondo del acrílico, y al momento del análisis, hay unos pixeles blancos que también forman parte de la imagen. Estos pixeles están excluidos cuando se calcula el Threshold del % de fibra porque el color blanco es el color 255 y para el cálculo de fibra se setea en 254. Cabe aclarar que generalmente el orden de medición es: fibra (extremos claros), poros (extremos oscuros) y resina (intermedio: lo que no se consideró ni fibra ni poros).

g) Continuamos analizando el resto de las micrografías de las muestras.

6.2.3 Chequeo de la orientación de las fibras para cada muestra.

Para este caso, solo se chequeó que se siguieron los patrones que se establecieron para el DOE en la [Tabla 5.4](#) del [Capítulo 5](#), ya que la diferencia visual entre ellos es muy notoria como se puede apreciar en la [Figura 6.14](#), en donde un patrón a 89° se ven como elipses claras muy alargadas y tiene un contraste bastante alto frente a un patrón de 45°, en donde se forma una elipse (parte superior izquierda). El patrón de 5° (parte inferior izquierda) se distingue claramente de un patrón de 45° (parte superior derecha) debido a que se trata de círculos prácticamente perfectos mientras que el de 45° es una elipse (parte superior derecha).

Como curiosidad matemática, hay que pensar en la siguiente fórmula ([Ecuación 6.1](#)):

$$\theta = \text{Arco Coseno} \left(\frac{\text{Eje Menor de Elipse}}{\text{Eje Mayor de Elipse}} \right) \quad \text{Ec. 6.1}$$

Mientras mas alargada sea la elipse, se observará un ángulo mayor de las fibras.

Si se desea un cálculo exacto para cada caso, se puede realizar también con el software ImageJ®. Simplemente, realizamos los pasos anteriores para las fotos en 50X, de la a) hasta la f), exceptuando el paso e), ya que en este caso no estamos evaluando el % de fibra.

Allí realizamos los siguientes pasos adicionales para analizar la orientación de las fibras:

- Process→Binary→Watershed para dividir fibras, en caso de haber divisiones erróneas se colorean. Véase la [Figura 6.15](#).

- Analyze→Analyze particles→Set measurements→Fit ellipse. Véase la [Figura 6.16](#).
- Se eligen los parámetros “Major” y “Minor” hacer el cálculo geométrico para sacar los ángulos de orientación de las fibras. Véase la [Figura 6.17](#).

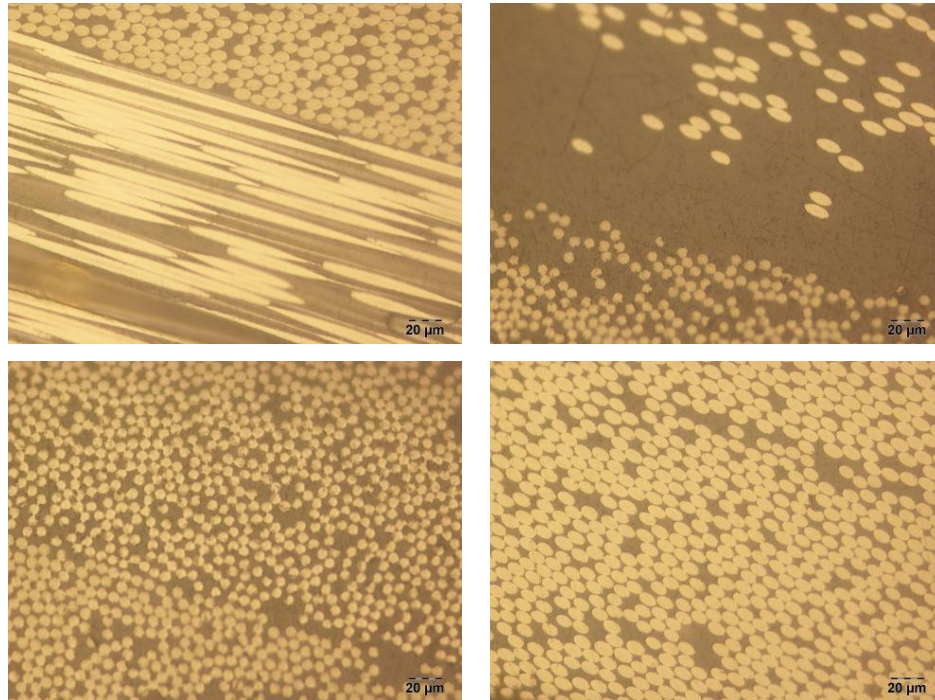


Figura 6.14: Muestra de la Corrida 11 a 50X. Se observan diferencias apreciables entre los ángulos de orientación de las fibras.

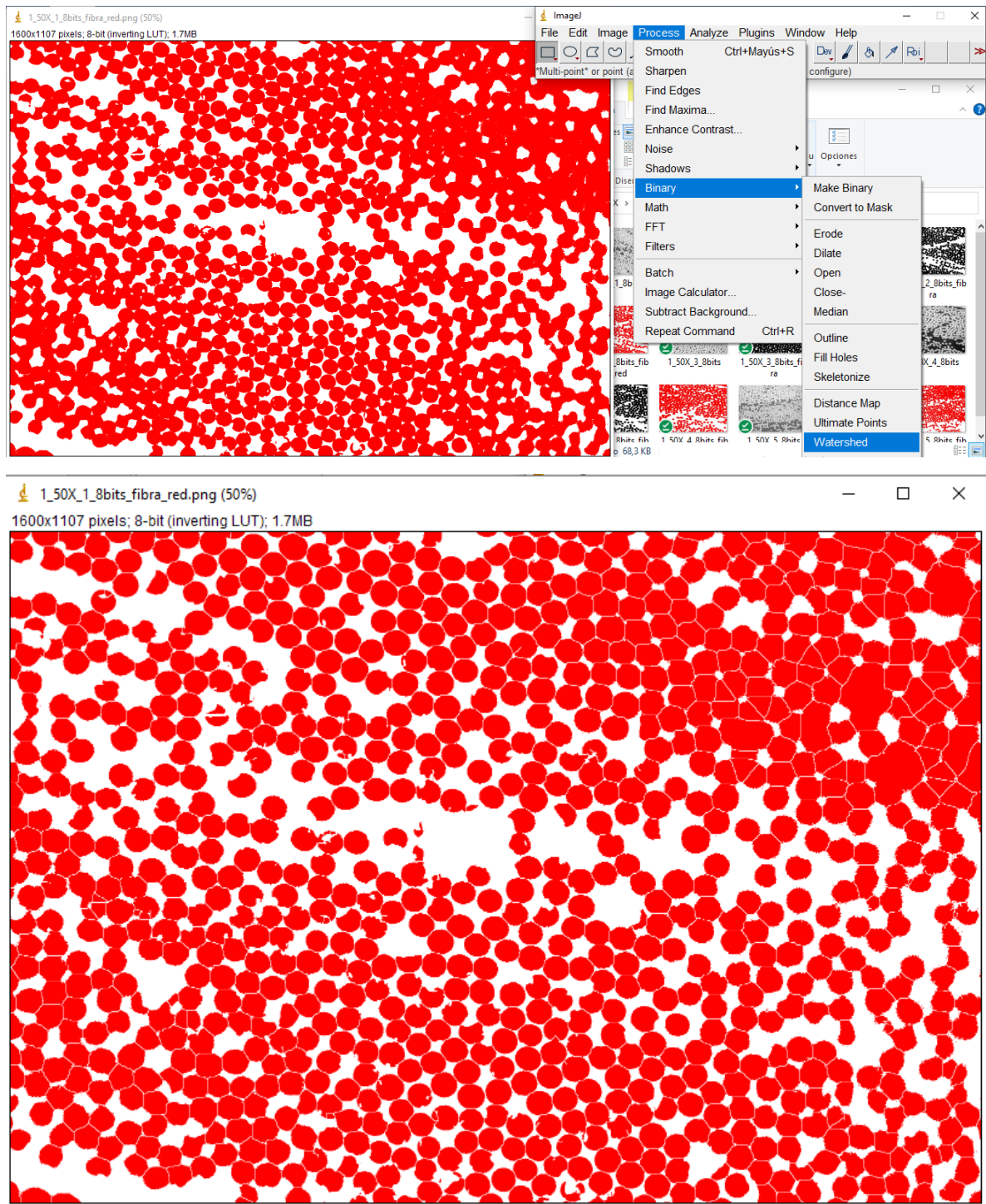


Figura 6.15: Función Waterset del ImageJ®: particiona las elipses que se observan como un todo en la imagen original (parte superior) para realizar la medición de los ejes. El resultado de la partición se ve en la parte inferior de la esta misma figura.

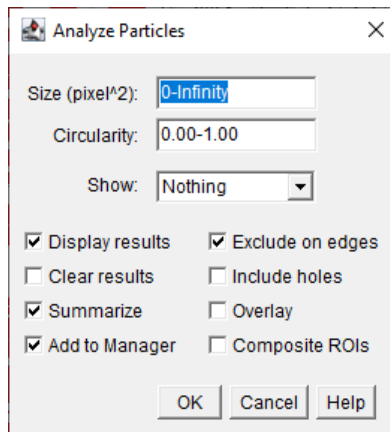


Figura 6.16: Función Analyze particles del ImageJ®: mediante “Fit Ellipse proporciona los elementos para medir los ejes mayores, menores y los ángulos de las elipses involucradas.”.

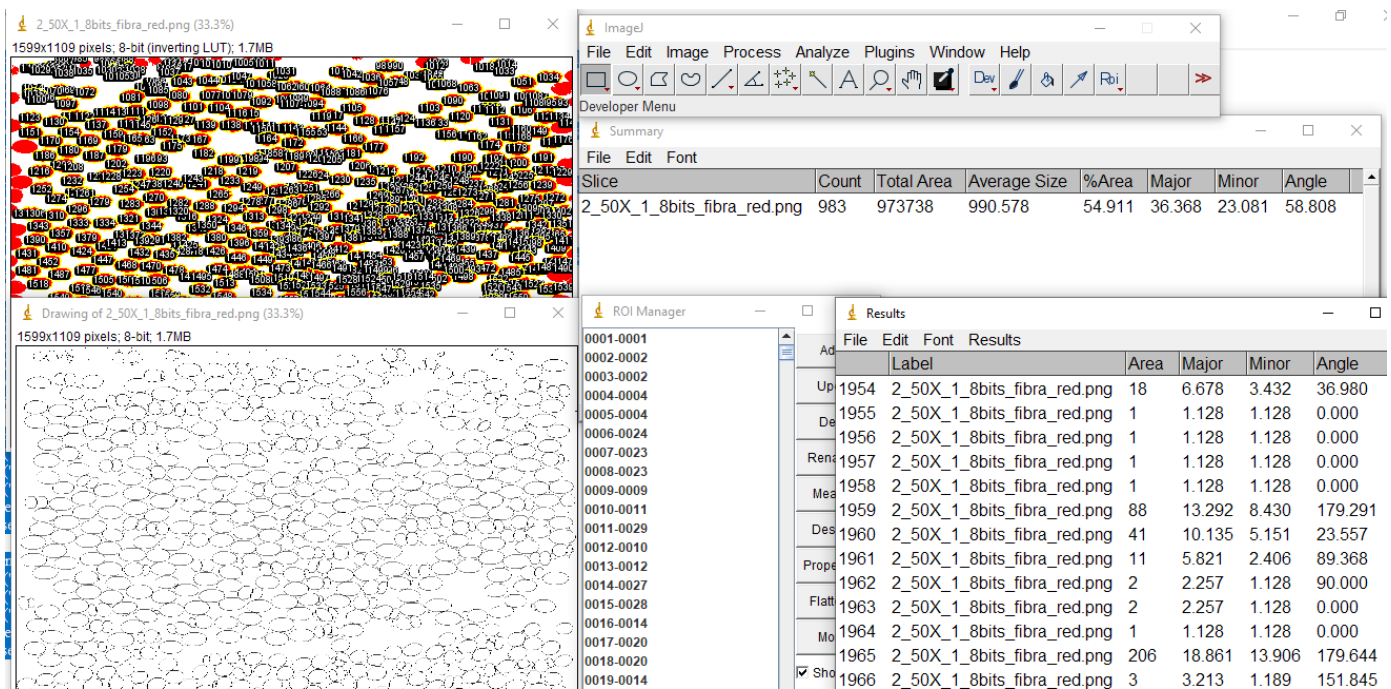


Figura 6.17: Una vez ejecutado el análisis mediante ImageJ®, el programa discretiza todas las elipses que encuentra, le calcula los ejes mayores y menores y realiza el análisis estadístico para hallar la media de cada medición.

En definitiva, simplemente se puede observar que para cada muestra se respetó los patrones establecidos en la [Tabla 5.4](#) del [Capítulo 5](#). En el [Anexo 3](#), mediante la observación de las micrografías referentes a las fibras, se puede observar que se respetaron en cada caso los patrones preestablecidos.

6.2.4 Resultados cuantitativos del porcentaje de fibra, resina y poros de las micrografías.

El resumen del contenido de fibra y de resina para cada muestra se muestra en la [Tabla 6.5](#). El análisis más detallado de cada micrografía se encuentra en el [Anexo 3](#).

Tabla 6.5: Resumen de los porcentajes de Fibra, resina y poros de las muestras de cada tubo.

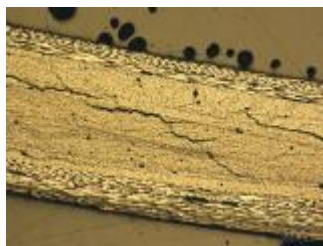
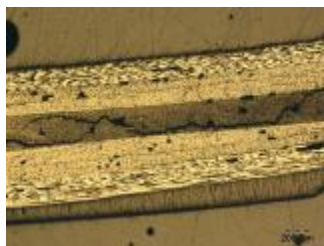
Muestra	% Poros	% Fibra	% Resina
1	3,383	63,387	33,229
2	9,000	56,956	34,044
7A	5,009	55,075	39,916
7B	5,828	53,366	40,806
7C	2,769	69,386	27,846
8	2,442	61,617	35,942
11	12,777	55,833	31,415
12	3,124	66,510	30,366
13	5,935	57,811	36,254
14	4,920	67,511	27,569

Teniendo en cuenta la totalidad de los tubos pertenecientes a la Corrida 7, el promedio de poros, fibra y resina es de 4,54%, 59,28% y 36,19% respectivamente, siendo el desvío estándar esperable de 1,58%, 8,80% y 7,24%.

6.2.5 Resultados cualitativos de las micrografías.

Se presentan a continuación algunas observaciones personales del autor del presente trabajo en base a la observación de algunas de las micrografías.

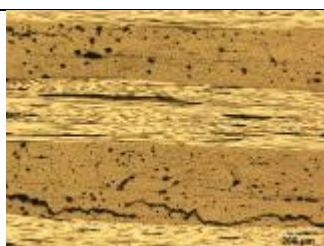
- En general, se observan grietas en aquellos patrones en los que presentaban una capa con ángulos de $\pm 5^\circ$. Véase la [Figura 6.18](#). En ella se resumen algunas micrografías. Hubo algunas micrografías que presentan grietas en otros lados, pero se cree que estas se producen por el procesamiento de las muestras previo al análisis micrográfico. En cambio, en las muestras que tenían capas a $\pm 5^\circ$, estas grietas se presentaron en todos los casos. Véase el [Anexo 3](#) si se quiere profundizar en este aspecto. El autor cree que dado la dificultad para conseguir patrones prolijos de $\pm 5^\circ$, se deben realizar patrones de ángulos bajos más repetibles como en $\pm 10^\circ$ y $\pm 15^\circ$ para trabajos futuros.
- Los defectos (poros) en las capas con ángulos a $\pm 89^\circ$ en general son más alargados que los defectos con ángulos de $\pm 45^\circ$ y $\pm 5^\circ$. En la [Figura 6.19](#) se ve que los defectos de las capas de ángulos bajos son muy alargadas (en las corridas 1, 13 y 14). En la Corrida 7A que presenta todas capas de ángulos a $\pm 45^\circ$, se ve que la morfología de los poros es redondeada, lo cuál permite distinguir fácilmente en las otras micrografías cuando un defecto es de una capa de $\pm 89^\circ$, dado que estas son más oblongas.
- Hubo dos corridas excepcionales en cuanto a la cantidad de defectos: la Corrida 2 (9%) y la Corrida 11 (12,777%). Se estima que la Corrida 2 presenta estos defectos por la mencionada falta de cohesión en las capas con ángulos bajos. De la Corrida 11 se desconoce por qué surgieron tal tamaño y abundancia en los defectos. Véase la [Figura 6.20](#).



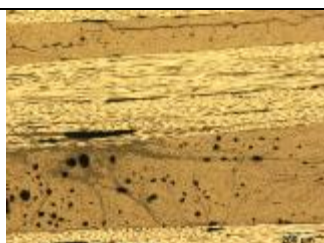
Corrida 2: Posee una capa central de $\pm 5^\circ$.



Corrida 12: Posee dos capas centrales de $\pm 5^\circ$.



Corrida 13: posee dos pares de capas a $\pm 5^\circ$ (en color amarillo más oscuro en la micrografía).



Corrida 14: posee dos pares de capas a $\pm 5^\circ$ (en color amarillo más oscuro en la micrografía).

Figura 6.18: Micrografías en donde se observan grietas en las regiones con capas de $\pm 5^\circ$.

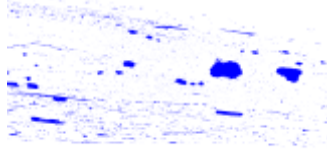
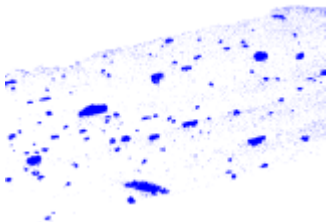
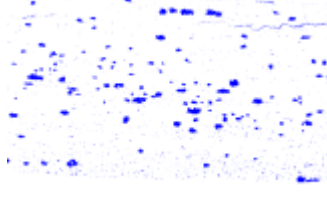
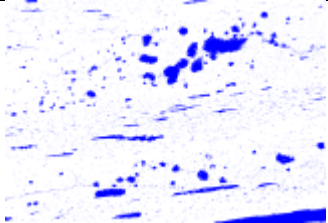
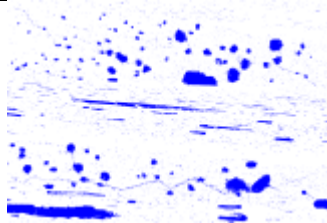
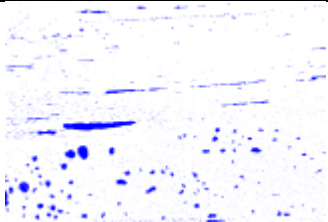
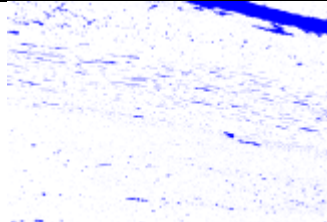
		Defectos en la Corrida 1.
		Defectos en la Corrida 7A.
		Defectos en la Corrida 13.
		Defectos en la Corrida 14.

Figura 6. 19: Diferencia de Morfología de los poros en las diferentes capas.

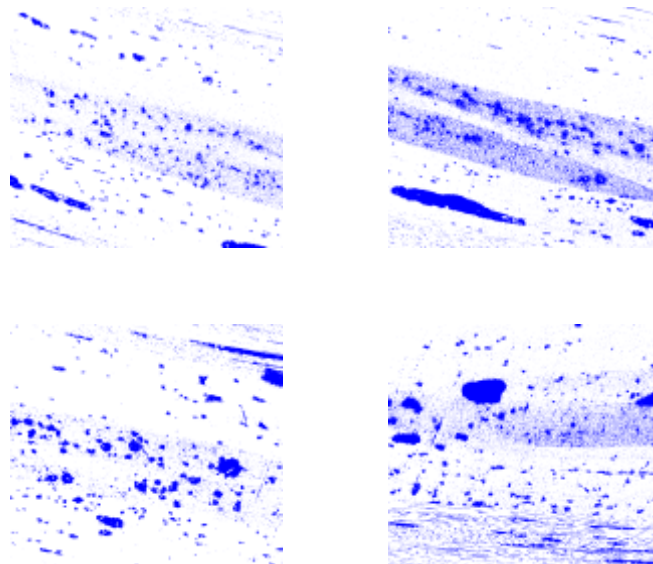


Figura 6.20: Defectos en la Corrida 11.

6.2.6 Resultados derivados de las micrografías: propiedades micromecánicas de los laminados.

En base a los resultados de la [Tabla 6.5](#), se puede determinar las propiedades micromecánicas de los laminados unidireccionales en base a su contenido de fibra y resina. Esto se hace teniendo en cuenta las fórmulas micromecánicas del [Anexo 2](#) para el caso de la [Regla de las Mezclas](#) y el caso del [Modelo de la Microestructura Periódica](#). Dichas Fórmulas, se calculan en base a las propiedades de Fibra y Resina que se encuentran obtenidas en la [Tabla 2.1](#) para las fibras y [Tabla 2.3](#) para la resina. Las propiedades mecánicas de una lámina unidireccional se encuentran resumida en la [Tabla 6.6](#) y [Tabla 6.7](#) para el la Regla de las Mezclas y para el Modelo de la Microestructura periódica, respectivamente.

Tabla 6.6: Propiedades Micromecánicas mediante la Regla de las Mezclas.

	E_1^*	E_2^*	ν_{12}	G_{12}^*	G_{13}^*	G_{23}^*	ν_{13}	ν_{23}
Corrida 1	152,878	9,962	0,401	3,703	3,703	4,427	0,401	0,125
Corrida 2	137,510	9,755	0,373	3,638	3,638	3,730	0,373	0,308
Corrida 7A	133,207	8,354	0,383	3,128	3,128	3,560	0,383	0,173
Corrida 7B	129,146	8,180	0,377	3,066	3,066	3,417	0,377	0,197
Corrida 7C	167,057	11,793	0,412	4,350	4,350	5,306	0,412	0,111
Corrida 8	148,733	9,235	0,401	3,442	3,442	4,214	0,401	0,096
Corrida 11	134,732	10,556	0,360	3,931	3,931	3,627	0,360	0,455
Corrida 12	160,257	10,859	0,407	4,022	4,022	4,850	0,407	0,120
Corrida 13	139,632	9,171	0,384	3,423	3,423	3,811	0,384	0,203
Corrida 14	162,559	11,918	0,403	4,399	4,399	5,001	0,403	0,192

*En unidades de GPa (Giga Pascales).

6.2.7 Resultados derivados de las micrografías: evaluación de las constantes Q para el cálculo de las tensiones residuales.

A partir de la [Tabla 6.6](#), y teniendo en cuenta las **Ecuaciones 4.9** del [Capítulo 4.5](#), se pueden evaluar las constante Q_{11} , Q_{22} , Q_{12} y Q_{66} . Los valores de estas constantes se resumen a continuación en la [Tabla 6.8](#).

6.2.8 Resultados derivados de las micrografías: evaluación de las constantes Φ para el cálculo de las tensiones residuales.

De manera similar al caso de las constantes Q, se pueden evaluar las constantes Φ partir de los valores de la [Tabla 6.8](#). Teniendo en cuenta las **Ecuaciones 4.8** del [Capítulo 4.5](#) y las **Ecuaciones 4.11** del [Capítulo 4.6](#), se pueden evaluar las constantes Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{22} y Φ_{26} para los ángulos utilizados en las capas de los tubos de esta tesis, que son los ángulos de 5°, 45° y 89°. Los valores de estas constantes se resumen a continuación en la [Tabla 6.9](#).

Tabla 6.7: Propiedades Micromecánicas mediante el Modelo de la Microestructura Periódica.

	E₁*	E₂*	v₁₂	G₁₂*	G₁₃*	G₂₃*	v₁₃	v₂₃
Corrida 1	153,014	6,364	0,414	5,231	5,231	2,622	0,414	0,406
Corrida 2	137,841	5,861	0,405	4,354	4,354	2,385	0,405	0,423
Corrida 7A	133,404	5,721	0,402	4,141	4,141	2,325	0,402	0,427
Corrida 7B	129,372	5,597	0,399	3,961	3,961	2,274	0,399	0,432
Corrida 7C	167,170	6,872	0,423	6,346	6,346	2,903	0,423	0,391
Corrida 8	148,838	6,221	0,412	4,963	4,963	2,552	0,412	0,411
Corrida 11	135,192	5,777	0,403	4,225	4,225	2,349	0,403	0,426
Corrida 12	160,383	6,623	0,419	5,767	5,767	2,760	0,419	0,398
Corrida 13	139,858	5,925	0,406	4,456	4,456	2,414	0,406	0,420
Corrida 14	162,745	6,709	0,421	5,958	5,958	2,808	0,421	0,396

*En unidades de GPa (Giga Pascales).

Tabla 6.8: Evaluación de las constantes Q para el cálculo de las tenciones residuales.

	Q₁₁*	Q₂₂*	Q₁₂*	Q₆₆*
Corrida 1	154.496,86	10.067,49	4.037,06	3.703,00
Corrida 2	138.880,73	9.852,24	3.674,89	3.638,00
Corrida 7A	134.443,82	8.431,57	3.229,29	3.128,00
Corrida 7B	130.319,18	8.254,31	3.111,87	3.066,00
Corrida 7C	169.083,07	11.936,03	4.917,64	4.350,00
Corrida 8	150.232,97	9.328,14	3.740,58	3.442,00
Corrida 11	136.114,09	10.664,28	3.839,14	3.931,00
Corrida 12	162.076,20	10.982,27	4.469,78	4.022,00
Corrida 13	140.997,54	9.260,69	3.556,10	3.423,00
Corrida 14	164.517,92	12.061,62	4.860,83	4.399,00

*En unidades de MPa (Mega Pascales).

Tabla 6.9: Evaluación de las constantes Φ para el cálculo de las tensiones residuales.

	Ángulo de Capa	Φ_{11}^*	Φ_{22}^*	Φ_{12}^*	$\Phi_{26} ^*$
Corrida 1 [89/45/5/45/89]	$\pm 5^\circ$	152.331,73	10.096,56	5.105,09	212,87
	$\pm 45^\circ$	46.862,62	46.862,62	39.456,62	36.107,34
	$\pm 89^\circ$	10.068,34	154.409,73	4.080,20	2.495,50
Corrida 2 [89/45/5/45/89]	$\pm 5^\circ$	136.944,51	9.876,25	4.630,99	179,04
	$\pm 45^\circ$	42.658,69	42.658,69	35.382,69	32.257,12
	$\pm 89^\circ$	9.852,92	138.802,81	3.713,50	2.231,67
Corrida 7A [45_s]	$\pm 45^\circ$	40.461,49	40.461,49	34.205,49	31.503,06
Corrida 7B [45_s]	$\pm 45^\circ$	39.265,31	39.265,31	33.133,31	30.516,22
Corrida 7C [45_s]	$\pm 45^\circ$	52.063,59	52.063,59	43.363,59	39.286,76
Corrida 8 [45_s]	$\pm 45^\circ$	45.202,57	45.202,57	38.318,57	35.226,21
Corrida 11 [89₂/45₂/5/]_s	$\pm 5^\circ$	134.231,10	10.687,16	4.769,20	171,39
	$\pm 45^\circ$	42.545,17	42.545,17	34.683,17	31.362,45
	$\pm 89^\circ$	10.664,93	136.038,31	3.876,71	2.170,32
Corrida 12 [89₂/45₂/5/]_s	$\pm 5^\circ$	159.812,55	11.014,08	5.585,70	230,60
	$\pm 45^\circ$	49.521,51	49.521,51	41.477,51	37.773,48
	$\pm 89^\circ$	10.983,22	161.985,11	4.514,86	2.609,04
Corrida 13 [89₂/5₂/89/]_s	$\pm 5^\circ$	139.020,98	9.285,50	4.531,98	184,48
	$\pm 89^\circ$	9.261,40	140.918,00	3.595,52	2.278,17
Corrida 14 [89₂/5₂/89/]_s	$\pm 5^\circ$	162.234,64	12.094,50	5.986,03	237,12
	$\pm 89^\circ$	12.062,60	164.426,03	4.906,28	2.631,66

*En unidades de MPa (Mega Pascales).

6.2.9 Resultados derivados de las micrografías: evaluación de las constantes D_{11} , D_{22} y D_{12} para el cálculo de las tenciones residuales.

A partir de las constantes Φ_{ij} en la [Tabla 6.9](#) y de los resultados de calidad resumidos en la [Tabla 6.4](#) se pueden evaluar, teniendo en cuenta las **Ecuaciones 4.7** del [Capítulo 4.5](#), las constantes D_{11} , D_{22} y D_{12} . Los valores de estas constantes se resumen en la [Tabla 6.10](#).

Tabla 6.10: Evaluación de las constantes D_{ij} para el cálculo de las tenciones residuales.

	D_{11}^*	D_{22}^*	D_{12}^*
Corrida 1	8.423,00	58.455,34	5.112,26
Corrida 2	5.177,94	34.466,47	3.016,65
Corrida 7A	16.565,61	16.565,61	14.004,30
Corrida 7B	20.383,62	20.383,62	17.200,34
Corrida 7C	15.236,45	15.236,45	12.690,38
Corrida 8	10.116,41	10.116,41	8.575,76
Corrida 11	40.730,20	257.483,00	22.925,29
Corrida 12	31.310,41	213.056,80	18.937,86
Corrida 13	56.857,57	178.076,49	5.944,81
Corrida 14	141.816,65	434.771,25	16.805,31

*En unidades de MPa mm³.

6.2.10 Resultados derivados de las micrografías: evaluación del módulo flector para el cálculo de las tenciones residuales.

Mediante los valores de las constantes D_{ij} de la [Tabla 6.10](#) se puede evaluar entonces los módulos flectores con la **Ecuación 4.6** del [Capítulo 4.5](#), lo que luego nos permitirá calcular los **Momentos Residuales**. Los valores de los módulos flectores se resumen en la [Tabla 6.11](#).

Tabla 6.11: Evaluación de los los Módulos Flectores E_y^b .

	E_y^b *
Corrida 1	123.937,96
Corrida 2	111.767,99
Corrida 7A	11.544,72
Corrida 7B	11.306,38
Corrida 7C	15.946,20
Corrida 8	12.719,62
Corrida 11	109.796,23
Corrida 12	129.998,78
Corrida 13	113.142,14
Corrida 14	132.133,06

*En unidades de MPa (Mega Pascales).

6.3. Resistencia aparente de un aro de los tubos.

Se resume a continuación el procedimiento de ensayo utilizado para medir la resistencia de los tubos según el estándar [ASTM D 2290](#). De alguna de las partes obtenidas mediante el corte de los tubos (véase de la [Tabla 6.1](#)), generalmente de la parte central (partes 5 o 6 según el caso) se procede a realizar una entalla para conformar el concentrador de tensiones recomendado por la norma [ASTM D 2290](#). Esto se realizó en las facilidades del Edificio ARAS del CAC. Mediante una fresa de 4,5 mm de diámetro se procedió a realizar las entallas de un solo lado (el modo de fijar la pieza para realizar la entalla de ambos lados no garantiza una alineación perfecta, y como la norma lo permite, se realizaron las entallas de un solo lado). Véase la [Figura 6.21](#).

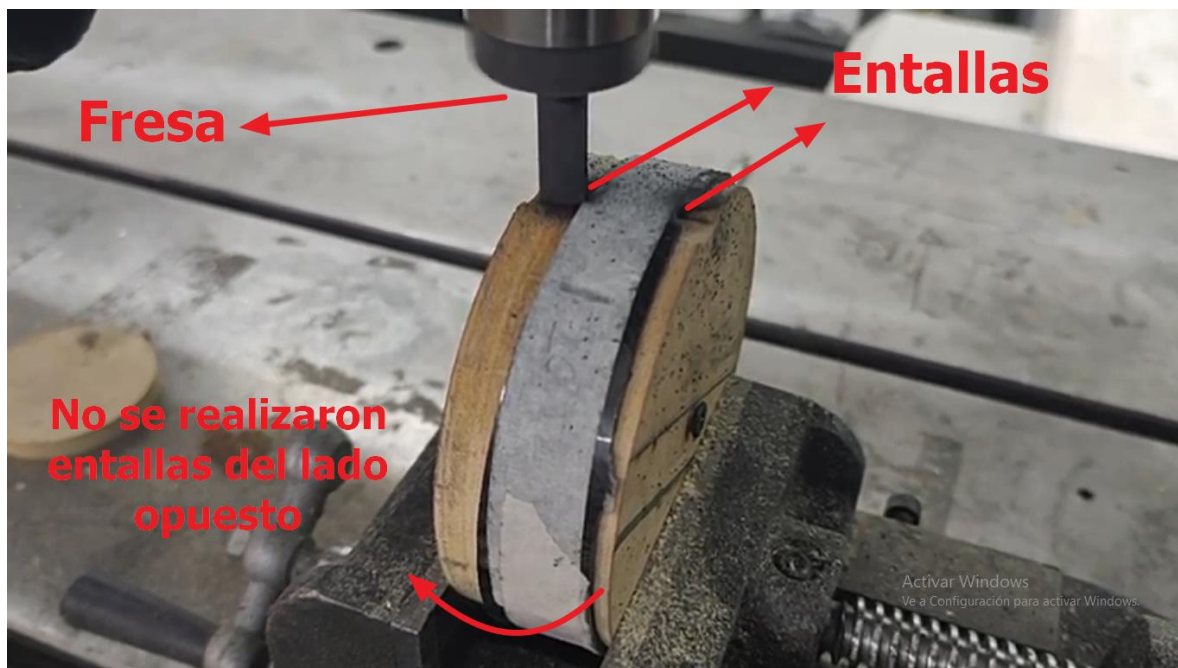


Figura 6.21: Mecanizado de las entallas en el CAC.

Luego se procedió a ensayar según el procedimiento A (válido para polímeros termoestables reforzados) de la norma [ASTM D 2290](#), con una velocidad de 0,5 ipm (12,7 mm/min). Se ensayó una muestra por corrida de tubo. Los resultados se encuentran resumidos en la [Tabla 6.12](#).

En la [Figura 6.22](#) se observan las Curvas de carga vs. Desplazamiento para cada corrida. Se denota que las corridas que no poseen capas circunferenciales (a 89°) se deforman mucho más. A medida que aumenta el número de capas circunferenciales, aumenta la rigidez y además aumenta la máxima carga de rotura. En la [Figura 6.23](#) se observa que las Corridas 7A, 7B, 7C y 8, que no poseen capas circunferenciales, se deforman mucho más a la rotura que las demás.

En cuanto a las Corridas 7A, 7B y 7C tienen un promedio de 12,57 mm de Carrera máxima con un desvío estándar de 3,17 mm. Mientras que tienen un promedio de 526,12 MPa con un desvío estándar de 63,45 MPa. Estos son los desvíos estándar que es esperable tener de tubo a tubo.

Tabla 6.12: Resultados de la medición de la resistencia de los tubos según el estándar ASTM D 2290.

Corrida	Parte	Ancho* [mm]	Espesor* [mm]	Área [mm ²]	Tiempo max. [s]	Carga máx. [kN]	Carrera máx. [mm]	Tensión máx. [Mpa]	Cantidad de capas a 90°
1	6	15,77	1,59	25,074	19,050	40,463	5,584	1.613,70	2
2	6	15,58	1,29	20,098	23,650	48,825	5,009	2.429,32	2
7A	6	14,57	1,71	24,915	64,900	14,900	13,724	598,04	0
7B	7	12,33	1,76	21,701	42,500	10,900	8,984	502,29	0
7C	6	15,07	1,52	22,906	70,900	10,950	14,995	478,03	0
8	6	15,99	1,42	22,706	71,650	11,750	15,153	517,49	0
11	6	12,98	2,62	34,008	28,000	74,550	5,915	2.192,16	4
12	6	15,66	2,53	39,620	31,300	94,675	6,613	2.389,59	4
13	6	23,12	2,74	63,349	23,107	101,000	5,023	1.594,34	6
14	6	15,32	2,66	40,751	29,596	104,697	6,384	2.569,17	6

* Medidos en la entalla.

** Todas las probetas fallaron en la entalla excepto el 7B, pero cabe decir que la probeta 7B tenía la unión de las caras de +45° y -45°.

*** Todas las probetas tendieron a cerrarse al fallar, excepto las probetas 7A, 7C y 8.

Curvas Carga vs. Desplazamiento

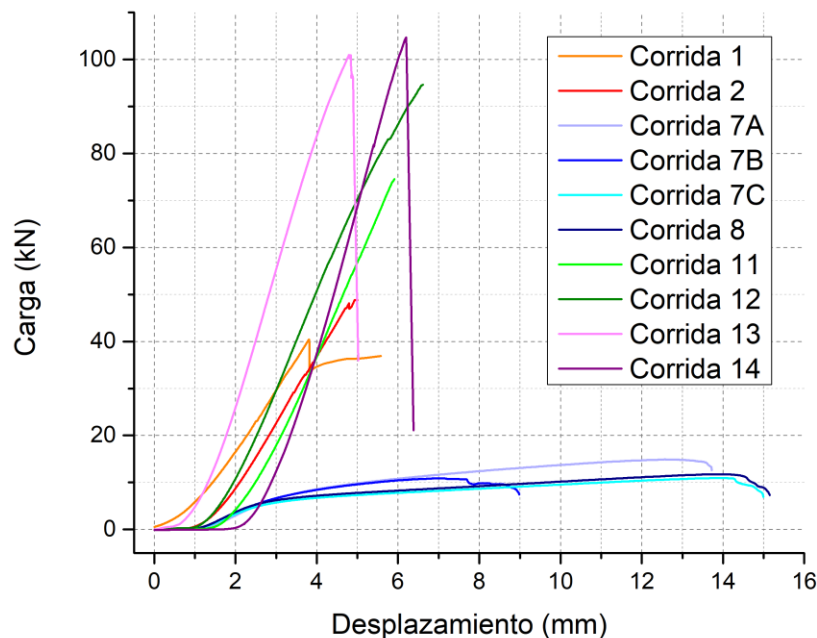


Figura 6.22: Curvas de carga vs. Desplazamiento para cada corrida.

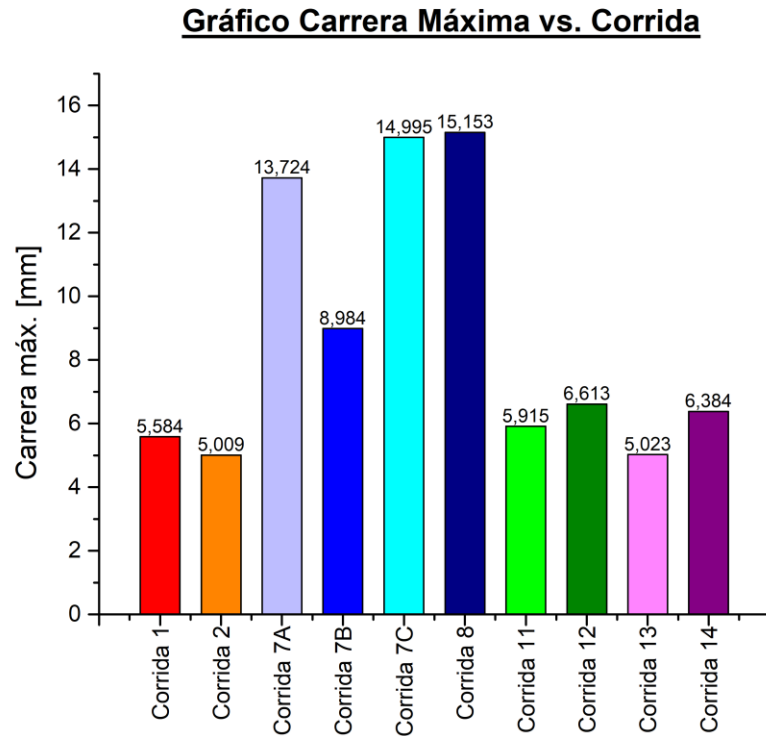


Figura 6.23: Gráfico de Barras de Carrera Máxima para cada corrida.

La [Figura 6.24](#) denota todo lo contrario: las corridas anteriores presentan una menor tensión de rotura. Las corridas que tienen capas circunferenciales no ofrecen una gran diferencia de tensión máxima alcanzada, pero sí se nota que las corridas con mayor tensión, al tener un mayor porcentaje de fibra, soportan más tensión que las corridas que tienen el mismo patrón sin tensión.

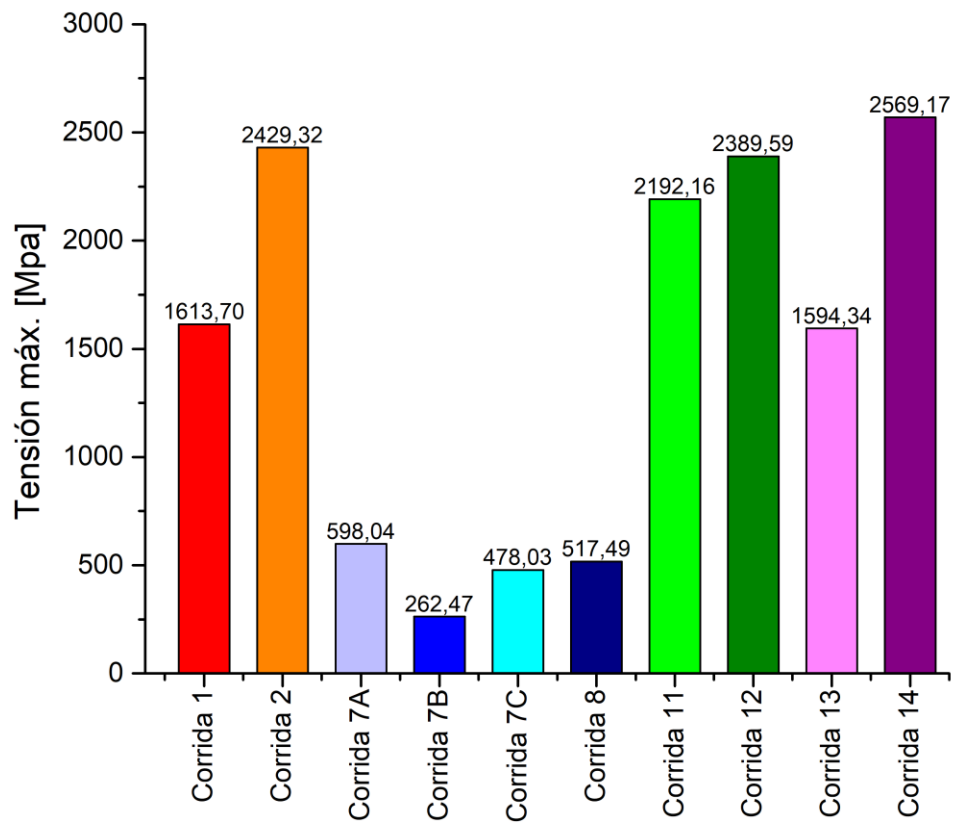


Figura 6.24: Gráfico de Barras de Tensión Máxima para cada corrida.

6.4. Tensiones residuales.

Se presenta a continuación en la [Tabla 6.13](#) los datos de las *Deformaciones Residuales*, obtenidas según el procedimiento descrito en el [Capítulo 4.4](#).

Tabla 6.13: Deformaciones Residuales.

Corrida N°	Parte N°	Deformación residual [$\mu\epsilon \equiv 10^{-6}\epsilon$]	Tendencia del anillo
1	5	-297	Cerrarse
2	5	-503	Cerrarse
7A - Inicio	1	-70	Cerrarse
7A - Mitad	5	-101	Cerrarse
7A - Final	8	-63	Cerrarse
7B - Inicio	4	1074	Abrirse
7B - Mitad	5	98	Abrirse
7B - Final	11	-126	Cerrarse
7C - Inicio	1	-52	Cerrarse
7C - Mitad	5	-59	Cerrarse
7C - Final	11	-92	Cerrarse
8	5	-22	Cerrarse
11	5	-347	Cerrarse
12	5	-781	Cerrarse
13	5	-362	Cerrarse
14	5	-538	Cerrarse

Se muestra a continuación la [Figura 6.25](#) que clarifica los comentarios del [Capítulo 4.5](#), más precisamente en la [Figura 4.11](#), acerca de la tendencia de los anillos de cerrarse o abrirse, según como sean los *Momentos Residuales* presentes al momento de liberarse mediante el método del corte. La [Figura 6.25](#) presenta a la izquierda la Muestra de la Corrida 7B-Inicio con tendencia a abrirse y a la derecha la Muestra de la Corrida 12 con tendencia a cerrarse. Casi todas las muestras tuvieron este último comportamiento, excepto las Muestras de la Corrida 7B. No está claro el por qué de esta excepción. En cuanto a la dispersión de los valores, descartándose por el motivo mencionado anteriormente las Muestras de las Corridas

7B, se obtuvo para la Muestra de la Corrida 7A un promedio de $-78 \mu\epsilon$ con un desvío estándar de $20,22 \mu\epsilon$ y un promedio de $-67,67 \mu\epsilon$ con un desvío estándar de $21,36 \mu\epsilon$ para la Muestra de la Corrida 7C. Teniendo en cuenta las dos Corridas 7A y 7C, tienen un promedio de $-72,83 \mu\epsilon$ con un desvío estándar de $19,45 \mu\epsilon$, siendo este último desvío el esperable cuando se fabrica un mismo tubo bajo las mismas condiciones.

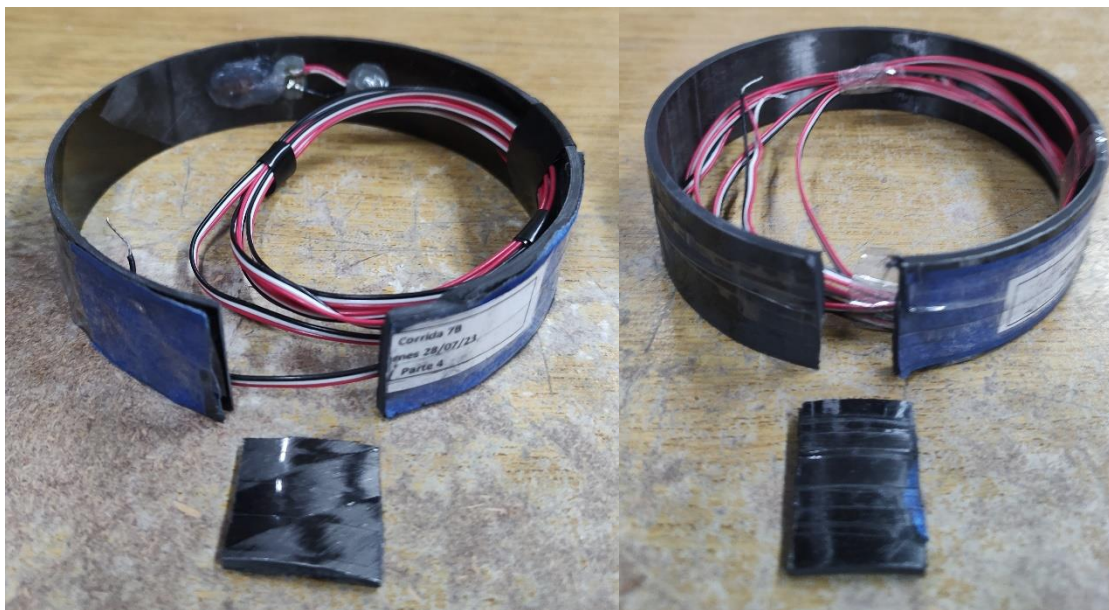


Figura 6.25: Fotografías de los casos más extremos de tendencia a abrirse o cerrarse de los tubos, según como sean los *Momentos Residuales* presentes al momento de liberarse las *Deformaciones Residuales* mediante el método del corte.

A partir de los datos de las *Deformaciones Residuales* resumidos en la [Tabla 6.13](#), el valor de los módulos flectores en la [Tabla 6.11](#) y los parámetros de calidad resumidos en la [Tabla 6.4](#), se pueden evaluar los *Momentos Residuales* con la [Ecuación 4.2](#) del [Capítulo 4.5](#). Los resultados se encuentran resumidos en la [Tabla 6.14](#).

Las *Tensiones Residuales* se obtienen de evaluar la [Ecuación 4.4](#) del [Capítulo 4.5](#) para cada una de las corridas con los valores de *Momentos Residuales* de la [Tabla 6.14](#). Se necesita evaluar también la [Ecuación 4.5](#) para obtener la constante N para cada corrida. La [Tabla 6.15](#) resume la información, para los valores máximos de σ_y y σ_z . Estos valores en el caso de σ_y se encuentra cuando el radio-vector r se encuentra en los extremos, es decir, $r=a$ y $r=b$. En cambio para σ_z el valor máximo se encuentra en el centro. Se evaluó la [Ecuación 4.4](#)

en 11 puntos para obtener la distribución típica de las **Tensiones Residuales**. El resultado se muestra en la **Figura 6.26** para σ_z y en la **Figura 6.27** para σ_y . Se puede observar que las tensiones en la dirección Z son casi nulas y que presentan un valor bastante bajo.

Tabla 6.14: Momentos Residuales.

Corrida N°	Desplazamiento δ [mm]	Radio Menor a [mm]	Radio Mayor b [mm]	Módulo de Flexión E_y^b [MPa]	Momento flector [N]
1	-0,00094298	50,74	52,49	123.937,96	-1,550E-05
2	-0,00159703	50,76	52,28	111.767,99	-1,409E-05
7A	-0,00024765	50,86	52,56	11.544,72	-2,329E-06
7B	0,00110702	50,93	52,77	11.306,38	1,390E-05
7C	-0,00021484	50,96	52,48	15.946,20	-1,779E-06
8	-0,00006985	50,84	52,23	12.719,62	-3,258E-07
11	-0,00110173	50,66	53,65	109.796,23	-1,472E-04
12	-0,00247968	50,75	53,40	129.998,78	-2,252E-04
13	-0,00114935	50,59	53,25	113.142,14	-2,022E-04
14	-0,00170815	50,73	54,13	132.133,06	-9,359E-04

Tabla 6.15: Tensiones Residuales.

Corrida N°	N [mm ⁴]	$\sigma_y(a)$ [MPa]	$\sigma_y(b)$ [MPa]	$\sigma_z(\text{Centro})$ [MPa]
1	12,50	-3,071E-05	3,002E-05	7,045E-19
2	7,12	-3,696E-05	3,624E-05	-2,251E-19
7A	11,14	-4,889E-06	4,783E-06	7,133E-20
7B	15,28	2,492E-05	-2,434E-05	-1,551E-18
7C	7,12	-4,667E-06	4,576E-06	0,000E+00
8	4,98	-1,021E-06	1,003E-06	-3,721E-20
11	106,56	-1,007E-04	9,695E-05	6,283E-19
12	65,75	-1,957E-04	1,892E-04	-1,557E-18
13	66,75	-1,744E-04	1,686E-04	3,444E-19
14	178,15	-4,965E-04	4,755E-04	-5,972E-18

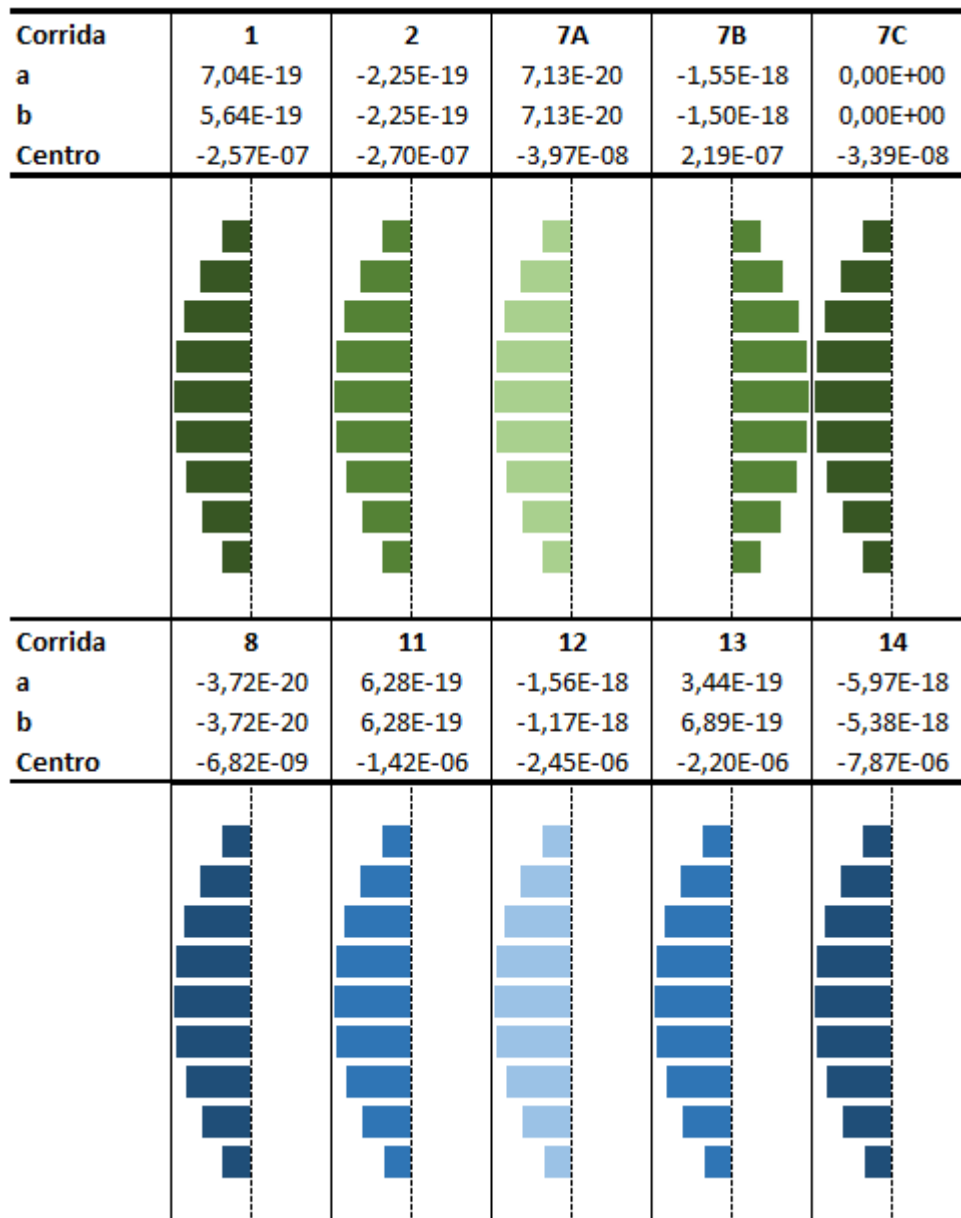


Figura 6.26: Perfiles de las *Tensiones Residuales* de σ_z .

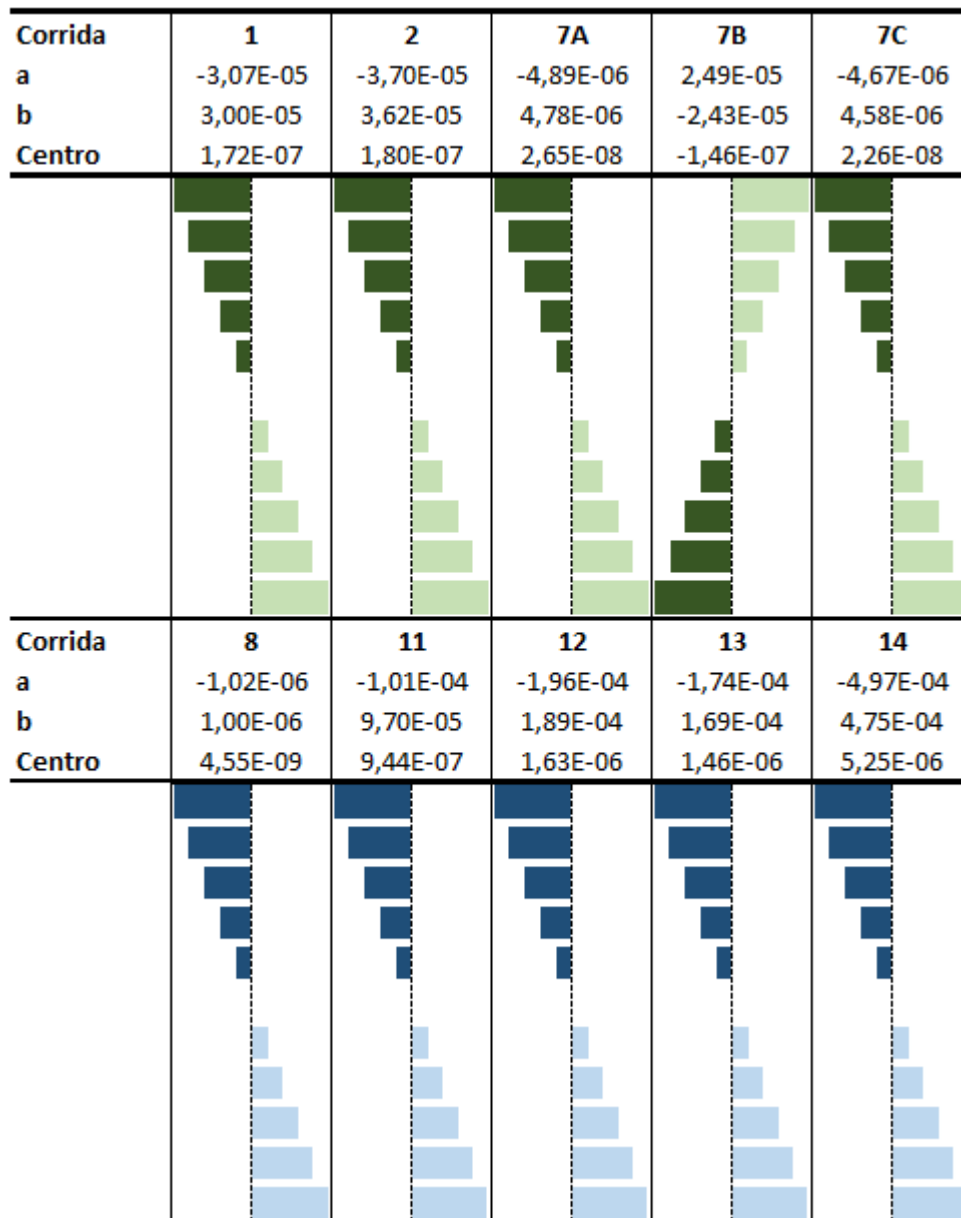


Figura 6.27: Perfiles de las *Tensiones Residuales* de σ_y .

Capítulo 7: Conclusiones

Se presentan a continuación las conclusiones derivadas a partir de los estudios estadísticos realizados sobre los resultados de los experimentos llevados a cabo. Se analizan los resultados relativos a: % de Fibra, % de Resina, % de Poros, Tensión Máxima alcanzada en el ensayo [ASTM D 2290](#), Carrera Máxima alcanzada en el ensayo [ASTM D 2290](#), Deformaciones Residuales y Tensiones Residuales. En todos los casos se realiza el procedimiento detallado en el [Capítulo 5.9](#). Para el caso en particular de las **Tensiones Residuales** obtenidas, se las contrastaron con modelos teóricos simplificados desarrollados en el [Capítulo 4.6](#). Se resumen a continuación en una única **Tabla 7.1**, todos los valores a ser tenidos en cuenta durante el análisis. Los valores de % de Poros, % de Fibra y % de Resina se obtuvieron de la **Tabla 6.5**, los valores de Carrera Máxima y Tensión Máxima se obtuvieron de la **Tabla 6.14** y los valores de Deformaciones Residuales se obtuvieron de la **Tabla 6.15**. Estos valores provienen de realizar las corridas, obtener muestras para cada tubo y luego realizar las micrografías y el análisis de sus imágenes según el procedimiento descrito en el [Capítulo 6.2](#), el ensayo de tracción de Disco Partido según el estándar [ASTM D 2290](#) descrito en el [Capítulo 2.3.4](#) y el procedimiento de medición de **Tensiones Residuales** según el método del corte descrito en el [Capítulo 4.4](#).

7.1. Conclusiones acerca del % de Fibra alcanzado.

A partir de los resultados contenidos en la **Tabla 7.1**, se calculan los Contrastes a partir de las definiciones de la **Tabla 5.9**. Como información complementaria, se resume en la **Tabla 7.2** la información de partida del DOE correspondiente, más los índices de cada corrida y la proporción para realizar el Gráfico de Daniel (véase [Capítulo 5.6.1](#)), el valor absoluto del efecto estandarizado (véase [Capítulo 5.6.2](#)), el valor del cálculo de los contrastes y los efectos (la tabla está ordenada de mayor a menor por la columna de “Efecto Absoluto”). Del análisis de la **Tabla 7.2** surge que a priori, la Temperatura de la batea y la Tensión son los que más contribuyen a tener mayores porcentajes de fibra. Se realiza un nuevo DOE pero esta vez en Minitabs® teniendo en cuenta únicamente estos dos efectos

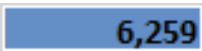
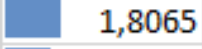
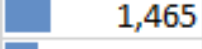
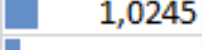
(conviene siempre realizar el “mejor ANOVA” posible). De dicho estudio surge que el factor E= T° Batea y el factor A=Tensión, son los que más contribuyen a tener un mayor porcentaje de fibra. Los otros factores no contribuyen de manera preponderante. El estudio completo del mejor ANOVA conseguido se resume en la [Tabla 7.3](#).

Tabla 7.1: Resumen de los resultados de todas las experiencias.

Muestra	% Poros	% Fibra	% Resina	Carrera máx. [mm]	Tensión máx. [Mpa]	Deformación residual [$\mu\epsilon \equiv 10^{-6}\epsilon$]
1	3,383	63,387	33,229	5,584	1.613,704	-297,00
2	9,000	56,956	34,044	5,009	2.429,322	-503,00
7	4,262	59,845	35,893	12,568	526,120	-72,83*
8	2,442	61,617	35,942	15,153	517,489	-22,00
11	12,777	55,833	31,415	5,915	2.192,157	-347,00
12	3,124	66,510	30,366	6,613	2.389,588	-781,00
13	5,935	57,811	36,254	5,023	1.594,344	-362,00
14	4,920	67,511	27,569	6,384	2.569,168	-538,00

*Se informa el valor promedio entre las Corridas 7^a y 7C, según lo comentado en el [Capítulo 6.4](#).

Tabla 7.2: Información relevante del DOE para % Fibra.

Interacción	Contraste	Efecto	Efecto Absoluto	Suma de cuadrados	Índice	Proporción
E=T° Batea	-25,036	-6,259	 6,259	78,350	1	0,071
A=Tensión	15,718	3,930	 3,9295	30,882	2	0,214
AB	9,180	2,295	 2,295	10,534	3	0,357
AC	7,226	1,807	 1,8065	6,527	4	0,500
D=Grosor	5,860	1,465	 1,465	4,292	5	0,643
C=Dif. Angulo	4,098	1,024	 1,0245	2,099	6	0,786
B=Tiempo	-1,860	-0,465	 0,465	0,432	7	0,929

Minitabs®, además de poder obtener el Gráfico de Pareto¹ y de Daniel me permite tener otra serie de gráficos útiles como son:

-Residuos vs. Orden: Me indica que los experimentos tienen una buena aleatoriedad (son independientes y no dependen del orden de la corrida). Hay residuos tanto por arriba como por abajo. No hay tendencias claras. Existe una dispersión absoluta entre los datos. Esta gráfica solo se obtiene con el “mejor” ANOVA.

-Gráfica de probabilidad normal: Me indica que los residuos siguen una distribución normal. Los residuos son cercanos a una línea de tendencia. En la [Figura 7.1](#) se muestran cada uno de estos gráficos.

Tabla 7.3: Resumen del mejor ANOVA para evaluar los factores que contribuyen al % de Fibra.

Fuente de Variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor-p*
E= T° Batea	78,350	1	78,350	16,402	0,010
A=Tensión	30,882	1	30,882	6,465	0,052
Error	23,885	5	4,777		
Total	133,117	7			
R^2	82,70%				
R^2_{aj}	75,78%				

* Los valores que son menores a $\alpha=0,05$, influyen significativamente en el % de Fibra.

Si bien el valor-p del Factor A=Tensión es levemente mayor a $\alpha=0,05$, por experiencia se sabe que el valor de tensión influye mucho sobre el % de fibra esperado en el proceso de EF. Esto también se ve en el Gráfico de Pareto con el mejor ANOVA de la [Figura 7.1](#). Por tanto se concluye que ambos factores, tanto la Tensión de la bobina como la Temperatura de la batea influyen en el porcentaje de fibra obtenido. A mayor tensión, y menor temperatura de la batea, mayor porcentaje de fibra se obtiene. Según estas conclusiones, una menor

¹ Dado que el Gráfico de Pareto y el de Daniel proporcionan casi la misma información, se utilizará el Diagrama de Pareto en el resto del capítulo.

temperatura de la batea influye más en el proceso que una mayor tensión de fibra debido a la relación que tienen en el cálculo de sus efectos.

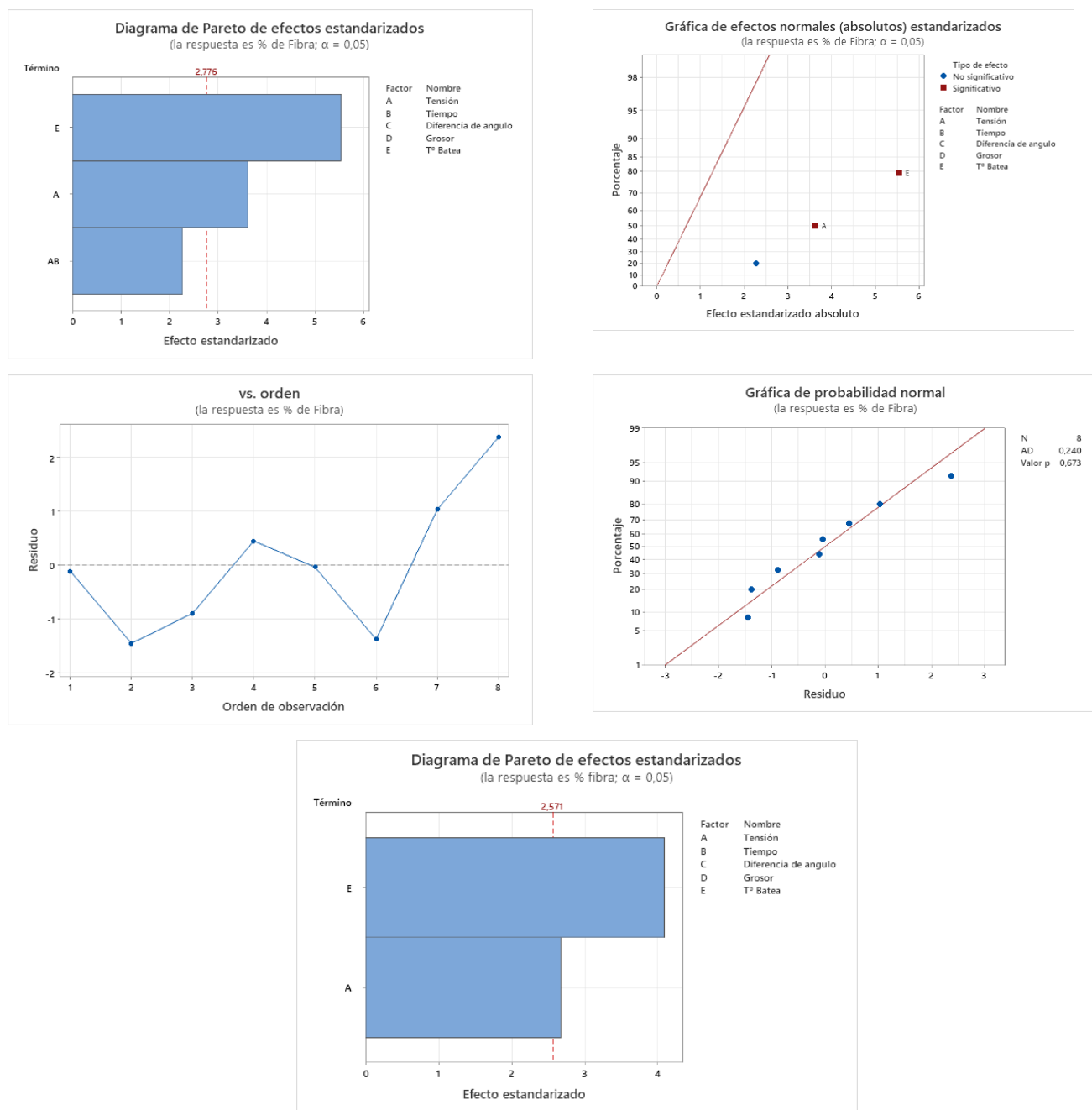
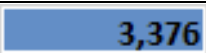
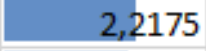
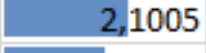
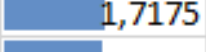
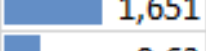
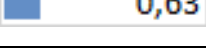


Figura 7.1: Gráfico de Pareto del DOE de % Fibra. Arriba-Izquierda: Gráfico de Pareto. Arriba-Derecha: Gráfico de Daniels. Centro-Izquierda: Residuos vs. Orden. Centro-Derecha: Probabilidad normal de residuos. Abajo: Gráfico de Pareto del mejor ANOVA.

7.2. Conclusiones acerca del % de Resina alcanzado.

Se realiza el mismo procedimiento que en el [Capítulo 7.1](#), lo cuál está resumido en la [Tabla 7.4](#), solo que esta vez no hay una tendencia muy clara de si hay un factor/es dominante/s respecto al % de Resina. Se debe entonces empezar a iterar sobre los factores más importantes: el grosor de capa y la T° de la Batea. Sin embargo, nuevamente se termina concluyendo que ningún factor es estadísticamente relevante en cuanto al % de Resina. Esto se verifica viendo el gráfico de Pareto en la [Figura 7.2](#): con todos los factores no se distingue uno claramente influyente en el % de Resina, con los factores D y E tampoco y tampoco con el factor D solo. La información se encuentra resumida en la [Tabla 7.4](#). El ANOVA se encuentra resumido en la [Tabla 7.5](#).

Tabla 7.4: Información relevante del DOE para % Resina.

Interacción	Contraste	Efecto	Efecto Absoluto	Suma de cuadrados	Índice	Proporción
D=Grosor	-13,504	-3,376	 3,376	22,795	1	0,071
E=T° Batea	10,598	2,650	 2,6495	14,040	2	0,214
A=Tension	-8,870	-2,218	 2,2175	9,835	3	0,357
AC	-8,402	-2,101	 2,1005	8,824	4	0,500
AB	6,870	1,718	 1,7175	5,900	5	0,643
C=Dif. Angulo	6,604	1,651	 1,651	5,452	6	0,786
B=Tiempo	2,520	0,630	 0,63	0,794	7	0,929

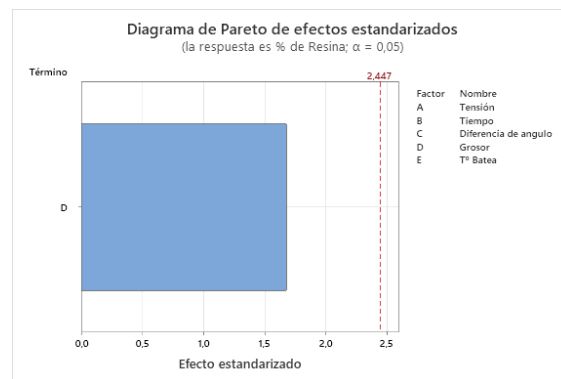
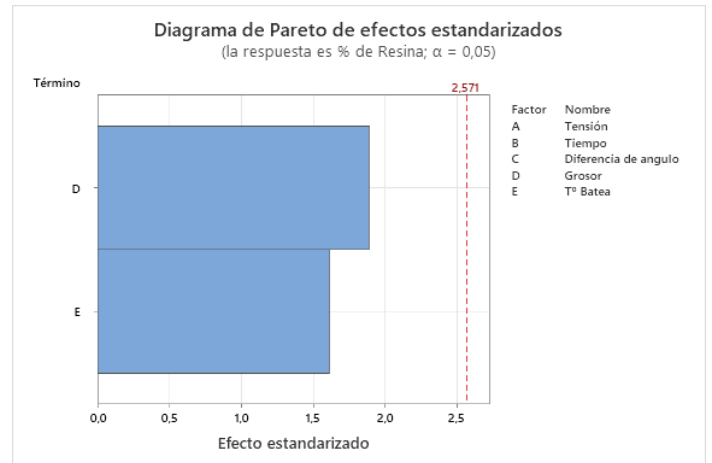
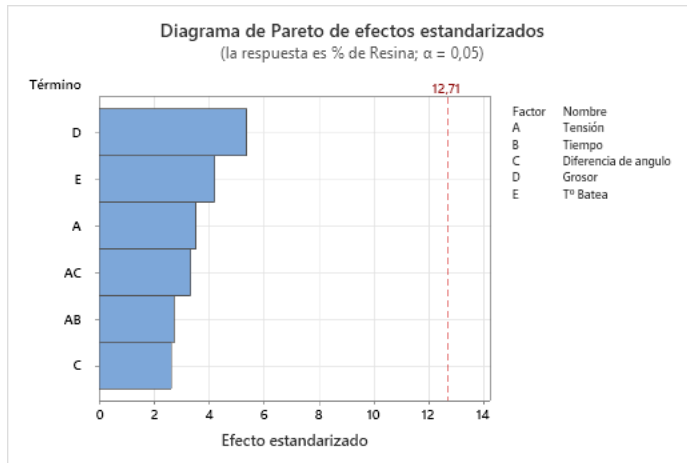


Figura 7.2: Gráficos de Pareto del DOE de % Resina. No se ve un factor dominante claro respecto del % de resina.

Tabla 7.5: Resumen del mejor ANOVA para evaluar los factores que contribuyen al % de Resina.

Fuente de Variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor-p*
D=Grosor	22,795	1	22,795	3,050	0,141
Error	44,844	6,000	7,474		
Total	67,638				
R^2	33,70%				
R^2_{aj}	22,65%				

7.3. Conclusiones acerca del % de Poros alcanzado.

El DOE del % de Poros arroja en un principio que la interacción entre la Tensión y el Tiempo, la Temperatura de la batea y la Diferencia de Ángulo entre las capas son los factores que tienen un mayor efecto sobre el porcentaje de poros. Véase la [Tabla 7.6](#). El gráfico de Pareto de la [Figura 7.3](#) nos ayuda a visualizar cuáles son los efectos mas significativos. Teniendo en cuenta esto último se realiza el mejor ANOVA, resumido en la [Tabla 7.7](#). En esta tabla, se observa que con el nuevo ANOVA el Factor C (Diferencia de Ángulo entre capas) en realidad no es relevante, aunque si los otros dos factores.

Se concluye entonces que los factores que contribuyen al aumento en el porcentaje de poros es la interacción entre la Tensión y el Tiempo y la Temperatura de la batea. La interpretación de un Factor único como la Temperatura de la batea es simple: el efecto es positivo, así que una mayor temperatura de la batea contribuye a un mayor porcentaje de poros. Para la interacción entre Tensión y el Tiempo, las conclusiones no son tan fáciles, pero gracias a Minitabs®, podemos obtener las gráficas de interacción mostradas en la [Figura 7.4](#).

Tabla 7.6: Información relevante del DOE para % de Poros.

Interacción	Contraste	Efecto	Efecto Absoluto	Suma de cuadrados	Índice	Proporción
AB	-16,075	-4,019	4,01875	32,301	1	0,071
E=T° Batea	14,465	3,616	3,61625	26,155	2	0,214
C=Dif. Angulo	-10,725	-2,681	2,68125	14,378	3	0,357
D=Grosor	7,669	1,917	1,91725	7,352	4	0,500
A=Tensión	-6,871	-1,718	1,71775	5,901	5	0,643
AC	1,201	0,300	0,30025	0,180	6	0,786
B=Tiempo	-0,633	-0,158	0,15825	0,050	7	0,929

Tabla 7.7: Resumen del mejor ANOVA para evaluar los factores que contribuyen al % de Poros.

Fuente de Variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor-p*
AB	32,301	1	32,301	9,582	0,036
E=T° Batea	26,155	1	26,155	7,759	0,050
C=Dif. Angulo	14,378	1	14,378	4,265	0,108
Error	13,483	4	3,371		
Total	86,317	7			
R^2	84,38%				
R_{aj}^2	72,66%				

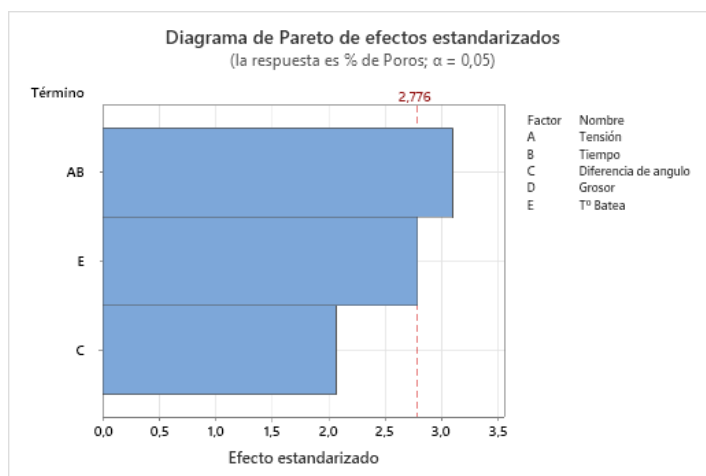
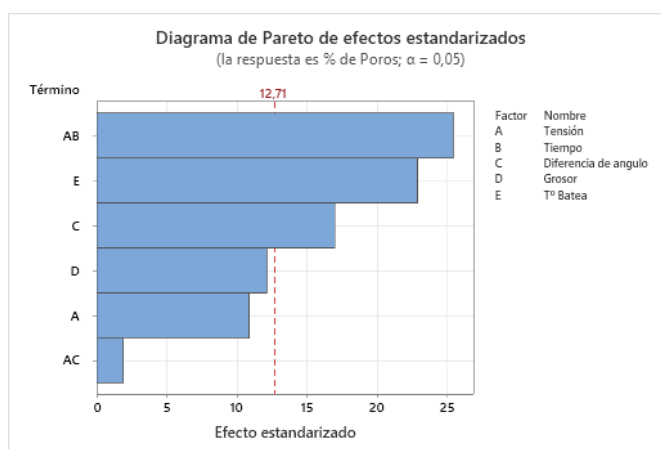


Figura 7.3: Gráficos de Pareto del DOE de % Poros.

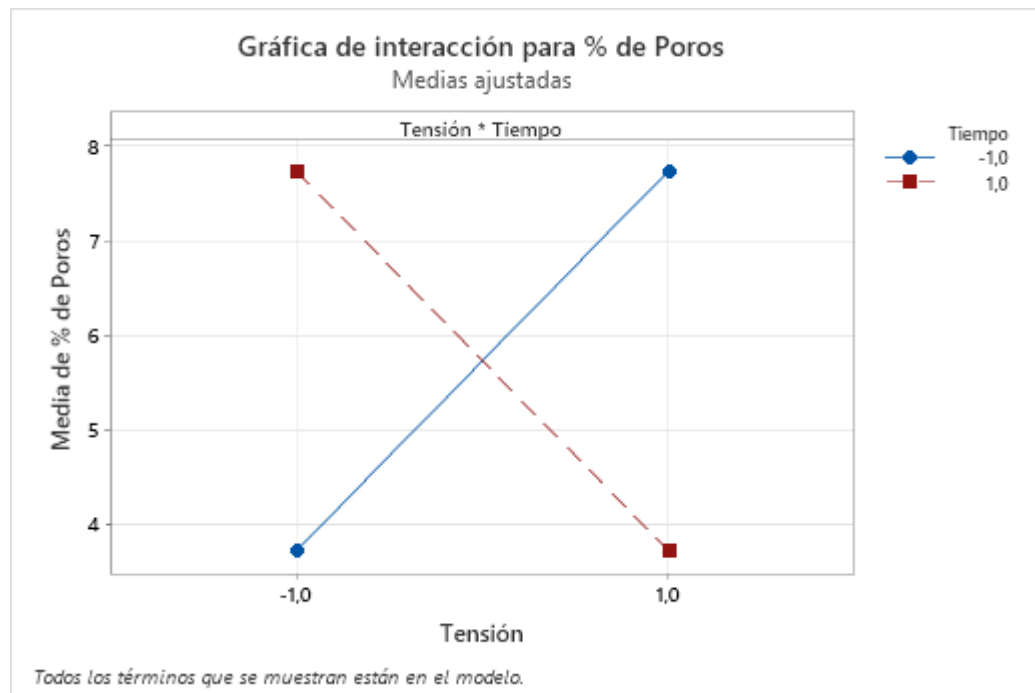
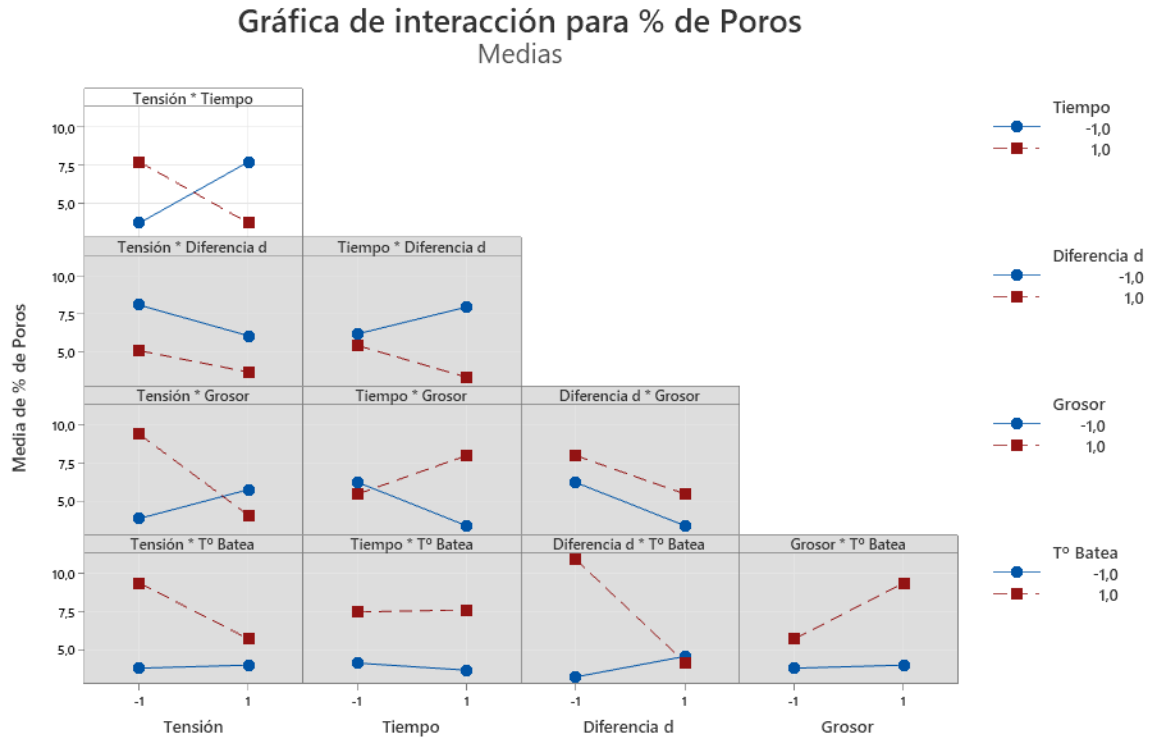


Figura 7.4: Gráficos de Interacción de factores del DOE de % Poros.

La parte superior de la **Figura 7.4** muestra todas las gráficas de interacción, en la cuál la que aparece de color claro significa que el efecto de la interacción es fuerte. En la parte inferior se muestra este gráfico de interacción con mayor detenimiento. La respuesta cambia cuando se tiene mayor tensión a un mayor porcentaje de poros para tiempos cortos, mientras que para tiempos largos (menor velocidad del proceso), si aumento la tensión disminuye la cantidad de poros. Por tanto, para mantener bajo el porcentaje de poros se necesita operar en tiempos cortos (altas velocidades) y baja tensión o tiempos largos (baja velocidad) y alta tensión.

7.4. Conclusiones acerca de la Tensión Máxima alcanzada en el ensayo ASTM D 2290.

En un principio, el análisis del DOE de Tensión máxima arroja que todos los factores, excepto la interacción AC y el Factor E (Temperatura de la Batea) tienen un gran efecto en la Tensión máxima observada en los Ensayos de disco partido llevados a cabo (Véase la **Tabla 7.8**). Si se realiza un nuevo ANOVA excluyendo esos factores, se confirma que todos ellos tienen un efecto sobre la tensión máxima registrada. No puede entonces simplemente por el análisis del ANOVA del DOE excluirse estas variables. Sin embargo, el Gráfico de Pareto ofrece un criterio para saber cuales de estos factores son los más relevantes, y son los factores que siguen una línea de referencia. Entonces, los Factores D (Grosor) y C (Diferencia de ángulo entre capas) se notan que son los que tienen mayor influencia en el proceso. Véase la **Figura 7.5** con el Gráfico de Pareto. Un mayor grosor contribuye, ya que hay mas capas circunferenciales a 89°, que contribuyen a aumentar la resistencia. Una menor diferencia angular también contribuye, ya que una capa a 45° intermedia entre las capas axiales y circunferenciales es mejor que las capas axiales. Un mejor ANOVA en ese caso no es necesario, ya que se han discriminado los factores más importantes que causan variabilidad en la respuesta “Tensión máxima”. Por otro lado, los valores de R^2 y R_{aj}^2 son de 99,65% y 98,76% respectivamente.

Tabla 7.8: Información relevante del DOE para Tensión máxima.

Interacción	Contraste	Efecto	Efecto Absoluto	Suma de cuadrados	Índice	Proporción
D=Grosor	3.658,622	914,656	914,6555	1.673.189,367	1	0,071
C=Dif. Angulo	-3.417,650	-854,413	854,4125	1.460.041,440	2	0,214
B=Tiempo	-2.581,184	-645,296	645,296	832.813,855	3	0,357
A=Tension	1.979,242	494,811	494,8105	489.674,862	4	0,500
AB	-1.601,642	-400,411	400,4105	320.657,137	5	0,643
E=T° Batea	-365,268	-91,317	91,317	16.677,589	6	0,786
AC	-46,856	-11,714	11,714	274,436	7	0,929

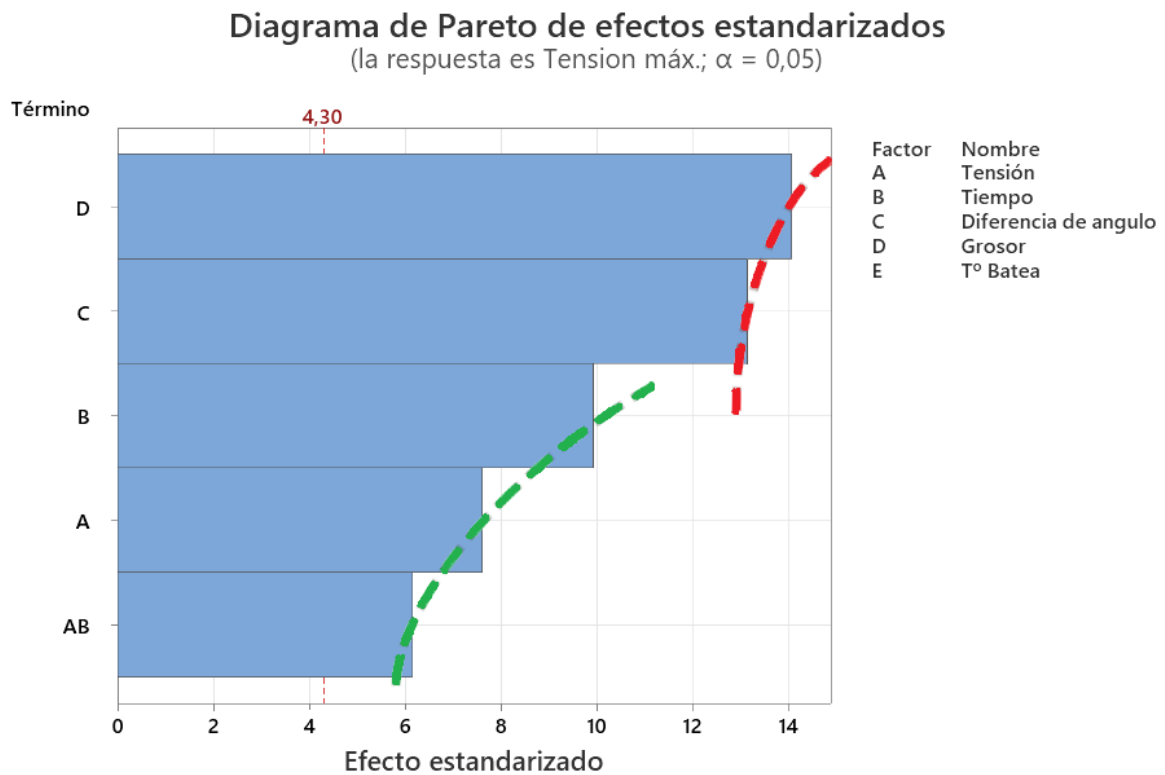
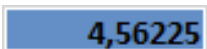
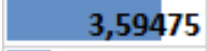
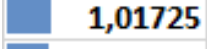
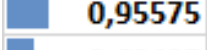
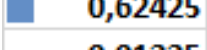
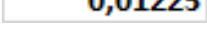


Figura 7.5: Gráficos de Pareto del DOE de Tensión máxima. Observar las líneas de tendencia rojas y verdes, que permiten concluir que finalmente los factores D y C son los que más efecto tienen en la resistencia máxima obtenida en el ensayo.

7.5. Conclusiones acerca de la Carrera Máxima alcanzada en el ensayo ASTM D 2290.

Cómo en el caso anterior, hay muchos factores en los que el análisis del DOE arroja como influyentes en la respuesta “Carrera máxima”. Sin embargo, al analizar el Gráfico de Pareto como en el caso anterior (**Figura 7.6**), se concluye que las tres variables que tienen una mayor respuesta son el Factor B (Tiempo), el Factor C (Diferencia de ángulo entre capas) y el Factor D (grosor), que en este caso tiene un efecto negativo. Esto se debe principalmente a que las Corridas 7 y 8, que eran finas y con capas a $\pm 45^\circ$, presentaban una gran deformación (Véase la **Figura 6.22**). La **Tabla 7.9** resume los parámetros más importantes de este análisis de DOE. Nuevamente, es innecesario realizar un nuevo análisis con el mejor ANOVA. Los valores de R^2 y R_{aj}^2 son del 100% en ambos casos.

Tabla 7.9: Información relevante del DOE para Carrera máxima.

Interacción	Contraste	Efecto	Efecto Absoluto	Suma de cuadrados	Índice	Proporción
B=Tiempo	18,249	4,562	 4,56225	41,628	1	0,071
C=Dif. Angulo	16,007	4,002	 4,00175	32,028	2	0,214
D=Grosor	-14,379	-3,595	 3,59475	25,844	3	0,357
A=Tension	4,069	1,017	 1,01725	2,070	4	0,500
AC	3,823	0,956	 0,95575	1,827	5	0,643
AB	2,497	0,624	 0,62425	0,779	6	0,786
E=T° Batea	-0,049	-0,012	 0,01225	0,000	7	0,929

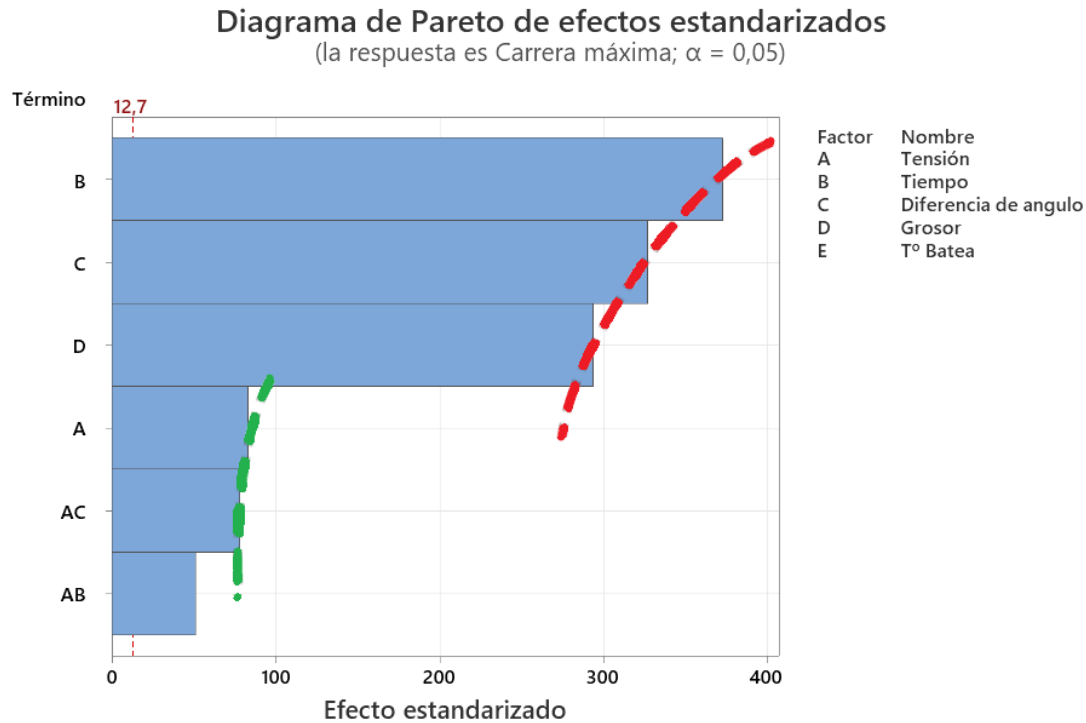


Figura 7.6: Gráficos de Pareto del DOE de Deformación máxima.

7.6. Conclusiones acerca de las Deformaciones Residuales.

Las Corridas 7A, 7B y 7C se realizaron con el fin de establecer la variabilidad que se tenía respecto a la fabricación de tubo a tubo en cuanto a las diferentes respuestas obtenidas. Como todas las probetas tendieron a cerrarse (Véase la [Tabla 6.15](#)), excepto la citada probeta 7B, se excluyen los resultados de **Deformaciones Residuales** de la probeta 7B del promedio general de las probetas de la Corrida 7. Además, el cálculo de las **Deformaciones residuales** predichas según el modelo simplificado del [Capítulo 4.6](#), predice **Deformaciones residuales** negativas. Por otro lado, se deben poner las **Deformaciones Residuales** con su valor absoluto, porque sino las conclusiones a las que se llegan son erróneas cuando se está evaluando el método del DOE.

Con todo esto, la [Tabla 7.10](#) resume el análisis del DOE respecto a las **Deformaciones Residuales**. Nuevamente, todos los factores influyen en la respuesta, por lo que se requiere del Gráfico de Pareto ([Figura 7.7](#)) para concluir que un mayor grosor, una menor diferencia

angular y una mayor tensión conducen a mayores **Deformaciones Residuales**. Con respecto a los valores de R^2 y R_{aj}^2 , nuevamente son del 100% en ambos casos.

Tabla 7.10: Información relevante del DOE para las Deformaciones Residuales.

Interacción	Contraste	Efecto	Efecto Absoluto	Suma de cuadrados	Índice	Proporción
D=Grosor	1133,170	283,293	283,2925	160.509,281	1	0,071
C=Dif. Angulo	-933,170	-233,293	233,2925	108.850,781	2	0,214
A=Tension	765,170	191,293	191,2925	73.185,641	3	0,357
AC	-514,830	-128,708	128,7075	33.131,241	4	0,500
B=Tiempo	-477,170	-119,293	119,2925	28.461,401	5	0,643
E=T° Batea	-454,830	-113,708	113,7075	25.858,791	6	0,786
AB	1,170	0,293	0,2925	0,171	7	0,929



Figura 7.7: Gráficos de Pareto del DOE de Deformaciones Residuales.

Por otro lado, se evaluaron las **Deformaciones Residuales** según el modelo simplificado del [Capítulo 4.6](#). El software Minitabs® también evalúa una relación de correlación entre las variables más importantes del DOE. En este caso, la relación que halló es la siguiente:

$$DR = (-259,6 - 154,9 A + 11,6 C - 141,6 D) \times 10^{-6} \quad \text{Ec. 7.1}$$

En donde DR es el valor de las **Deformaciones Residuales**, A es el valor de la Tensión (puede tomar dos valores: 0,065 kg o 1,3 kg, según sea baja o alta tensión respectivamente, véase el [Capítulo 3.2](#)), C es la Diferencia de ángulo (que puede tomar valores de -1 si es baja o +1 si es alta) y D es el Grosor (que puede tomar el valor de -1 para tubos finos y de +1 para tubos gruesos). La comparación entre las **Deformaciones Residuales** obtenidas experimentalmente, las **Deformaciones Residuales** evaluadas según el modelo simplificado según la TCL y las **Deformaciones Residuales** evaluadas según la relación de correlación hallada con Minitabs® se muestra en la [Tabla 7.11](#) y se graficó mediante la [Figura 7.8](#).

Tabla 7.11: Deformaciones Residuales obtenidas mediante 3 diferentes métodos.

Deformaciones Residuales				
Corridas	Experimental	Desvío estándar	Modelo Predictivo	Modelo de Correlación
Corrida 1	-2,97E-04	1,95E-05	-8,11E-05	-2,45E-04
Corrida 2	-5,03E-04	1,95E-05	-9,83E-05	-4,36E-04
Corrida 7	-7,28E-05	1,95E-05	-1,63E-04	-1,15E-05
Corrida 8	-2,20E-05	1,95E-05	-1,58E-04	-2,03E-04
Corrida 11	-3,47E-04	1,95E-05	-1,07E-04	-5,28E-04
Corrida 12	-7,81E-04	1,95E-05	-7,72E-05	-7,19E-04
Corrida 13	-3,62E-04	1,95E-05	-7,90E-05	-2,95E-04
Corrida 14	-5,38E-04	1,95E-05	-6,78E-05	-4,86E-04

La [Figura 7.8](#) muestra claramente que el modelo simplificado propuesto en el [Capítulo 4.6](#) tiene dificultades para predecir bien los resultados experimentales. Esto es básicamente

porque las fórmulas basadas en la TCL no tienen en cuenta la Tensión aplicada. Únicamente en las Corridas 7 y 8, en las cuales todas las capas son a $\pm 45^\circ$, y por lo tanto, estas capas están mas cerca de las condiciones de isotensión ($\pm 55^\circ$), las fórmulas de la TCL funcionan correctamente. Por otra parte, la fórmula de correlación se acerca bastante al resultado experimental, pero debido a que proviene de un estudio estadístico de un diseño de experimentos, en los cuales siempre hay mucha dispersión a propósito, las predicciones se encuentran fuera de la región entre el valor experimental y el desvío estándar esperado según los datos experimentales presentados en el [Capítulo 6.4](#).

Gráfico de Deformaciones Residuales

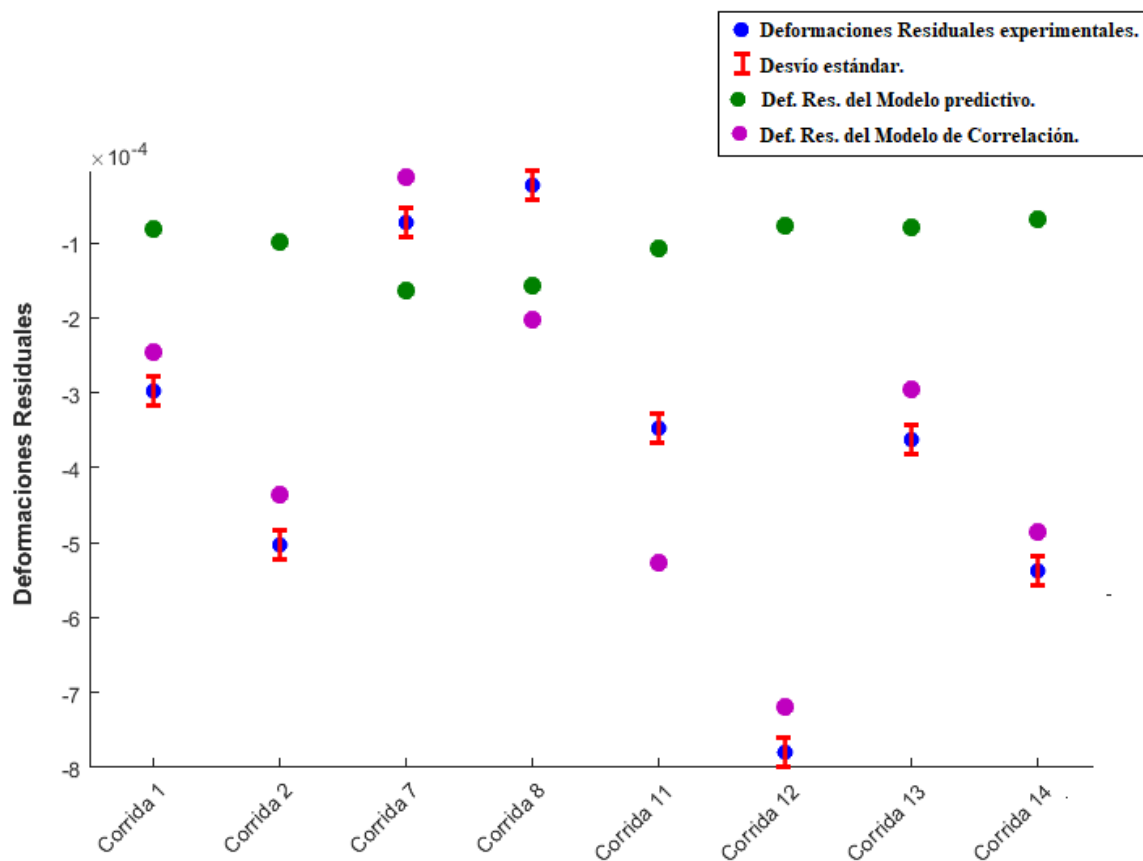


Figura 7.8: Deformaciones Residuales obtenidas mediante 3 diferentes métodos.

Todo esto hace que sea necesario proponer a futuro estudiar las **Deformaciones Residuales** para realizar un modelo termo-reológico más preciso, y que tenga en cuenta

los valores de Tensión aplicados a la Fibra. En el [Anexo 4](#) se propone un dispositivo que permitiría instrumentar un tubo mientras se realiza el proceso de curado. Se podría de esta manera obtener datos de como evolucionan el perfil de **Deformaciones Residuales** y proponer un modelo que permita predecir las **Deformaciones Residuales**, y por tanto, las **Tensiones Residuales**.

7.7. Conclusiones acerca de las Tensiones Residuales.

En base a las **Deformaciones Residuales**, obtenidas según el procedimiento del [Capítulo 4.4](#), y evaluadas según los cálculos explicados en el [Capítulo 4.5](#), se obtienen las **Tensiones Residuales**, que está resumidas en la [Tabla 6.15](#). En la [Figura 7.9](#) se muestran estas tensiones, representadas también mediante gráficos de barras, en las que se observa una buena correspondencia entre el valor de las **Deformaciones Residuales** y las **Tensiones Residuales** para cada eje. Se observa que las **Tensiones Residuales** son menores en ángulos correspondientes a $\pm 45^\circ$. Esto es lógico, teniendo en cuenta que son las corridas con el ángulo más cercano a 55° , que es el ángulo teórico que trabaja a isotensión (con lo cuál debería tener pocas o ningunas **Tensiones Residuales** asociadas). Se observa también que la tendencia es que las corridas con capas circunferenciales (a 89°) tendían a ofrecer mayores **Tensiones Residuales**. Además, aquellas con mayores tensiones de fibra en el proceso tienen **Tensiones Residuales** aún mayores.

Corrida N°	Deformación residual [$\mu\epsilon \approx 10^{-6}\epsilon$]	$\sigma_y(a)$ [MPa]	$\sigma_y(b)$ [MPa]	$\sigma_z(\text{Centro})$ [MPa]
1	-297	-3,07E-05	3,00E-05	-2,57E-07
2	-503	-3,70E-05	3,62E-05	-2,70E-07
7A	-78	-4,89E-06	4,78E-06	-3,97E-08
7B	348,67	2,49E-05	-2,43E-05	2,19E-07
7C	-67,67	-4,67E-06	4,58E-06	-3,39E-08
8	-22	-1,02E-06	1,00E-06	-6,82E-09
11	-347	-1,01E-04	9,70E-05	-1,42E-06
12	-781	-1,96E-04	1,89E-04	-2,45E-06
13	-362	-1,74E-04	1,69E-04	-2,20E-06
14	-538	-4,97E-04	4,75E-04	-7,87E-06

Figura 7.9: Gráficos de comparación de Deformaciones y Tensiones Residuales.

7.8. Conclusiones finales.

En la siguiente **Tabla 7.12** se resumen las conclusiones generales del DOE llevado a cabo, en el cuál se sintetiza que respuesta se ve mas afectada según que factor. Los signos también denotan si al aumentar el valor de la Variable, el efecto sobre la Respuesta aumenta, o si al disminuir el valor de la Variable la Respuesta aumenta.

Conviene recalcar una vez más que se debería llevar a cabo un DOE con mayor resolución y menor aberración para que se confirmen o rechacen las conclusiones obtenidas en el presente trabajo. Es por ello que realizar 8 corridas más con la VARIABLE “Temperatura del mandril” en los estipulados 80°C sería recomendable para trabajos futuros. También se concluye que se debe estudiar un modelo termo-reológicamente de predicción de las **Deformaciones Residuales** junto con un método de obtención más preciso o on-line. Es por esto último que se propone el dispositivo del [Anexo 4](#).

Tabla 7.12: Resumen general del grado de influencias de los diversos Factores en las diferentes Respuestas estudiadas del DOE llevado a cabo.

Factor	% de Fibra	% de Resina	% de Poros	Carrera Máxima	Tensión Máxima	Deformaciones residuales
A=Tensión	+Alta	---	---	+Media	+Media	+Alta
B=Tiempo	---	---	---	+Alta	-Media	-Media
C=Dif. Angulo	---	---	-Media	+Alta	-Alta	-Alta
D=Grosor	---	---	---	-Alta	+Alta	+Alta
E=T° Batea	-Alta	---	+Alta	---	---	-Media
AB	---	---	-Alta	---	-Media	---
AC	---	---	---	+Media	---	-Media

Anexo 1: Ficha Técnica de la Resina

Tabla A1.1: Ficha Técnica de la Resina.

Resina	
Información del Producto	
Nombre comercial:	Resina Epoxi Formulación Kohlenia.
Uso:	Resina epoxi para laminación de materiales compuestos.
Composición	
Naturaleza química	
Resina epoxi a base de bisfenol A / epiclorhidrina y diluyente reactivo	
Resina epoxi a base de Bisfenol A 25085-99-8	
Propiedades físicas y químicas	
Estado físico:	Líquido
Color:	Ámbar
Olor:	Leve
Punto de inflamación:	Mayor a 130° C
Punto de ebullición:	Mayor a 200° C
Presión de vapor a 20° C:	Menor a 0,01 mm Hg
Densidad:	1,12-1,18 g/ cm ³ @20°C
Endurecedor	
Información del Producto	
Nombre comercial:	Endurecedor Formulación KOHLENIA®
Uso:	Endurecedor de resina epoxi para laminación de materiales compuestos
Composición	
Naturaleza química:	
Endurecedor de base amina	
Polyoxypropylenediamina 9046-10-0	
Propiedades físicas y químicas	
Estado físico:	Líquido
Color:	Ámbar claro
Olor:	Amoniacal
Punto de inflamación:	Mayor a 100° C
Punto de ebullición:	Mayor a 200° C
Temperatura de ignición:	Mayor a 200° C
Densidad:	0,95-1,00 g/ cm ³

Tabla A1.1: Ficha Técnica de la Resina (Continuación).

Formulación de epoxi KOHLENIA®	
Sistema epoxi de 2 componentes 100:33	
Aplicación:	Fabricación de piezas de materiales compuestos
Procesos:	Filament Winding, Infusión en vacío, RTM y laminación manual.
Descripción:	Resina epoxi con excelentes propiedades mecánicas, especialmente formulada para <i>filament winding</i> , infusión de partes grandes y otros procesos donde se requiera baja viscosidad y tiempo de proceso largo.
Características del sistema Resina:	
Color:	Transparente a ámbar claro
Viscosidad a 25°C:	9500 cPs
Densidad a 25°C:	1.16 g/cm ³
Endurecedor:	
Color:	Transparente a amarillo pálido
Viscosidad a 25°C:	9.5 cPs
Densidad a 25°C:	0.948 g/cm ³
Datos de proceso	
Relación de mezcla por peso:	100:33
Relación de mezcla por volumen:	100:40.4
Ciclo de cura sugerido:	
4 horas a 60°C, 2 horas a 80°C. Post-cura de 2 horas a 100°C	
Pot Life @25°C (40 mm, 100 ml)	300-360 min
Pico exotérmico (40 mm, 100 ml)	64°C
Viscosidad inicial de la mezcla	600 cPs
Tiempo de gelación @25°C	15 horas
Propiedades mecánicas y térmicas	
Densidad a 25°C:	1.12-1.16 g/cm ³
Dureza (Shore D/15):	85-90
Tg final (DSC):	90°C
Resistencia a flexión:	102 MPa
Módulo de flexión:	3.14 GPa
Resistencia a tracción:	67 MPa
Resistencia a impacto Izod:	7.08 cm-kJ/cm
Elongación a rotura:	10%
ILSS (ASTM 2344):	40 MPa

Anexo 2: Modelos Micromecánicos

El objetivo de este Anexo es poder calcular las diferentes constantes ingenieriles necesarias para realizar los cálculos requeridos en los diferentes modelos que se van realizar en el presente trabajo. Estas constantes ingenieriles del material compuesto resultante se calculan a partir de las propiedades de los materiales constituyentes (fibra y matriz) a través de modelos de la micromecánica.

Estos modelos de la micromecánica son muy variados y realizan diversas suposiciones, La bibliografía asociada a la micromecánica en general se puede consultar en las referencias: ([S. Nemat-Nasser & M. Hori, 1999](#)) y ([Toshio Mura, 1987](#)).

En todos los modelos micro-mecánicos el objetivo es determinar los módulos elásticos o flexibilidades de un material compuesto en términos de los módulos elásticos de los materiales constituyentes, y adicionalmente, propiedades térmicas, higrotérmicas, etc. Todo esto según sea el alcance del modelo, en base a sus suposiciones iniciales. Hay modelos, como los que están descriptos en Nemat-Nasser & M. Hori y Toshio Mura que se basan en supuestos puramente teóricos, pero hay otros métodos, que se describen por ejemplo en el trabajo de Lurie que tienen parámetros de ajustes experimentales ([A. I. Lurie, 2005](#)).

Un objetivo adicional y complementario de los enfoques micro-mecánicos para el análisis de materiales compuestos es determinar las resistencias del material compuesto en términos de las resistencias de los materiales constituyentes. Generalmente, para el cálculo de las constantes elásticas, térmicas e higrotérmicas se tiene un mayor éxito en cuanto a la aproximación a valores experimentales que para las propiedades de resistencia de los materiales. Sin embargo, para un diseño preliminar es suficiente su evaluación, mientras que las propiedades reales obtenidas mediante ensayos son mas costosas de (adquisición de materia prima, fabricación de probetas de ensayo, maquinaria e instalaciones apropiadas, horas hombre a profesional capacitado para operar los equipos, etc.) y requiere además mas tiempo (desde el almacenaje, tiempo de fabricación, tiempo de ensayo, procesamiento de datos, etc.). Por otra parte, el área de la micromecánica es un campo de investigación activo para los materiales compuestos, con lo cuál muchos modelos son publicados que van

ajustando el calculo de las propiedades mecánicas de los compuestos predichas versus las ensayadas.

En este trabajo se evaluarán dos modelos micromecánicos diferentes para las propiedades elásticas del material y un modelo para las propiedades térmicas. El volumen de fibra del material compuesto es la variable independiente de entrada para evaluar las fórmulas, con lo cual se determinó experimentalmente, para finalmente obtener las propiedades requeridas.

A.2.1 Consideraciones preliminares.

Es necesario nombrar por conveniencia ciertas definiciones que se usaran de aquí en más a lo largo del Anexo. En primer lugar, se deben definir los ejes coordenados mediante los cuales se definen los materiales compuestos. La definición de la dirección de los ejes de coordenadas locales del material siguen la convención común a toda la biografía relacionada con los materiales compuestos, como pueden ser las referencias de los trabajos de Barbero, Jones y Miravete entre otros ([Barbero, 2011](#); [Jones, 1999](#); [A. Miravete, 2007](#); [Barbero, 2014](#); [Ana María Monti, 1997](#)), las cuales definen dichas direcciones a partir de una lámina de un material compuesto reforzado unidireccionalmente:

- Eje 1:** dirección paralela a la fibra en el plano (o eje longitudinal).
- Eje 2:** dirección perpendicular a la fibra en el plano (o eje transversal).
- Eje 3:** dirección perpendicular a la fibra fuera del plano (o eje transversal en el espesor).

Estos ejes coordenados, definidos según la orientación de la fibra pueden diferir de un sistema coordenado del material (**Eje X, Eje Y, Eje Z**), para lo cual se hacen necesarias transformaciones de ejes de coordenadas, explicadas en la bibliografía especializada en el tema. En la **Figura A.2.1** se puede apreciar la convención utilizada. Arriba, a la izquierda, se tiene una sección representativa de un laminado compuesto. La dirección a lo largo de la fibra, va a ser la dirección longitudinal (**Eje 1**). La menor dimensión es en la dirección del espesor, perpendicular al laminado. El eje normal a esta cara es la dirección transversal en el espesor (**Eje 3**). Perpendicular a las dos direcciones está la dirección transversal (el **Eje 2**).

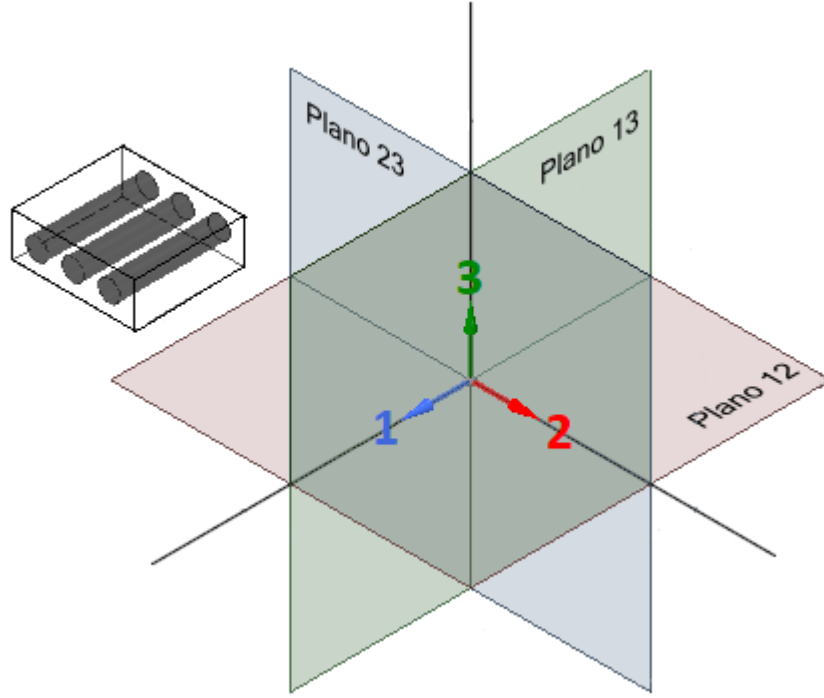


Figura A.2.1: Convención de las direcciones de los ejes coordenados locales para un Material ortotrópico (lámina reforzada con fibras unidireccionales).

Adoptado de (Barbero, 2011).

Definimos aquí también la matriz rigidez $[C]$, que relaciona las deformaciones con las tensiones aplicadas en un punto material del cuerpo, y la matriz flexibilidad $[S]$, que es la inversa de la matriz rigidez y relaciona las deformaciones con las tensiones. Las anotaciones de cada una y las convenciones asociadas a cada una de ellas están extensamente desarrolladas en la bibliografía citada anteriormente ([Barbero, 2011](#); [Jones, 1999](#); [A. Miravete, 2007](#); [Barbero, 2014](#); [Ana María Monti, 1997](#)). Se repiten aquí por conveniencia:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. A.2.1}$$

La notación reducida de la misma es :

$$\sigma_j = C_{ij}\varepsilon_i \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad \text{Ec. A.2.2}$$

Donde los coeficientes C_{ij} son los componentes de la matriz de rigidez, los σ_j son los componentes del vector de tensión y los componentes ε_i son los componentes del vector de deformaciones.

Definimos ahora la Matriz de Flexibilidad o de Compliancias:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. A.2.3}$$

La notación reducida de la misma es :

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad \text{Ec. A.2.4}$$

Donde los coeficientes S_{ij} son los componentes de la matriz de rigidez,

Las constantes ingenieriles para cálculos de resistencia mecánica a determinar suelen ser representados en la matriz de flexibilidad, ya que en ellas son más simples. Para la deducción de esta matriz, y como se llega a los diferentes coeficientes que existen en ella para materiales compuestos, existen numerosos ejemplos bibliográficos, tales como en los trabajos de Mura, Lurie, Barbero y Jones ([Toshio Mura, 1987](#); [A. I. Lurie, 2005](#); [Barbero, 2011](#); [Jones, 1999](#)).

Se presenta a continuación, cada una de estas constantes ingenieriles:

E₁: Módulo de Young en la dirección longitudinal.

E₂: Módulo de Young en la dirección transversal.

E₃: Módulo de Young en la dirección transversal en el espesor

G₁₂: Módulo de corte en el plano.

G₂₃; G₁₃: Módulo de corte interlaminar.

v₁₂: Relación de Poisson en el plano.

v₂₃; v₁₃: Relación de Poisson interlaminar.

Por conveniencia, se repite aquí la matriz flexibilidad, adoptada del trabajo de Barbero ([Barbero, 2014](#)):

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. A.2.5}$$

Esta es una matriz que tiene en cuenta 9 constantes independientes, las cuales son: E_1 , E_2 , E_3 , G_{23} , G_{13} , G_{12} , ν_{12} , ν_{13} y ν_{23} . Afortunadamente, haciendo suposiciones adicionales, se puede reducir aún más las constantes ingenieriles a determinar. Entonces:

$$E_3 = E_2 \quad \text{Ec. A.2.6}$$

$$\nu_{13} = \nu_{12} \quad \text{Ec. A.2.7}$$

$$G_{13} = G_{12} \quad \text{Ec. A.2.8}$$

Con lo cuál, solo van a ser necesarias solo 6 propiedades mecánicas, a determinar con los diferentes métodos de cálculo propuestos:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. A.2.9}$$

A.2.2 Modelos Micro-Mecánicos vs. Trabajo experimental.

Un análisis micromecánico tiene limitaciones significativas e inherentes. Por ejemplo, un enlace perfecto entre las fibras y la matriz es una restricción de análisis habitual que bien podría no ser satisfecha por algunos materiales compuestos. Un enlace imperfecto presumiblemente produciría un material con propiedades degradadas frente a las propiedades calculadas mediante un análisis micromecánico. Por lo tanto, las teorías micromecánicas deben ser validadas por un cuidadoso trabajo experimental. El poder de diseño real se demuestra cuando las predicciones micro-mecánicas de las propiedades de una lámina concuerdan con las propiedades medidas en un ensayo.

La mera existencia de diferentes rigideces predichas para diferentes matrices conduce a una observación física importante: las variaciones en la fabricación de materiales compuestos siempre producirán variaciones en la geometría de la matriz y, por lo tanto, en los módulos compuestos. Por lo tanto, no podemos esperar predecir los módulos compuestos con precisión. Es por esto que los modelos micro-mecánicos se basan siempre en supuestos simplificativos. Las suposiciones mas comunes en las diferentes propuestas de modelizaciones micro-mecánicas son:

- Homogeneidad del material estudiado: Los materiales compuestos, por definición, son materiales heterogéneos. El análisis mecánico procede asumiendo que el material es homogéneo. Este aparente conflicto se resuelve considerando la homogeneidad a escala microscópica y macroscópica. Microscópicamente, los materiales compuestos son ciertamente heterogéneos. Sin embargo, a escala macroscópica, parecen homogéneos y responden de manera homogénea cuando se prueban. El análisis de materiales compuestos utiliza propiedades efectivas que se basan en la tensión media y la deformación media.

- Ortotropía de los materiales estudiados: La ortotropía es la condición expresada por la variación de las propiedades mecánicas en función de la orientación. La lámina exhibe ortotropía como la gran diferencia de propiedades entre las direcciones de 0° y 90° . Si un material es ortótropo, contiene planos de simetría y puede caracterizarse por cuatro constantes elásticas independientes.

- Linealidad del material estudiado: Algunas propiedades de los materiales compuestos no son lineales (el ejemplo más común es el de la curva del módulo de corte). La cantidad de no linealidad depende de la propiedad, el tipo de muestra y el entorno de prueba. Las curvas de tensión-deformación de los materiales compuestos se suponen lineales para simplificar el análisis.
- Tensiones residuales: Una consecuencia de la heterogeneidad microscópica de un material compuesto es el desajuste de expansión térmica entre la fibra y la matriz. Este desajuste provoca TR en la lámina después del curado. A menudo se supone que las TR correspondientes no afectan la rigidez del material o su capacidad para deformarse uniformemente.
- No existencia de vacíos: Esto es $V_f + V_m = 1$.

A.2.3 Modelo Micro-mecánico de la Regla de las mezclas.

Las fórmulas de la micromecánica de la llamada “Regla de las mezclas” (RM) son las formulas de micromecánica de las mas populares en todos los libros de texto de materiales compuestos, ya que permiten una rápida introducción en el tema, son sencillas (tanto en la expresión matemática como en su deducción), y permite obtener algunas conclusiones bastante explicativas del comportamiento mecánico de los materiales compuestos reforzados con fibra. También predicen los valores de las principales constantes ingenieriles con la que los libros de texto desarrollan, la llamada “Teoría Clásica de los laminados” (TCL), la cuál, mediante suposiciones básicas predice el comportamiento mecánico de los materiales compuestos en base solo a las constantes ingenieriles E_1 , E_2 , ν_{12} y G_{12} (propiedades de la lamina “en el plano”). Lo poderoso de esta teoría es que permite obtener soluciones aproximadas para diferentes configuraciones de laminado y muchos problemas de ingeniería sencillos.

Sin más preámbulos, se presentan las formulas de las Regla de las mezclas, tanto en su forma directa (para predecir E_1 y ν_{12}), como en su forma inversa (predicción de los módulos E_2 y G_{12}).

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad \text{Ec. A.2.10}$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad \text{Ec. A.2.11}$$

$$E_2 = \left[\frac{(1 - V_f)}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \right]^{-1} \quad \text{Ec. A.2.12}$$

$$G_{12} = \left[\frac{(1 - V_f)}{G_m} + \frac{V_f}{G_f} \right]^{-1} \quad \text{Ec. A.2.13}$$

donde E_f y E_m son los módulos de Young de la fibra y de la matriz respectivamente; V_f es el porcentaje relativo de fibra; v_f y v_m son las relaciones de Poisson relativas a la fibra y a la matriz respectivamente; y finalmente G_f y G_m son los módulos de corte de la fibra y de la matriz respectivamente.

Se deduce, por ejemplo en los trabajos de Lurie y Barbero ([A. I. Lurie, 2005](#); [Barbero, 2011](#)) que E_1 es una propiedad dominada por las fibras, E_2 y G_{12} está dominada por la matriz, y v_{12} es indiferente (ya que los valores de las relaciones de Poisson de las fibras y resinas comerciales son bastante cercanos).

La regla de las mezclas no ofrece por si sola un valor de calculo para el modulo elástico de corte fuera del plano G_{23} , pero se puede obtener mediante un cálculo simple mediante la Técnica del Parámetro de Partición de Tensiones semi-empírico. Véase referencia por ejemplo Barbero ([Barbero, 2011](#)):

$$G_{23} = G_m \frac{V_f + \eta_4(1 - V_f)}{\eta_4(1 - V_f) + V_f \frac{G_m}{G_f}} \quad \text{Ec. A.2.14}$$

En donde:

$$\eta_4 = \frac{3 - 4v_m + \frac{G_m}{G_f}}{4(1 - v_m)} \quad \text{Ec. A.2.15}$$

Para calcular v_{23} existe una conocida relación, la cual es:

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + v_{23})} \Rightarrow v_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1 \quad \text{Ec. A.2.16}$$

A.2.4 Modelo Micro-mecánico de la Microestructura periódica (MMP).

Este es un modelo desarrollado por los investigadores Barbero y Luciano. A diferencia de los anteriores modelos, predice por si solo todos los módulos correspondientes a todos los coeficientes de la matriz de rigidez C_{ij} . Para obtener los módulos E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} , G_{23} y ν_{23} en necesario invertir la matriz de rigidez C_{ij} , para así obtener los coeficientes de la matriz de flexibilidad S_{ij} . Finalmente, haciendo unas operaciones sencillas, se obtienen las constantes ingenieriles mecánicas. Los fundamentos y suposiciones hechas en el modelo se pueden encontrar en el trabajo de Barbero y Luciano ([Barbero, E. J. y Luciano, 1995](#)). Las fórmulas involucradas en los cálculos son considerablemente más complicadas que en los anteriores modelos, y se presentan a continuación.

En primer lugar, se calculan las constantes de Lamé de la matriz (la definición formal de las constantes de Lamé se pueden ver en las referencias de Lurie y Ana María Monti ([A. I. Lurie, 2005](#); [Ana María Monti, 1997](#))):

$$\lambda_m = \frac{E_m \nu_m}{(1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)} \quad \text{Ec. A.2.17}$$

$$\mu_m = G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad \text{Ec. A.2.18}$$

Luego el parámetro Δ (delta):

$$\Delta = \frac{1 - 2\nu_A^2 \frac{E_T}{E_A} - \nu_T^2 - 2\nu_A^2 \nu_T \frac{E_T}{E_A}}{E_A E_T^2} \quad \text{Ec. A.2.19}$$

Seguidamente un conjunto de contantes C' relacionados con los coeficientes de la matriz rigidez:

$$C'_{11} = \frac{1 - \nu_T^2}{E_T^2 \Delta} \quad \text{Ec. A.2.20}$$

$$C'_{22} = C'_{33} = \frac{1 - \nu_A^2 \frac{E_T}{E_A}}{E_A E_T \Delta} \quad \text{Ec. A.2.21}$$

$$C'_{12} = C'_{13} = \frac{v_A \frac{E_T}{E_A} + v_A v_T \frac{E_T}{E_A}}{E_T^2 \Delta} \quad \text{Ec. A.2.22}$$

$$C'_{23} = \frac{v_T + v_A^2 \frac{E_T}{E_A}}{E_A E_T \Delta} \quad \text{Ec. A.2.23}$$

$$C'_{44} = G_T = \frac{E_T}{2(1 + v_T)} = \frac{(C'_{22} - C'_{23})}{2} \quad \text{Ec. A.2.24}$$

$$C'_{55} = C'_{66} = G_A \quad \text{Ec. A.2.25}$$

Hasta ahora, ninguno de los valores calculados, estaba relacionado con el volumen de fibra del compuesto. Los coeficientes s_3 , s_6 y s_7 son los que varían según la fracción del volumen de fibra:

$$s_3 = 0.49247 - 0.47603V_f - 0.02748V_f^2 \quad \text{Ec. A.2.26}$$

$$s_6 = 0.36844 - 0.14944V_f - 0.27152V_f^2 \quad \text{Ec. A.2.27}$$

$$s_7 = 0.12346 - 0.32035V_f - 0.23517V_f^2 \quad \text{Ec. A.2.28}$$

Para la siguiente parte del calculo, se trabaja con los valores obtenidos de las **Ecuaciones A.2.17 a A.2.25**. Los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 y a_4 se calculan como:

$$\begin{aligned} a_1 = & 4\mu_m^2 - 2\mu_m C'_{33} + 6\lambda_m \mu_m - 2C'_{11} \mu_m - 2\mu_m C'_{23} + C'_{23} C'_{11} \\ & + 4\lambda_m C'_{12} - 2C'^2_{12} - \lambda_m C'_{33} - 2C'_{11} \lambda_m + C'_{11} C'_{33} \\ & - \lambda_m C'_{23} \end{aligned} \quad \text{Ec. A.2.29}$$

$$\begin{aligned} a_2 = & 8\mu_m^3 - 8\mu_m^2 C'_{33} + 12\mu_m^2 \lambda_m - 4\mu_m^2 C'_{11} \\ & - 2\mu_m C'^2_{23} + 4\mu_m \lambda_m C'_{23} + 4\mu_m C'_{11} C'_{33} \\ & - 8\mu_m \lambda_m C'_{33} - 4\mu_m C'^2_{12} + 2\mu_m C'^2_{33} - 4\mu_m \lambda_m C'_{11} + 8\mu_m \lambda_m C'_{12} \\ & + 2\lambda_m C'_{11} C'_{33} + 4\lambda_m C'_{12} C'_{23} - 4\lambda_m C'_{12} C'_{33} - 2\lambda_m C'_{11} C'_{23} \\ & - 2C'_{23} C'^2_{12} + C'^2_{23} C'_{11} + 2C'_{33} C'^2_{12} - C'_{11} C'^2_{33} + \lambda_m C'^2_{33} - \lambda_m C'^2_{23} \end{aligned} \quad \text{Ec. A.2.30}$$

$$\begin{aligned}
& a_3 \\
& = \frac{4\mu_m^2 + 4\lambda_m\mu_m - 2C'_{11}\mu_m - 2C'_{33}\mu_m - C'_{11}\lambda_m - C'_{33}\lambda_m - C'^2_{12}}{a_2} \\
& + \frac{C'_{11}C'_{33} + 2\lambda_mC'_{12}}{a_2} - \frac{s_3 - \frac{s_6}{2 - 2v_m}}{\mu_m}
\end{aligned} \tag{Ec. A.2.31}$$

$$\begin{aligned}
& a_4 \\
& = \frac{-2\mu_mC'_{23} + 2\lambda_m\mu_m - \lambda_mC'_{23} - C'_{11}\lambda_m - C'^2_{12} + 2\lambda_mC'_{12} + C'_{11}C'_{23}}{a_2} \\
& + \frac{s_7}{\mu_m(2 - 2v_m)}
\end{aligned} \tag{Ec. A.2.32}$$

Acto seguido, se llega a unos coeficientes C*:

$$\begin{aligned}
& C_{11}^* = \lambda_m + 2\mu_m - V_f(-a_4^2 + a_3^2)^* \\
& \left[\frac{1}{\frac{(2\mu_m + 2\lambda_m - C'_{33} - C'_{23})(a_4^2 - a_3^2)}{a_1} + \frac{2(a_4 - a_3)(\lambda_m - C'_{12})^2}{a_1^2}} \right]
\end{aligned} \tag{Ec. A.2.33}$$

$$\begin{aligned}
& C_{12}^* = \lambda_m + V_f \left[\frac{(\lambda_m - C'_{12})(a_4 - a_3)}{a_1} \right] \\
& \left[\frac{1}{\frac{(2\mu_m + 2\lambda_m - C'_{33} - C'_{23})(a_3^2 + a_4^2)}{a_1} + \frac{2(a_4 - a_3)(\lambda_m - C'_{12})^2}{a_1^2}} \right]
\end{aligned} \tag{Ec. A.2.34}$$

$$\begin{aligned}
& C_{22}^* = \lambda_m + 2\mu_m \\
& - V_f \left[\frac{(2\mu_m + 2\lambda_m - C'_{33} - C'_{23})a_3}{a_1} - \frac{(\lambda_m - C'_{12})^2}{a_1^2} \right] \\
& \left[\frac{1}{\frac{(2\mu_m + 2\lambda_m - C'_{33} - C'_{23})(a_3^2 - a_4^2)}{a_1} + \frac{2(a_4 - a_3)(\lambda_m - C'_{12})^2}{a_1^2}} \right]
\end{aligned} \tag{Ec. A.2.35}$$

$$C_{23}^* = \lambda_m + V_f \left[\frac{(2\mu_m + 2\lambda_m - C'_{33} - C'_{23})a_4}{a_1} - \frac{(\lambda_m - C'_{12})^2}{a_1^2} \right]$$

$$\left[\frac{1}{\frac{(2\mu_m + 2\lambda_m - C'_{33} - C'_{23})(a_3^2 - a_4^2)}{a_1} + \frac{2(a_4 - a_3)(\lambda_m - C'_{12})^2}{a_1^2}} \right] \quad \text{Ec. A.2.36}$$

$$C_{44}^* = \mu_m - \frac{V_f}{\left[\frac{2}{2\mu_m - C'_{22} + C'_{23}} - \frac{\left(2s_3 - \frac{4s_7}{2 - 2v_m}\right)}{\mu_m} \right]} \quad \text{Ec. A.2.37}$$

$$C_{66}^* = \mu_m - \frac{V_f}{\left[\frac{1}{(\mu_m - C'_{66})} - \frac{s_3}{\mu_m} \right]} \quad \text{Ec. A.2.38}$$

Y finalmente, relaciona los coeficientes C^* con las constantes de la matriz rigidez C_{ij} :

$$C_{11} = C_{11}^* \quad \text{Ec. A.2.39}$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{12}^* \quad \text{Ec. A.2.40}$$

$$C_{22} = C_{33} = \frac{3}{4}C_{22}^* + \frac{1}{4}C_{23}^* + \frac{1}{4}C_{44}^* \quad \text{Ec. A.2.41}$$

$$C_{23} = \frac{1}{4}C_{22}^* + \frac{3}{4}C_{23}^* - \frac{1}{4}C_{44}^* \quad \text{Ec. A.2.42}$$

$$C_{44} = C_{44}^* = \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) \quad \text{Ec. A.2.43}$$

$$C_{55} = C_{66} = C_{66}^* \quad \text{Ec. A.2.44}$$

Invirtiendo la matriz rigidez C_{ij} se obtiene la matriz flexibilidad S_{ij} y finalmente se obtienen las constantes ingenieriles:

$$E_1 = \frac{1}{S_{11}} \quad \text{Ec. A.2.45}$$

$$E_2 = E_3 = \frac{1}{S_{22}} \quad \text{Ec. A.2.46}$$

$$v_{12} = v_{13} = -\frac{S_{21}}{S_{11}} \quad \text{Ec. A.2.47}$$

$$v_{23} = -\frac{S_{32}}{S_{32}} \quad \text{Ec. A.2.48}$$

$$G_{12} = G_{13} = \frac{1}{S_{55}} \quad \text{Ec. A.2.49}$$

$$G_{23} = \frac{1}{S_{44}} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \quad \text{Ec. A.2.50}$$

A.2.6 Cálculo de los Modelos Micromecánicos mediante Visual Basic.

En primer lugar, para habilitar la ejecución de códigos de Visual Basic en el presente documento, tenemos que tener habilitada para que puedan ejecutarse macros en Word®:

- 1- Ir a la pestaña "Archivo" en la parte superior izquierda de la ventana.
- 2- Seleccionar "Opciones" en el menú que se despliega. Esto abrirá el cuadro de diálogo "Opciones de Word".
- 3- En el cuadro de diálogo "Opciones de Word", selecciona "Centro de confianza" en el panel izquierdo.
- 4- Haz clic en el botón "Configuración del Centro de confianza" en el panel derecho. Esto abrirá el cuadro de diálogo "Opciones de seguridad del Centro de confianza".
- 5- En el cuadro de diálogo "Opciones de seguridad del Centro de confianza", seleccionar "Configuración de macros" en el panel izquierdo.
- 6- Aquí se tienen varias opciones para habilitar las macros. Se puede elegir entre las siguientes opciones:

- "No habilitar ninguna macro, pero notificarme": Esta opción deshabilitará las macros, pero te mostrará una notificación cuando intentes abrir un documento con macros.
- "Advertirme antes de habilitar contenido de macros": Esta opción mostrará una advertencia antes de habilitar las macros en un documento.
- "Habilitar todas las macros": Esta opción permitirá que todas las macros se ejecuten sin restricciones.

Se debe elegir esta última. Se cierra este documento y se abre de nuevo (esto es si no teníamos habilitadas las macros en Word anteriormente).

Una vez que se selecciona la opción deseada, se debe hacer clic en "Aceptar" para cerrar el cuadro de diálogo "Opciones de seguridad del Centro de confianza".

Finalmente, se debe hacer clic en "Aceptar" en el cuadro de diálogo "Opciones de Word" para aplicar los cambios. Ahora las macros deberían estar habilitadas en este documento de Word.

Si el evaluador quiere ver el código que hay detrás de la ejecución de estas macros, debe habilitar las opciones de desarrollador con las que cuenta Word, que no están instaladas por defecto.

- a. Hacer clic en la pestaña "Archivo" en la esquina superior izquierda.
- b. Seleccionar "Opciones" en el menú que aparece. Esto abrirá el cuadro de diálogo "Opciones de Word".
- c. En el cuadro de diálogo "Opciones de Word", selecciona "Personalizar cinta de opciones" en el panel izquierdo.
- d. En el lado derecho del cuadro de diálogo, se encuentra una lista de pestañas. Marcar la casilla junto a "Desarrollador".
- e. Hacer clic en "Aceptar" para aplicar los cambios.
- f. En la nueva pestaña que ahora se puede visualizar, hacer clic en el botón a la izquierda de todo llamado "Visual Basic". Véase [Figura A.2.2](#).
- g. Ahora se tiene acceso a los códigos de los formularios que se utilizaron para realizar los cálculos de las propiedades en este trabajo. Véase [Figura A.2.3](#).

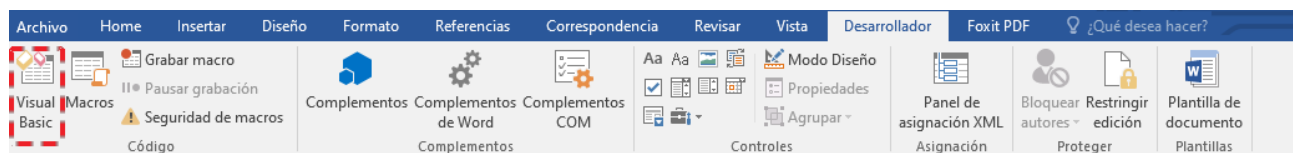


Figura A.2.2: Pestaña de "Desarrollador" en Visual Basic.

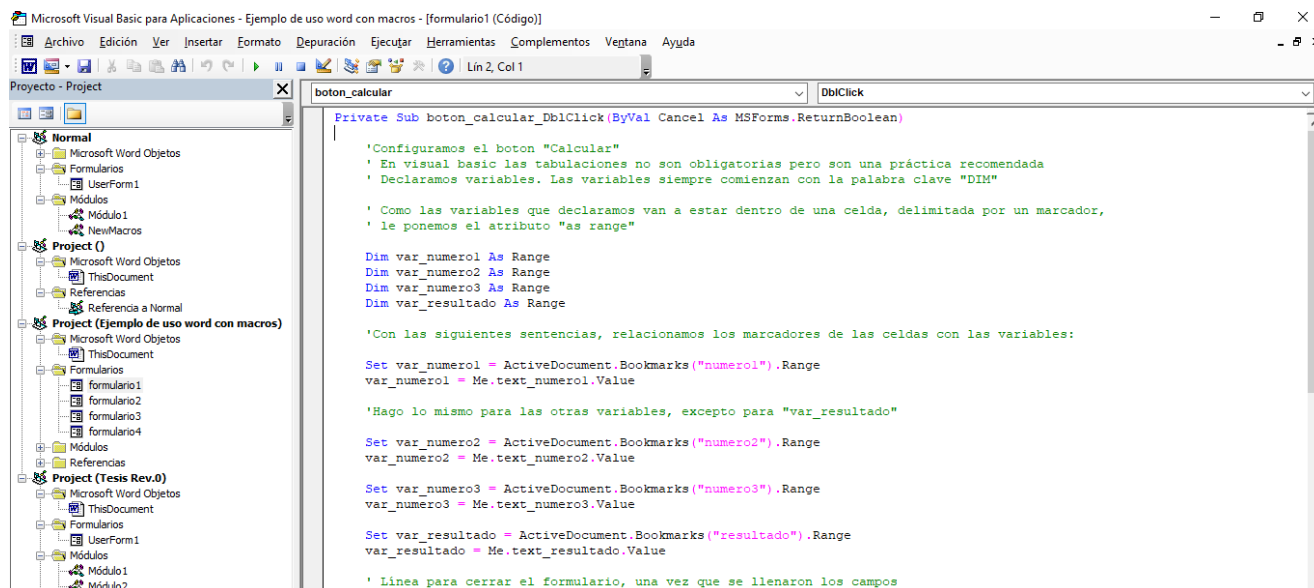


Figura A.2.3: Acceso a los códigos utilizados en este proyecto utilizando Formularios avanzados de Word y Visual Basic.

A.2.6.1 Datos de Entrada para la evaluación de los modelos RM y MMP.

El resumen siguiente, son los datos de entrada, de acuerdo a las propiedades de la fibra y de la matriz de este trabajo que se encuentran resumidas en las Tablas del [Capítulo 2](#) ([Tablas 2.1](#) y [Tablas 2.3](#)). Se resumen en la [Tabla A.2.1](#) por conveniencia.

Tabla A.2.1: Datos de Entrada.

Propiedad mecánica de elasticidad	Símbolo	Valor	Unidad
Modulo de Young longitudinal FC	E_{fA}	239,4	GPa
Modulo de Young transversal FC	E_{fT}	13	GPa
Relación de Poisson longitudinal FC	ν_{fA}	0,47	---
Relación de Poisson transversal FC	ν_{fT}	0,17	---
Modulo de Corte longitudinal FC	G_{fA}	45,4	GPa
Modulo de Corte transversal FC	G_{fT}	5,6	GPa
Modulo de Young de la Matriz	E_m	3,4	GPa
Relación de Poisson de la Matriz	ν_m	0,31	---

A.2.6.2 Evaluación de la Regla de las Mezclas (RM) mediante Visual Basic.

A continuación se evaluarán las Fórmulas de la Micro-Mecánica establecidas en el [Anexo A.2.3: Modelo Micro-mecánico de la Regla de las mezclas](#).

En la siguiente tabla se encuentran los valores calculados para calcular las constantes ingenieriles mediante la RM.:

Cálculo de constantes ingenieriles mediante la Regla de las Mezclas (RM):

Módulo Longitudinal RM: E_1	
Módulo Transversal RM: E_2	
Relación de Poisson en el plano RM: ν_{12}	
Módulo de corte en el Plano RM: G_{12}	
Módulo de corte interlaminar RM: G_{13}	
Módulo de corte fuera del plano RM: G_{23}	
Relación de Poisson interlaminar RM: ν_{13}	
Relación de Poisson fuera del plano RM: ν_{23}	

El siguiente Botón (doble click) realiza todos los cálculos de las definiciones adoptadas en la sección relativa a la Regla de las Mezclas ([Anexo A.2.3](#)):



A.2.6.3 Modelo de la Microestructura Periódica (MMP).

A continuación se evaluarán las Fórmulas de la Micro-Mecánica establecidas en el [Anexo A.2.4: Modelo Micro-mecánico de la Microestructura Periódica](#).

En la siguiente tabla se encuentran los valores calculados para calcular las constantes ingenieriles mediante la MMP:

Cálculo de constantes ingenieriles mediante el Modelo de la Microestructura Periódica (MMP):

Módulo Longitudinal MMP: E_1	
Módulo Transversal MMP: E_2	
Relación de Poisson en el plano MMP: ν_{12}	
Módulo de corte en el Plano MMP: G_{12}	
Módulo de corte interlaminar MMP: G_{13}	
Módulo de corte fuera del plano MMP: G_{23}	
Relación de Poisson interlaminar MMP: ν_{13}	
Relación de Poisson fuera del plano MMP: ν_{23}	

El siguiente Botón realiza todos los cálculos de las definiciones adoptadas en la sección del Anexo 2 relativa al Modelo de la Microestructura Periódica ([Anexo A.2.4](#)):

**Calcular
Expresiones del
MMP**

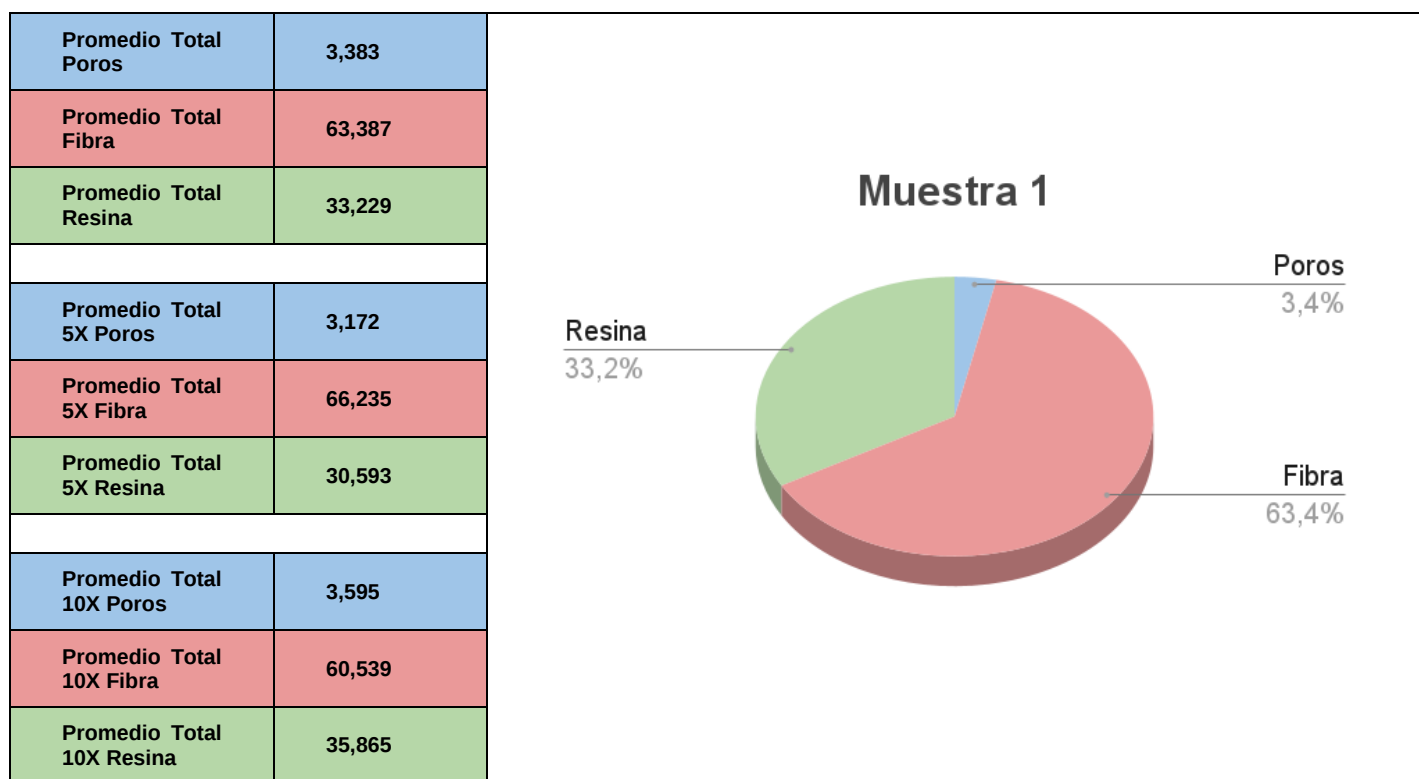
Anexo 3: Resumen del Análisis mediante Micrografías

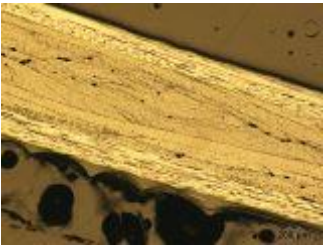
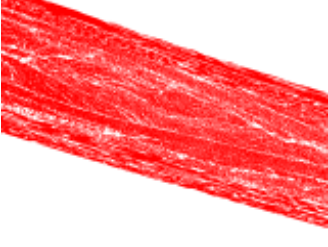
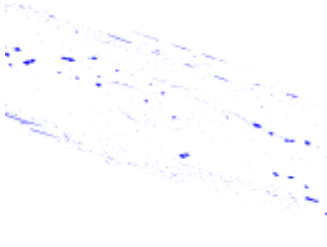
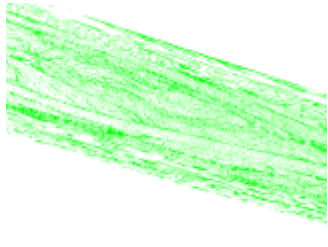
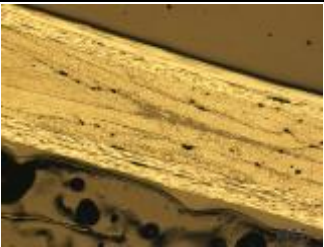
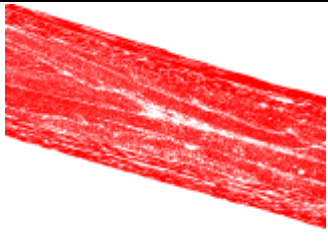
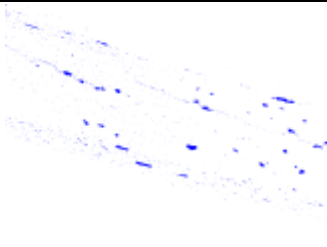
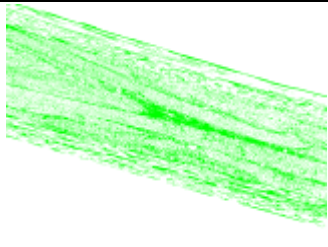
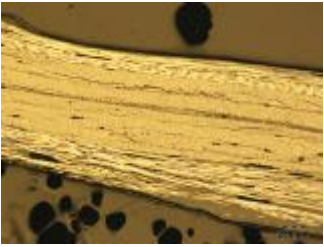
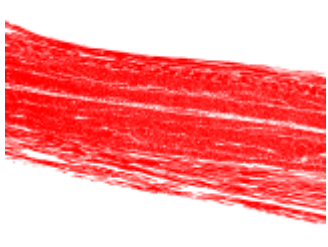
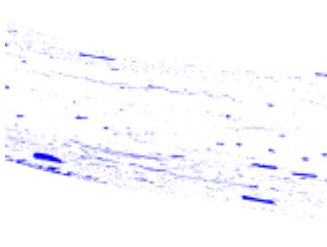
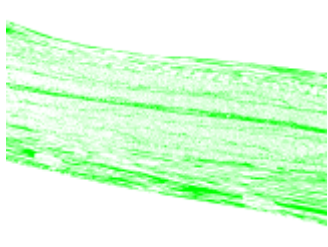
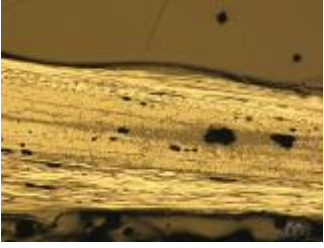
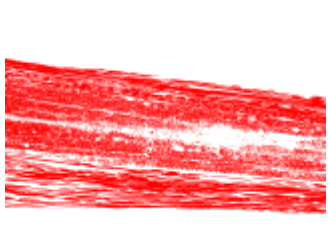
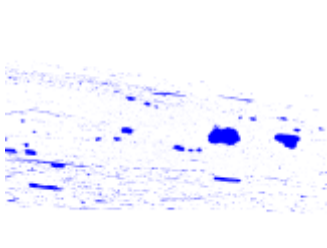
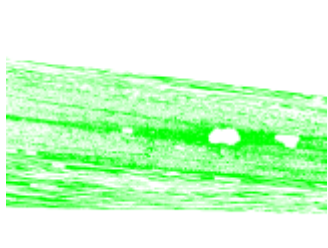
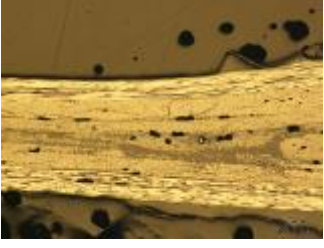
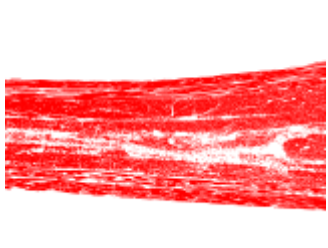
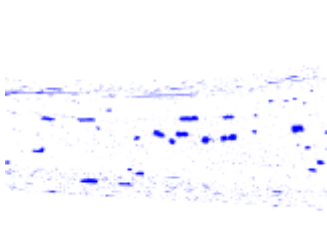
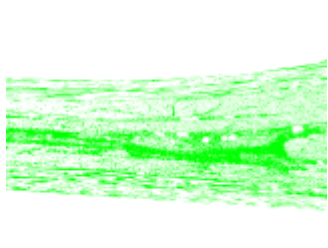
A continuación, se presentan cada una de las micrografías de 5X y de 10X que se utilizaron para realizar el cálculo del porcentaje de fibra, resina y poros. Los pixeles correspondientes a las fibras, poros y resinas están coloreados en rojo, azul y verde respectivamente

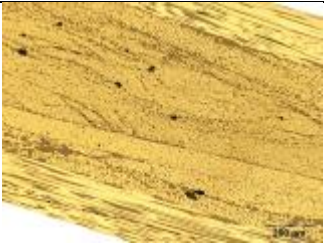
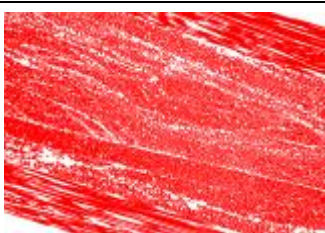
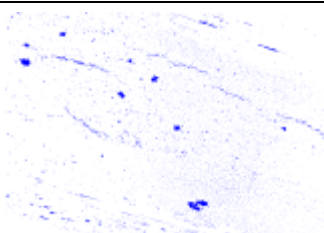
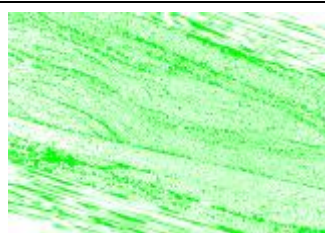
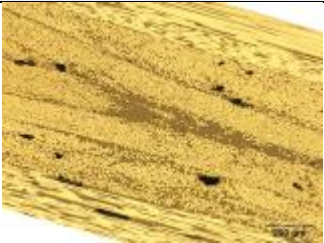
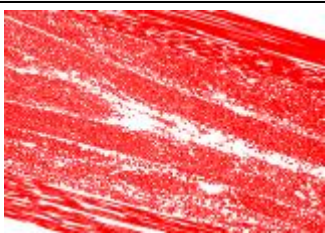
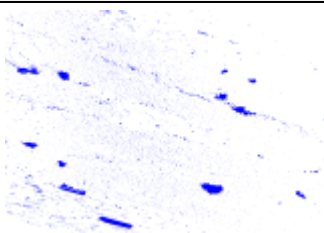
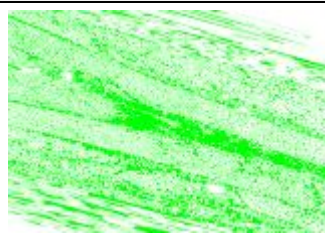
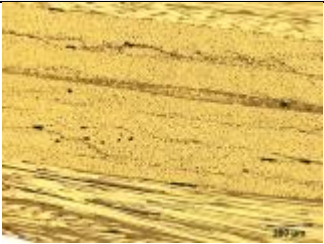
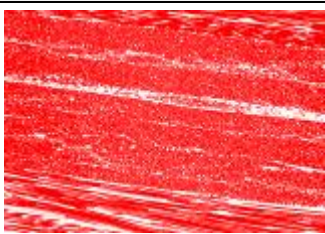
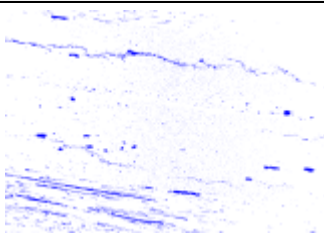
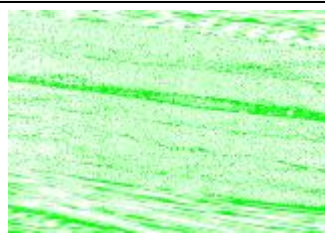
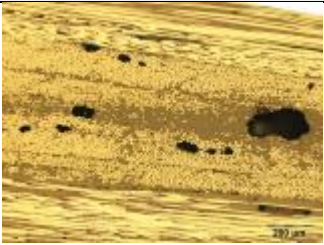
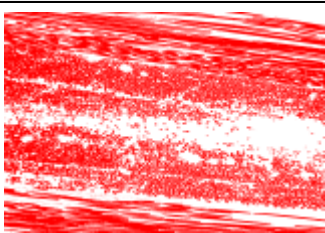
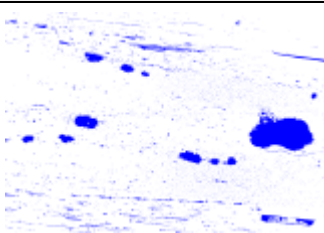
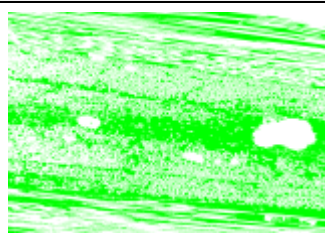
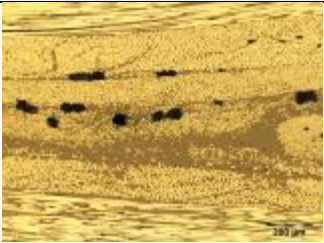
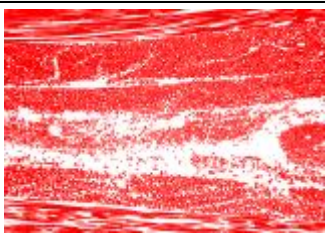
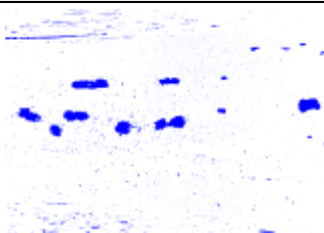
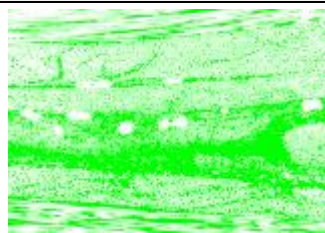
A.3.1 Micrografías pertenecientes a la Corrida 1.

Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

Tabla A.3.1: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 1.

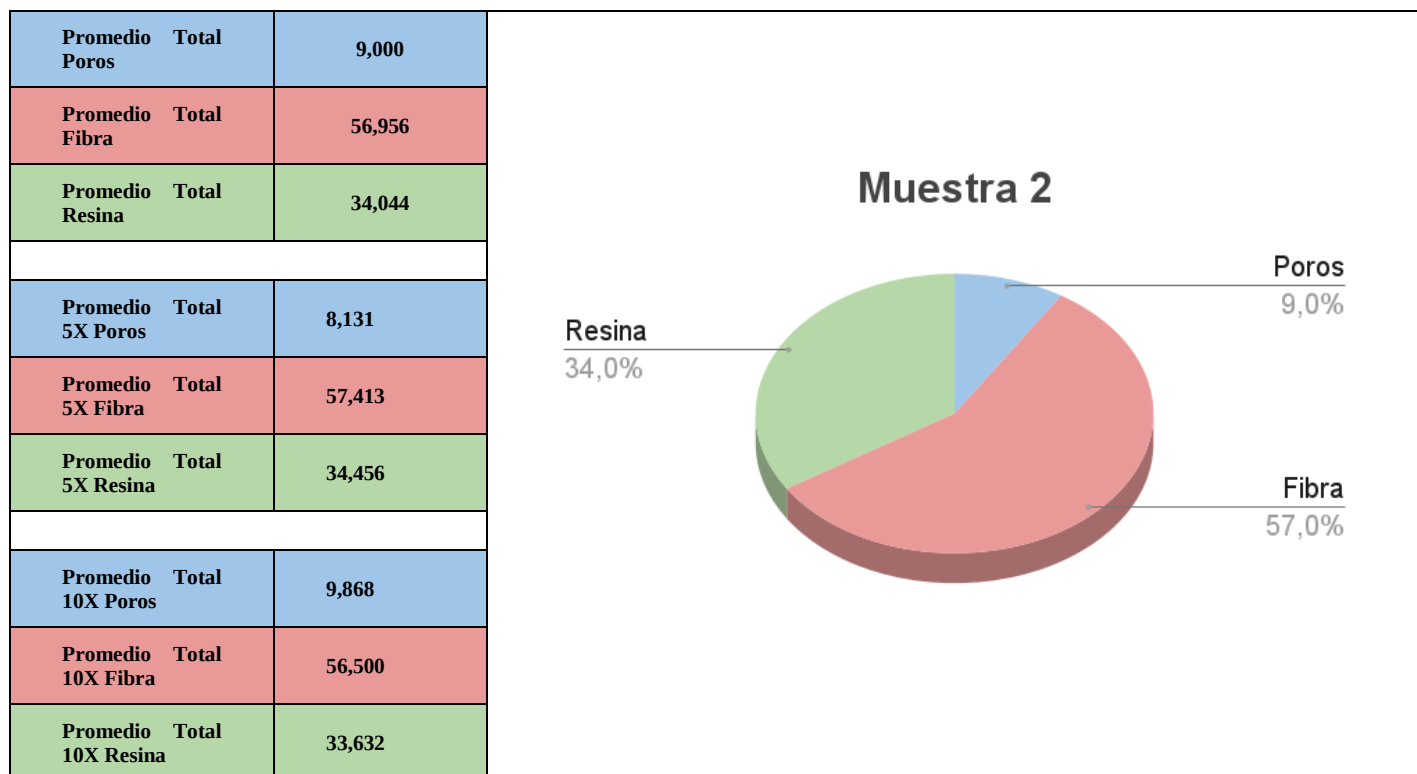


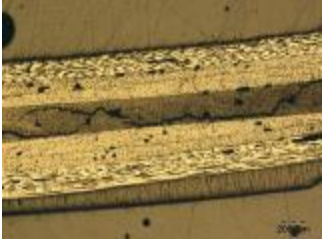
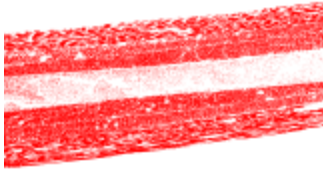
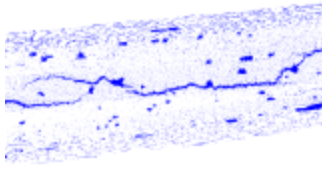
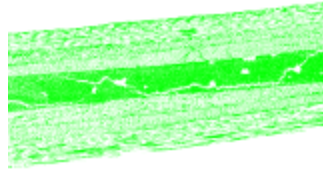
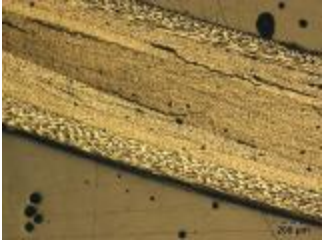
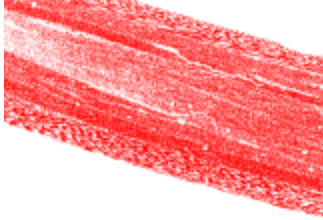
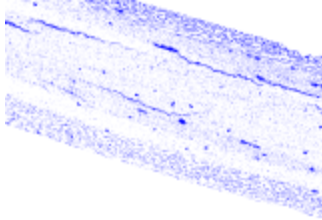
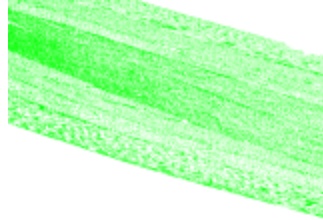
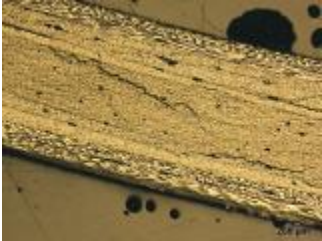
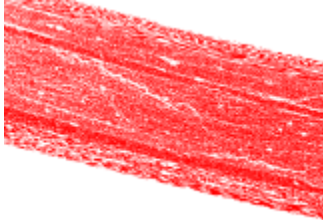
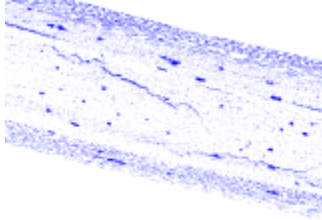
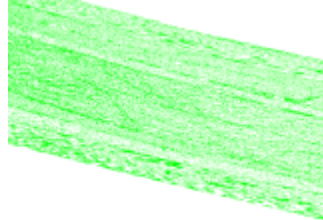
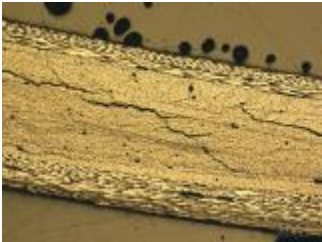
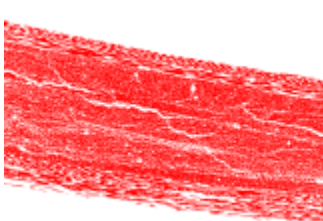
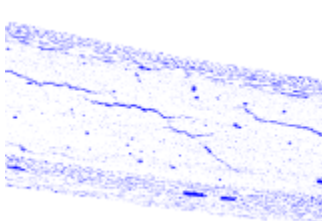
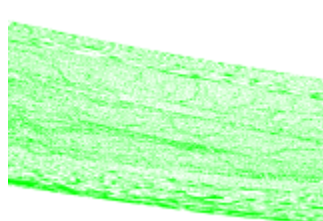
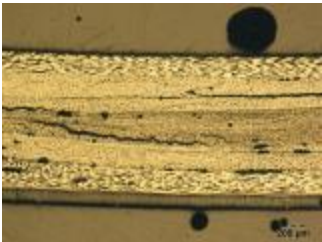
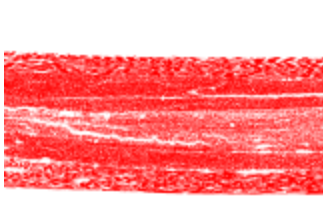
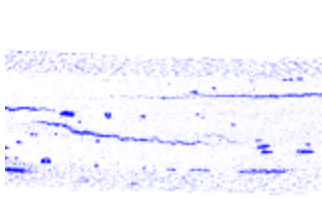
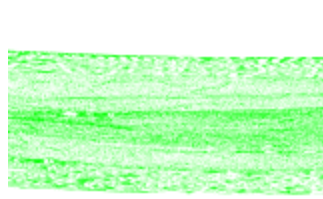
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
1_5X_1	71,589	1,351	27,060
			
1_5X_2	68,035	1,520	30,445
			
1_5X_3	71,589	1,351	27,060
			
1_5X_4	71,589	1,351	27,060
			
1_5X_5	71,589	1,351	27,060

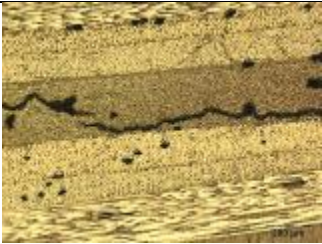
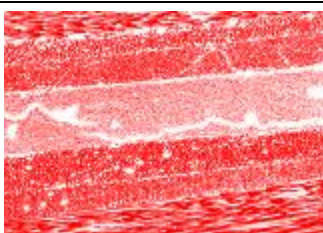
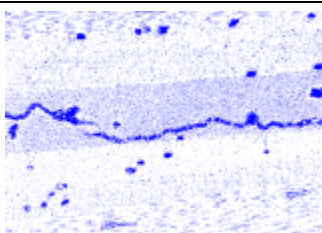
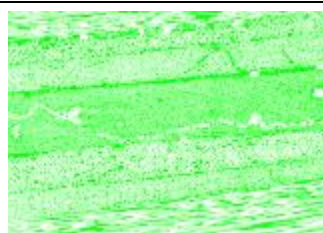
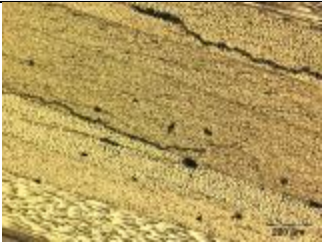
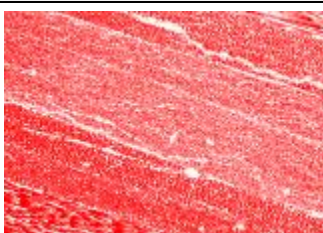
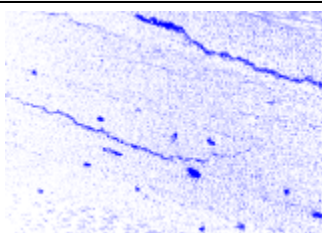
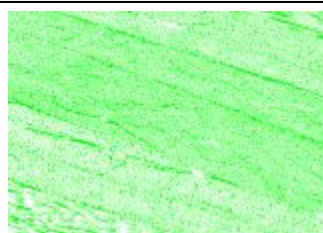
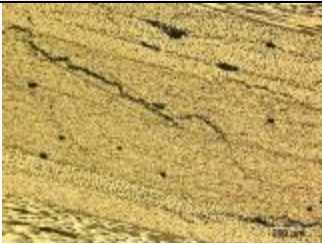
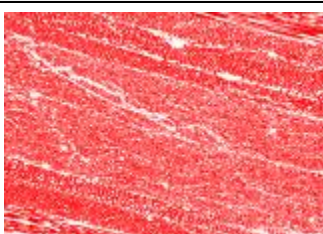
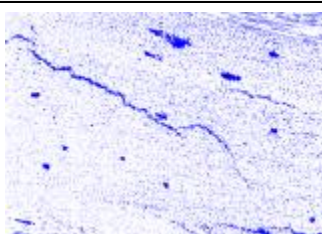
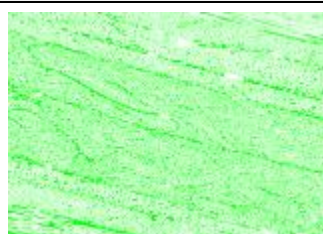
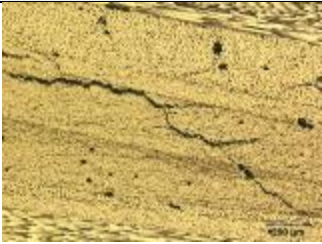
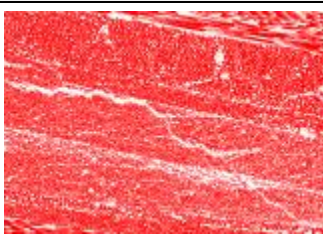
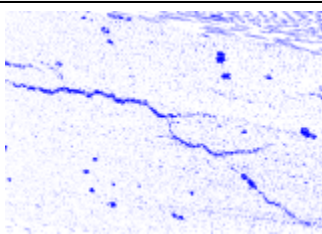
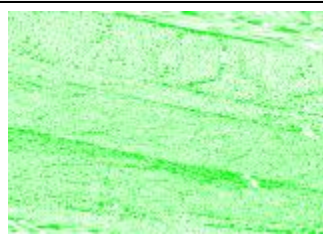
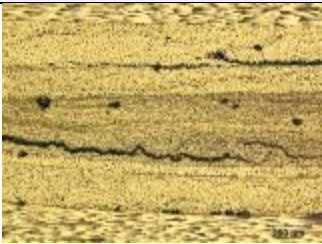
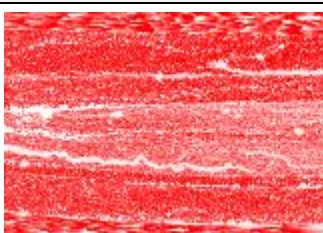
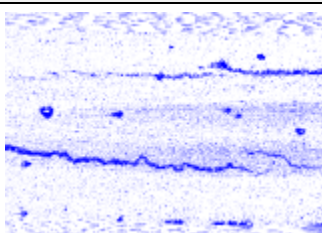
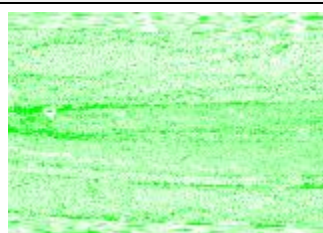
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
1_10X_1	66,332	2,256	31,411
			
1_10X_2	61,753	2,960	35,286
			
1_10X_3	70,443	3,016	26,540
			
1_10X_4	53,457	3,566	42,977
			
1_10X_5	50,712	6,177	43,112

A.3.2 Micrografías pertenecientes a la Corrida 2.

Tabla A.3.2: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 2.



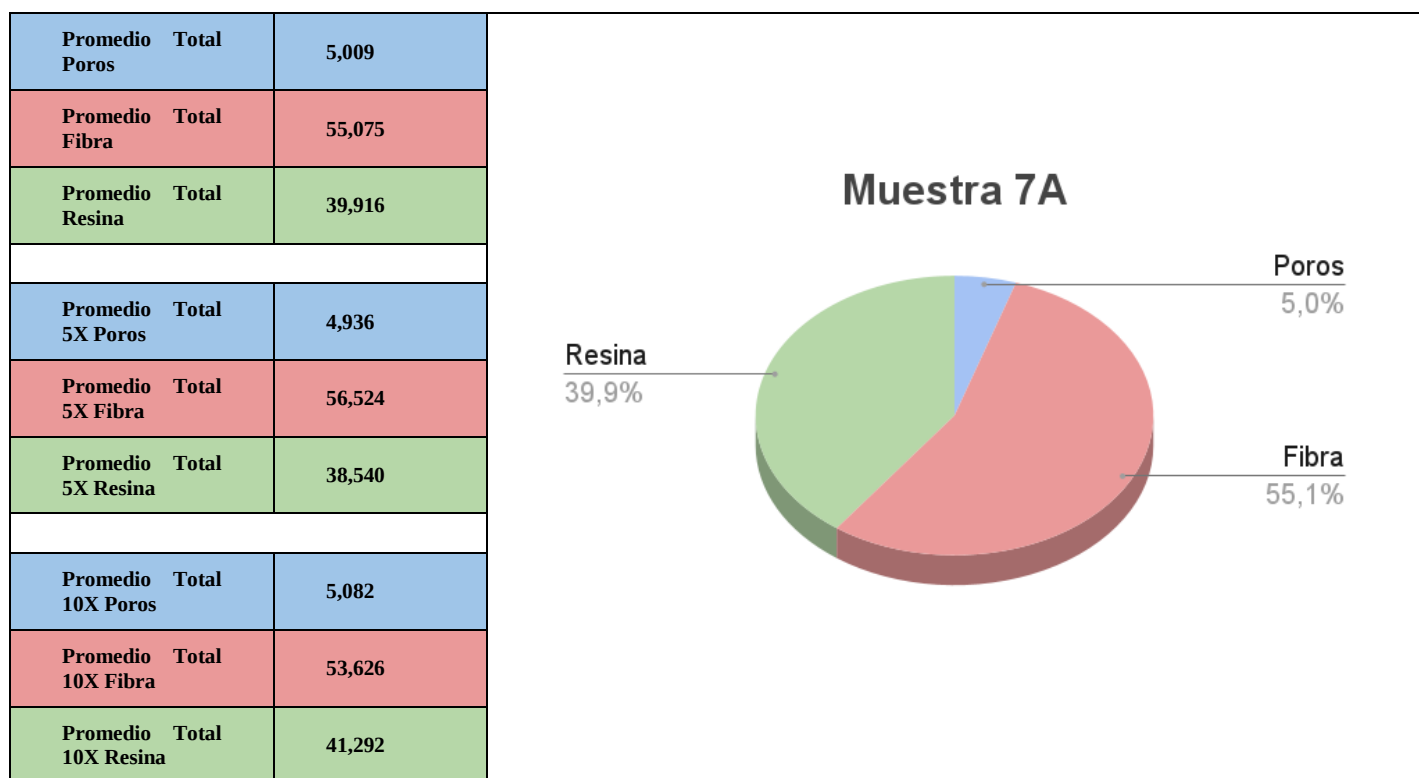
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
2_5X_1	48,746	9,845	41,408
			
2_5X_2	53,805	9,444	36,751
			
2_5X_3	58,933	8,567	32,499
			
2_5X_4	62,238	6,886	30,876
			
2_5X_5	63,340	5,915	30,744

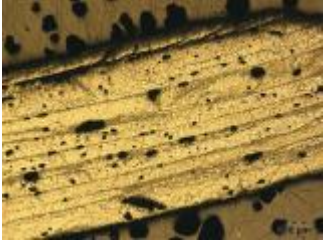
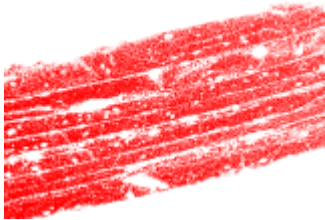
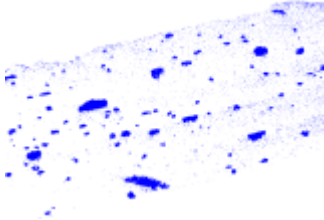
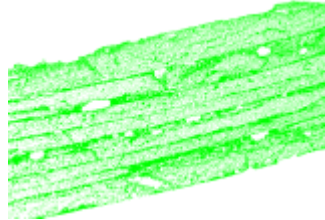
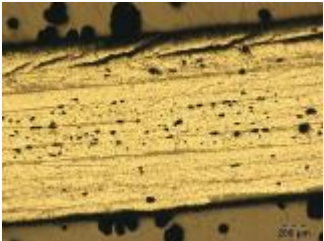
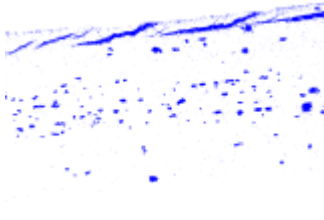
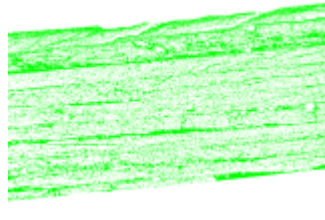
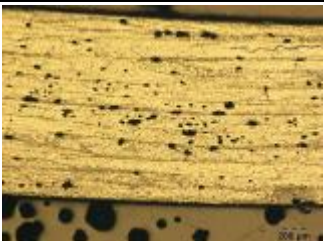
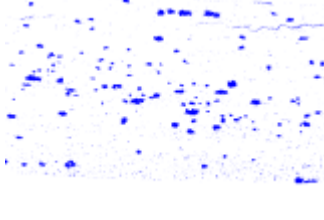
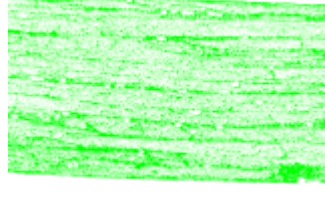
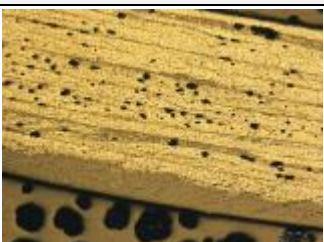
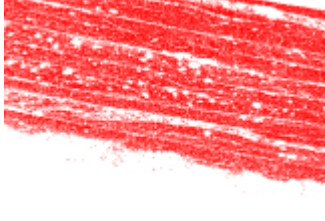
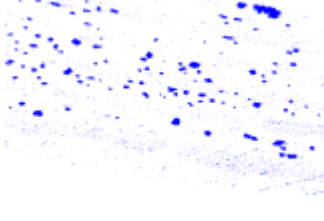
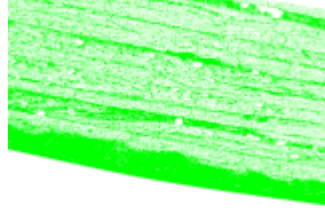
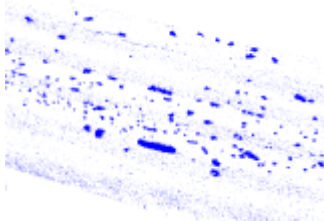
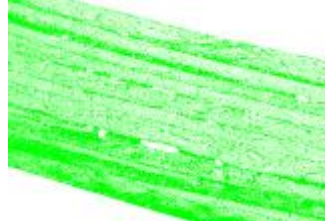
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
2_10X_1	50,759	10,686	38,555
			
2_10X_2	54,023	10,375	35,602
			
2_10X_3	56,644	10,823	32,532
			
2_10X_4	61,313	7,256	31,431
			
2_10X_5	59,759	10,200	30,041

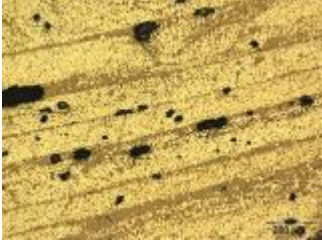
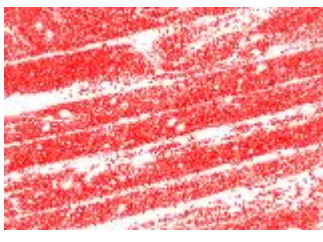
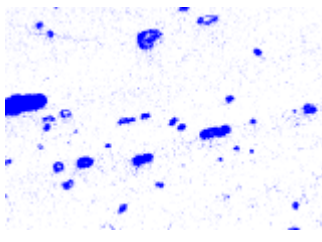
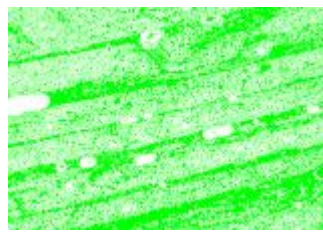
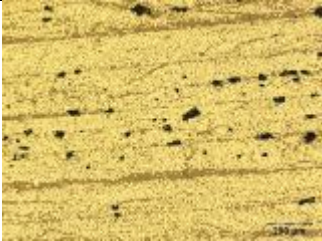
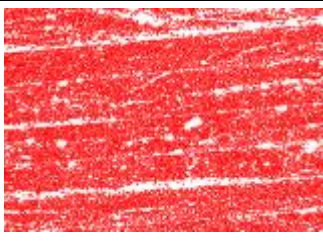
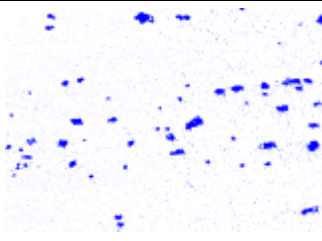
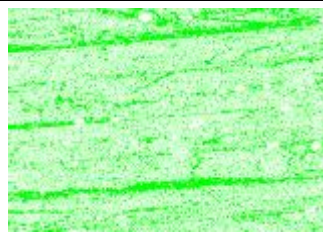
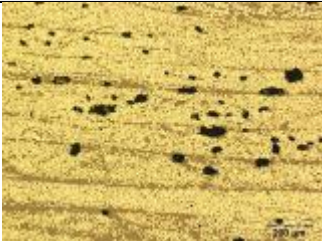
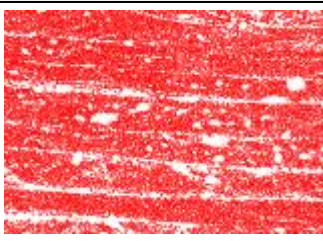
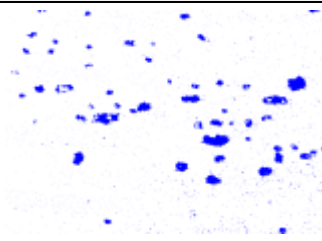
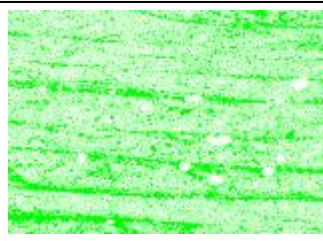
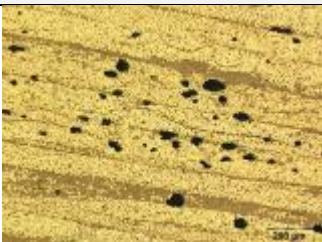
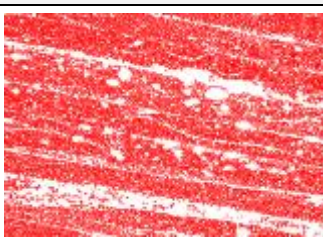
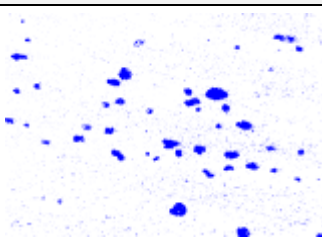
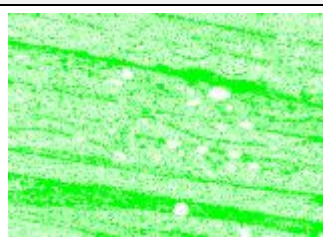
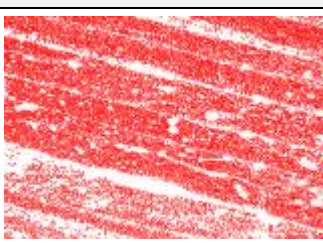
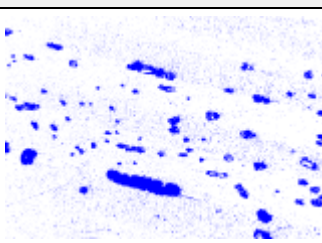
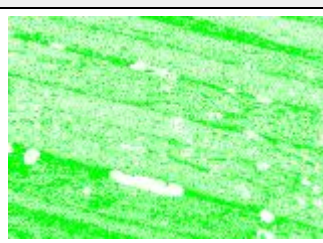
A.3.3 Micrografías pertenecientes a la Corrida 7A.

Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

Tabla A.3.3: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 7A.



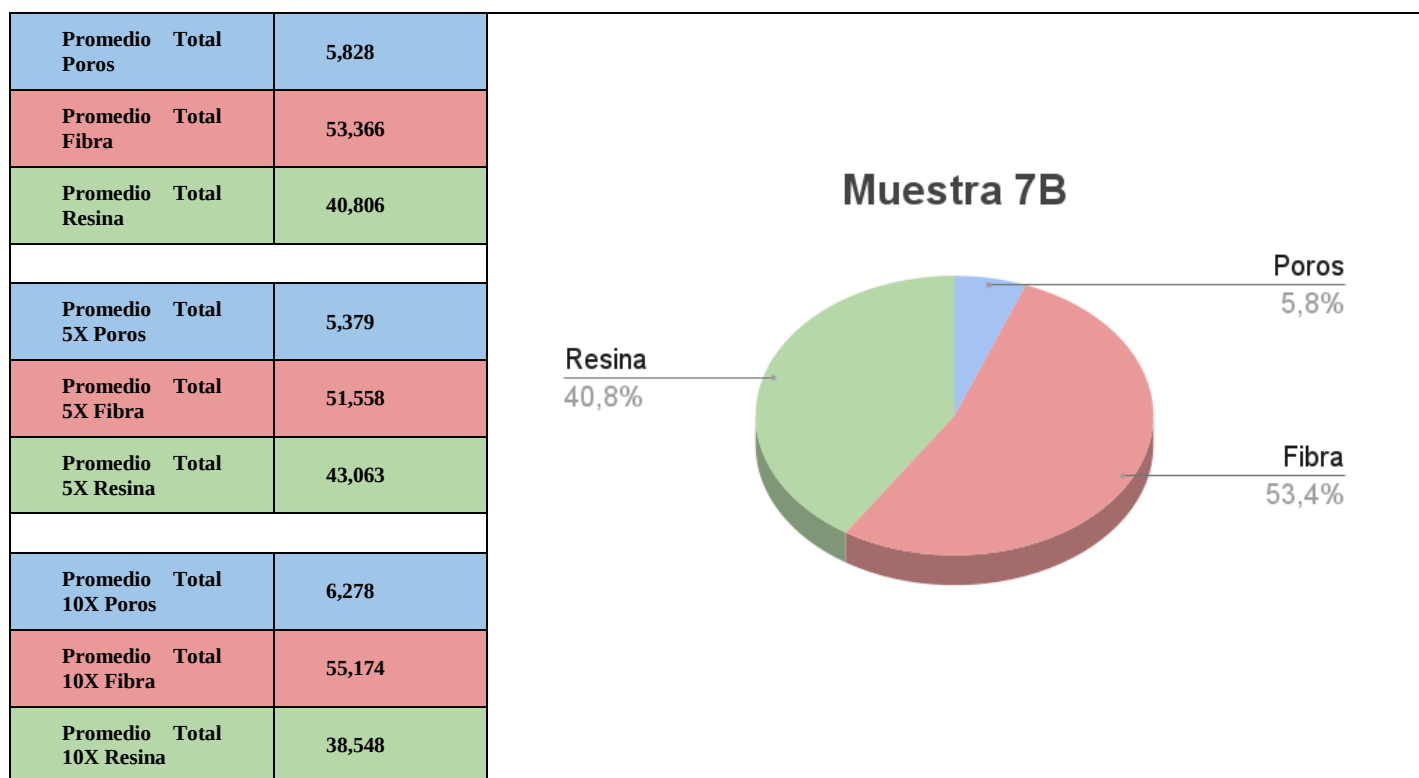
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
7A_5X_1	54,640	6,386	38,974
			
7A_5X_2	65,430	4,857	29,713
			
7A_5X_3	63,372	3,789	32,838
			
7A_5X_4	51,058	3,901	45,041
			
7A_5X_5	48,120	5,747	46,133

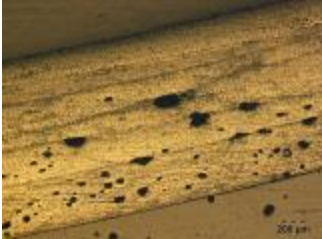
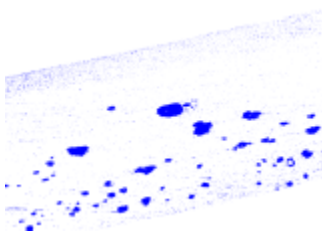
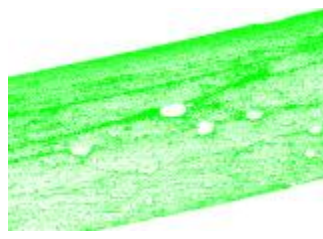
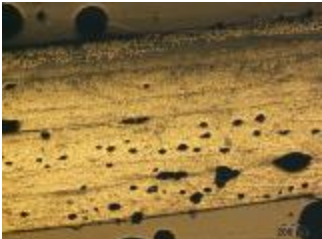
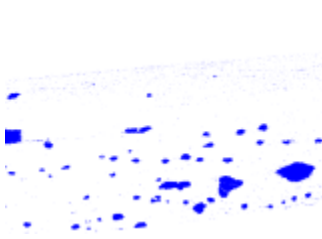
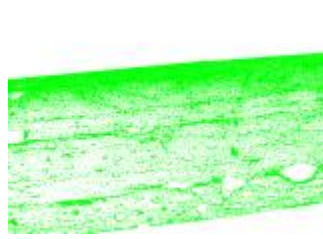
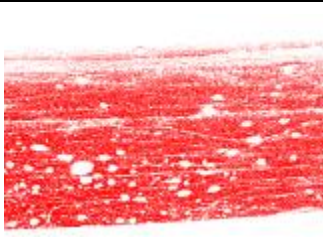
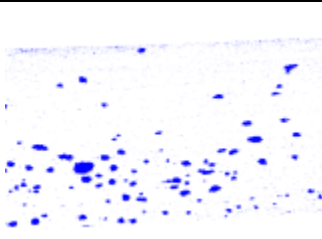
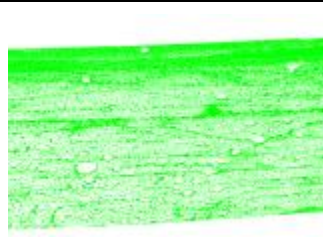
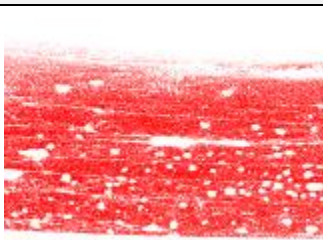
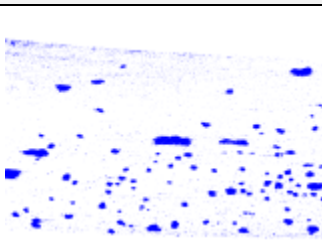
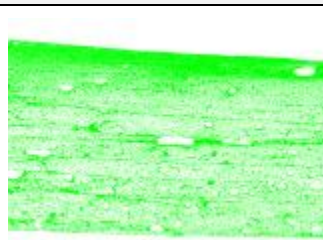
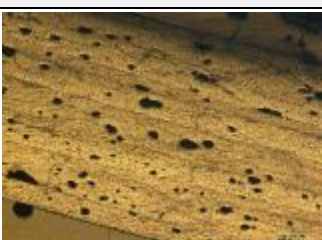
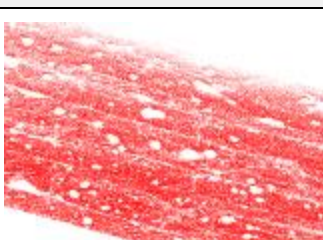
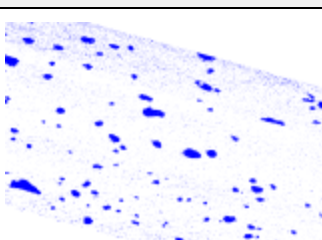
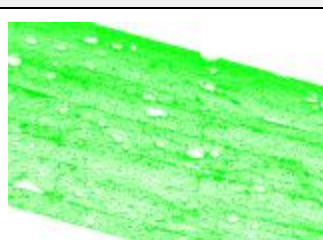
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
7A_10X_1	46,463	5,578	47,959
			
7A_10X_2	62,096	3,503	34,401
			
7A_10X_3	59,245	3,793	36,961
			
7A_10X_4	53,199	4,098	42,703
			
7A_10X_5	47,125	8,439	44,436

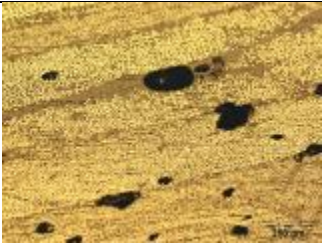
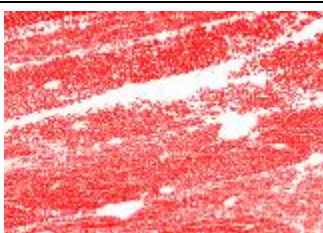
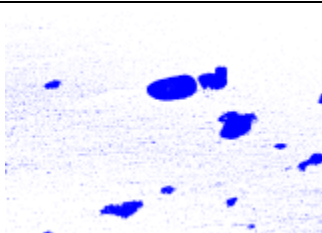
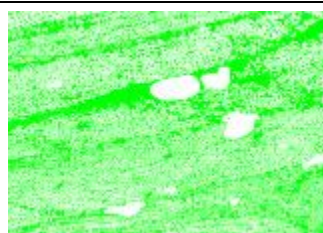
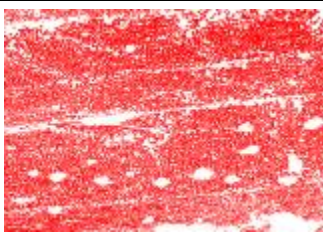
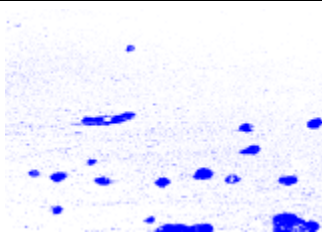
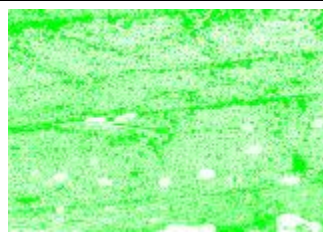
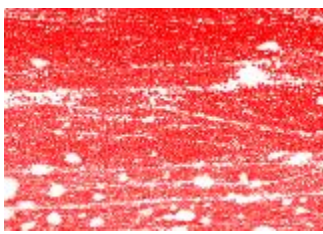
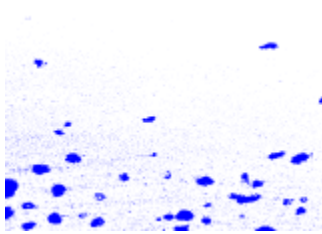
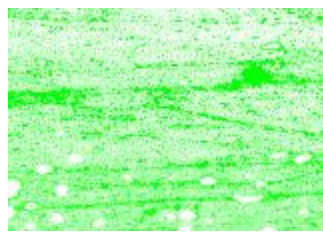
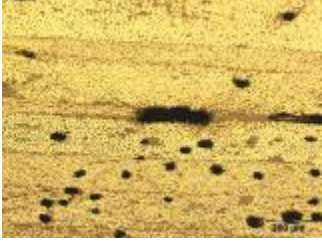
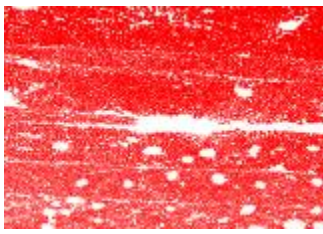
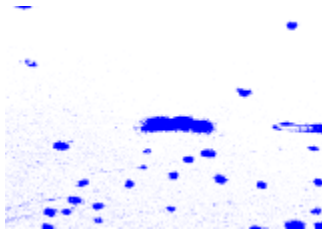
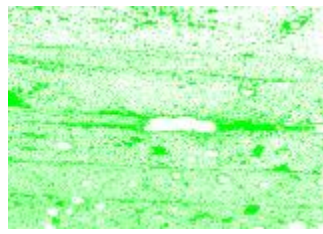
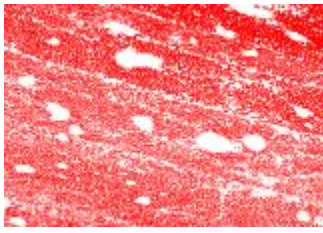
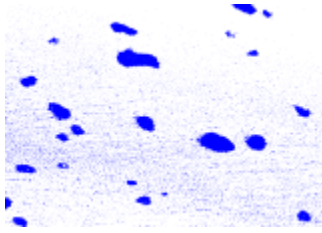
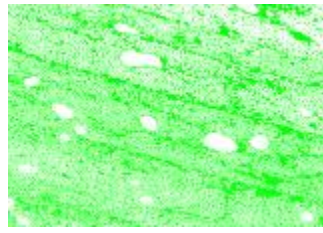
A.3.4 Micrografías pertenecientes a la Corrida 7B.

Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

Tabla A.3.4: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 7B.



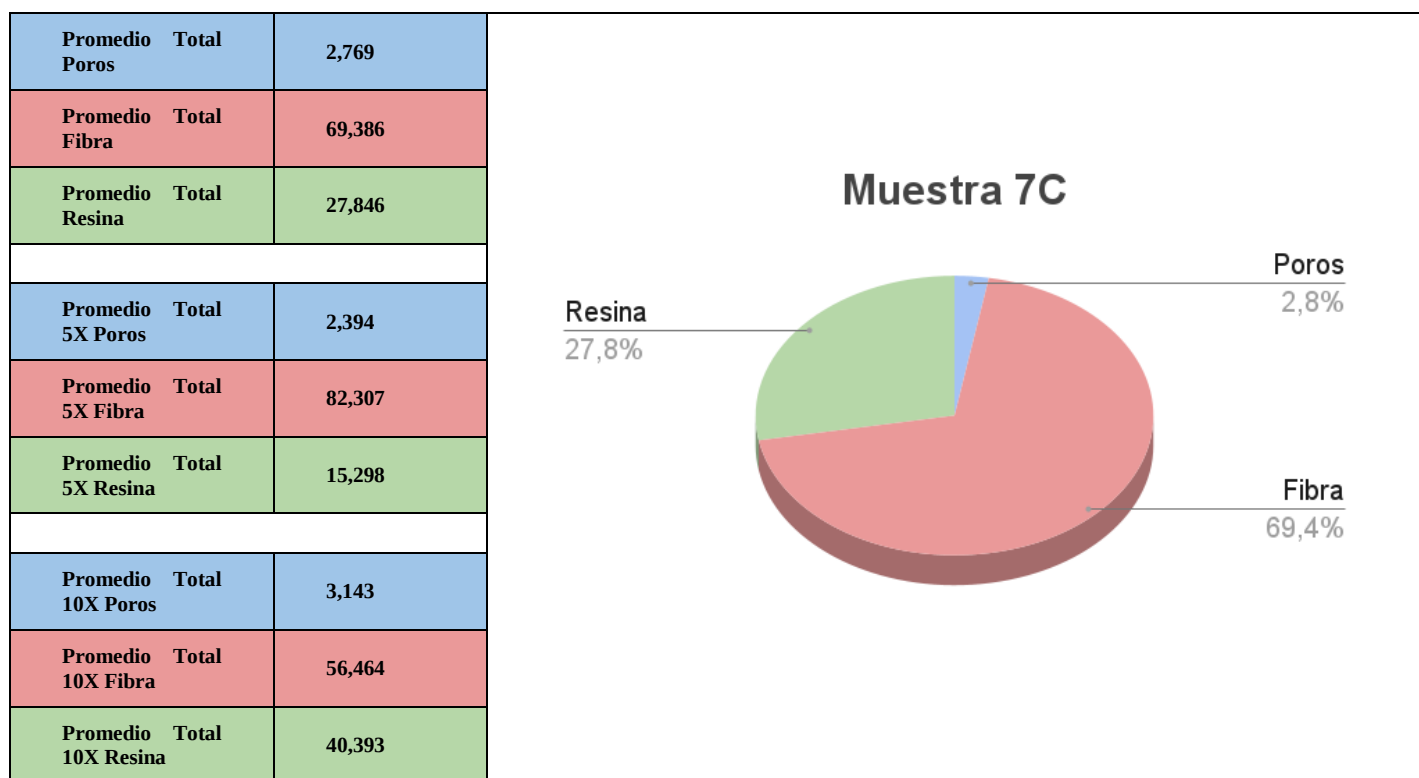
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
7B_5X_1	51,390	4,905	43,706
			
7B_5X_2	56,858	5,148	37,994
			
7B_5X_3	51,530	4,376	44,094
			
7B_5X_4	53,351	6,203	40,446
			
7B_5X_5	44,663	6,262	49,075

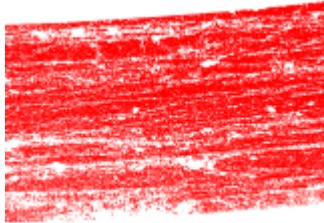
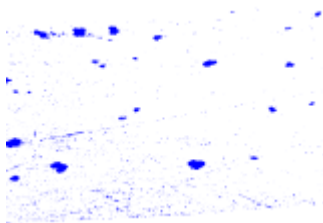
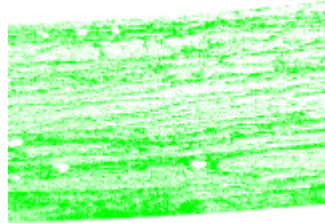
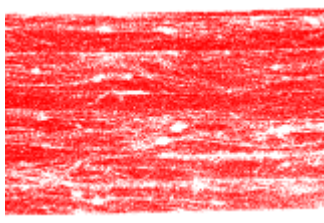
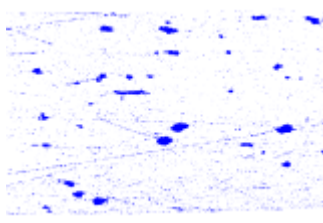
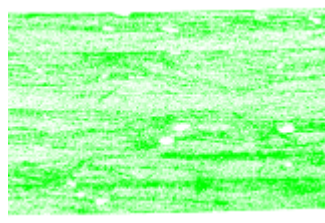
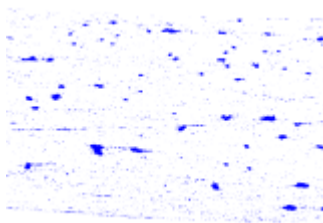
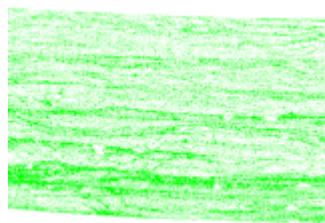
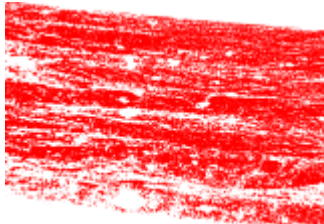
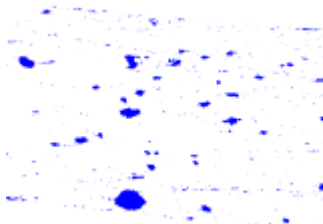
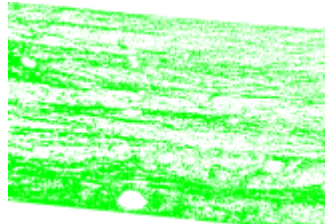
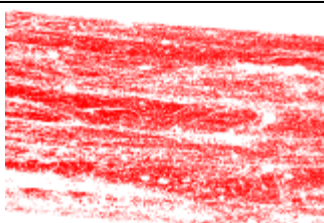
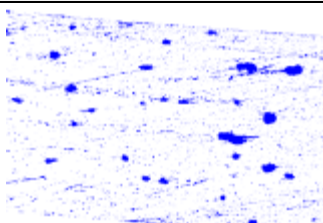
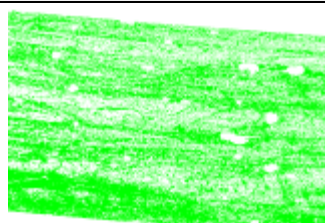
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
7B_10X_1	47,320	6,679	46,000
			
7B_10X_2	52,444	5,991	41,565
			
7B_10X_3	59,005	5,562	35,433
			
7B_10X_4	66,250	5,191	28,559
			
7B_10X_5	50,849	7,965	41,185

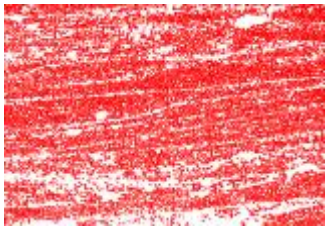
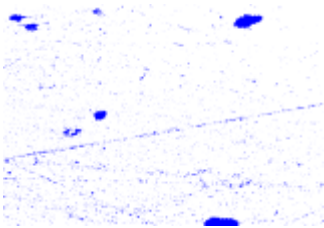
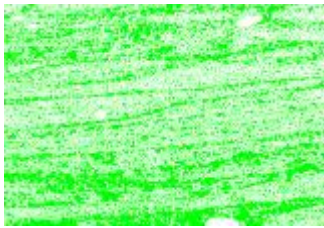
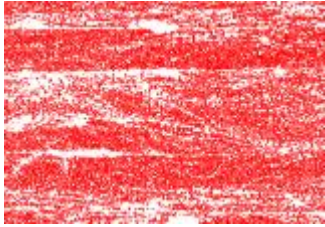
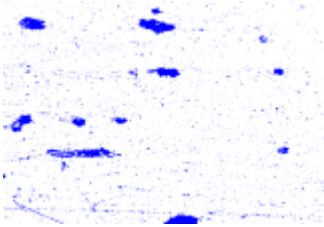
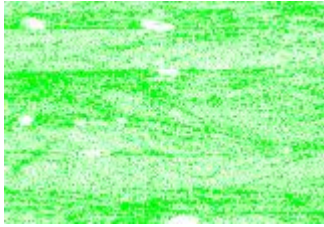
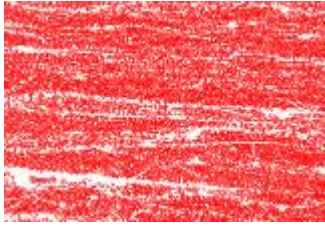
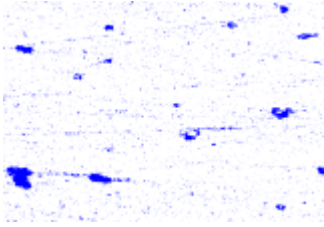
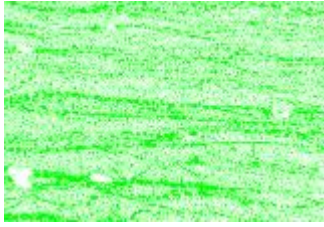
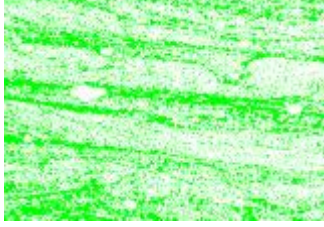
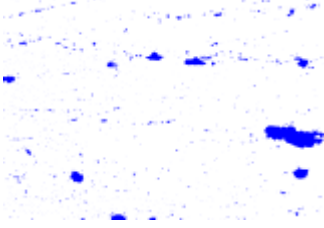
A.3.5 Micrografías pertenecientes a la Corrida 7C.

Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

Tabla A.3.5: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 7C.



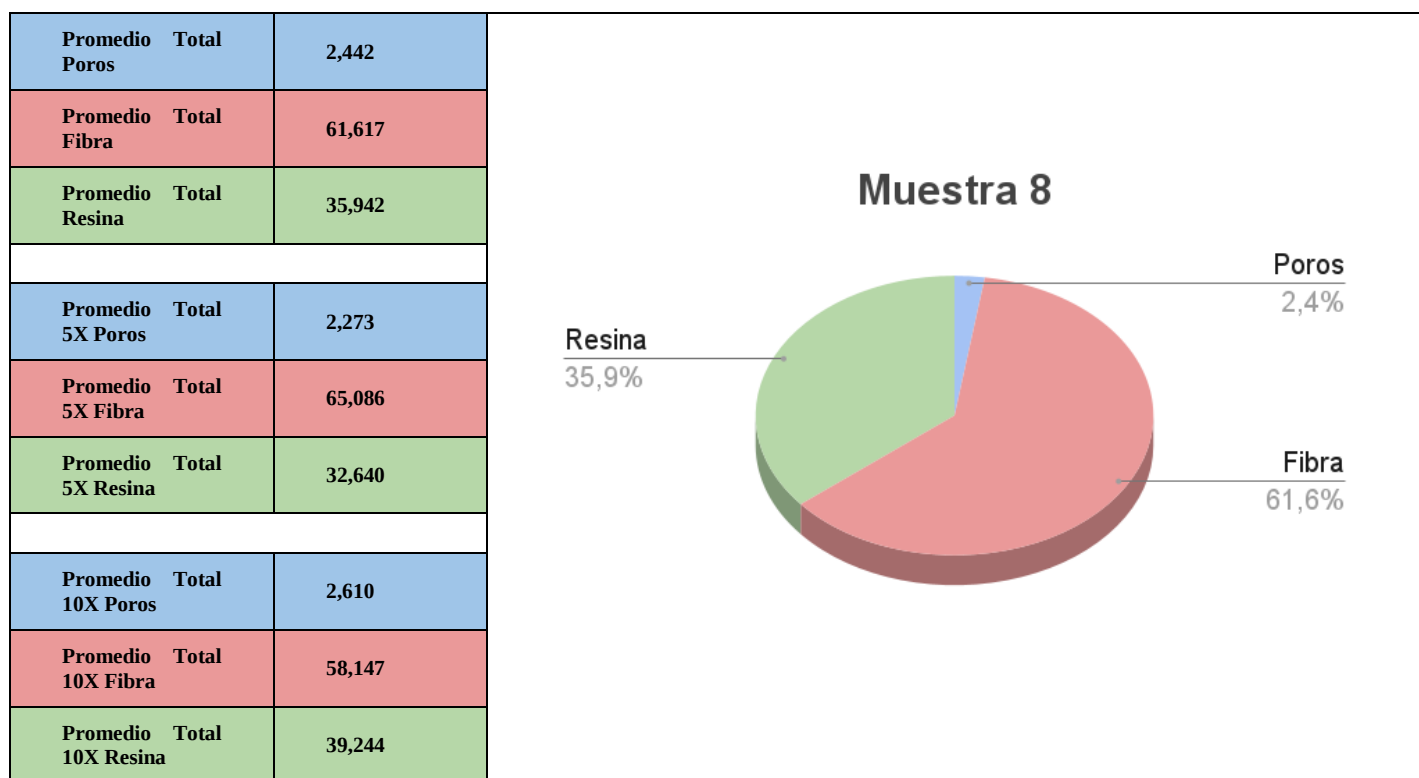
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
7C_5X_1	75,073	1,884	23,043
			
7C_5X_2	81,676	2,264	16,06
			
7C_5X_3	85,262	3,343	11,395
			
7C_5X_4	86,361	1,68	11,959
			
7C_5X_5	83,165	2,801	14,034

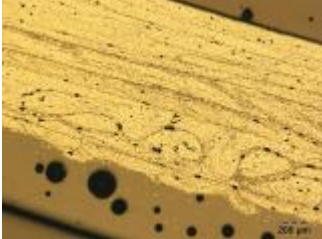
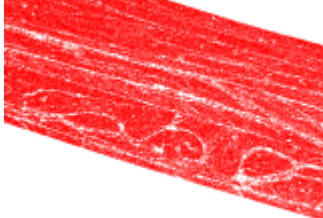
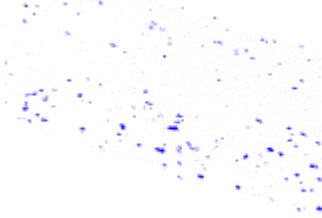
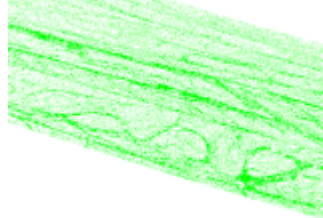
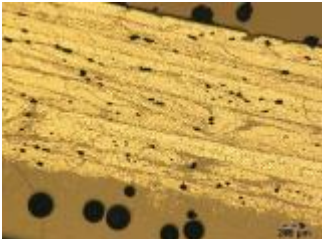
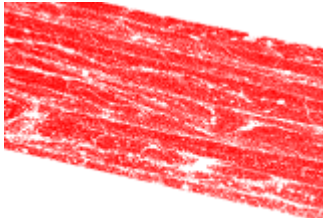
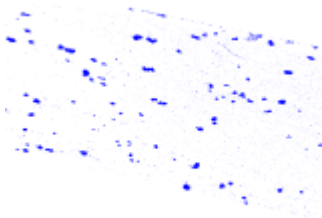
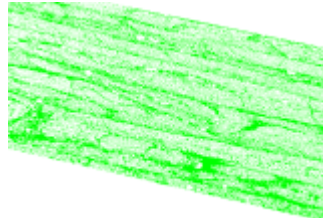
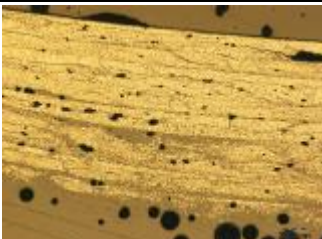
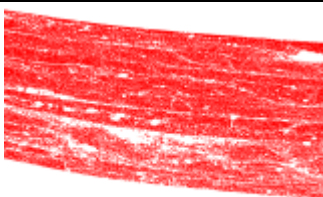
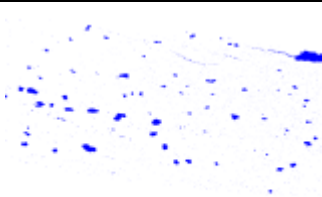
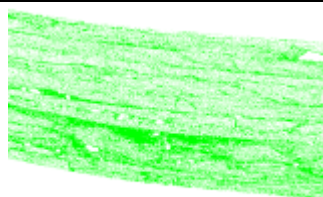
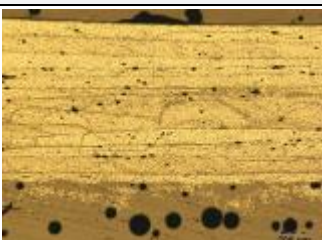
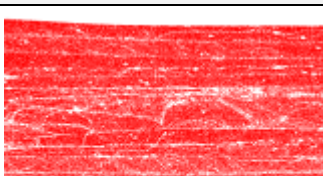
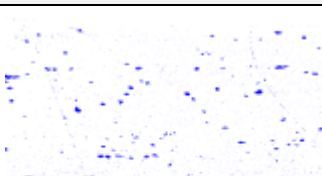
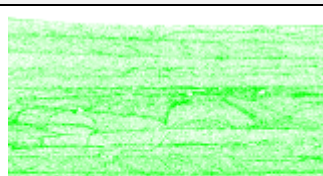
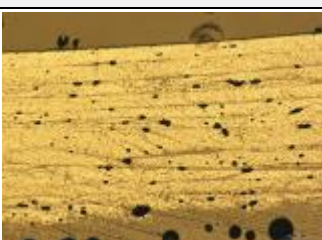
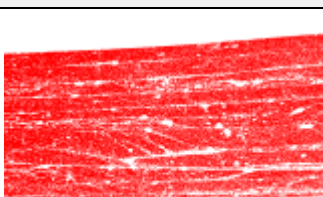
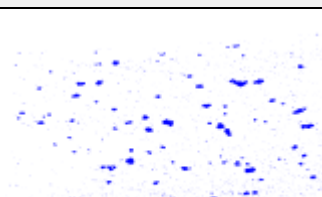
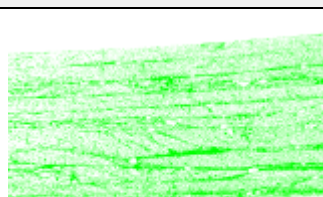
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
7C_10X_1	52,523	2,845	44,632
			
7C_10X_2	53,298	4,276	42,426
			
7C_10X_3	58,503	3,531	37,966
			
7C_10X_4	62,767	2,049	35,184
			
7C_10X_5	55,231	3,014	41,756

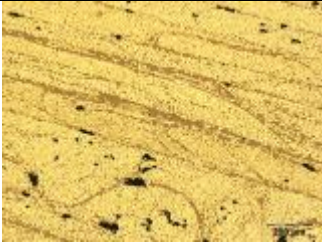
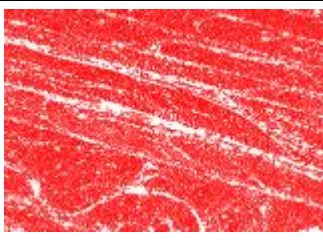
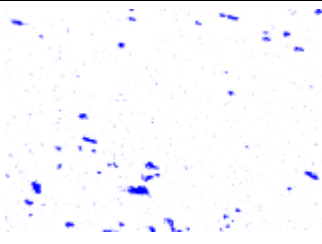
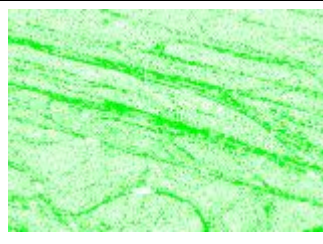
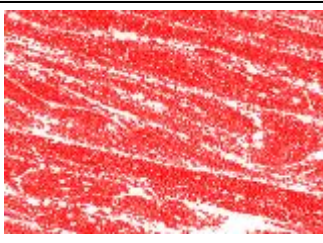
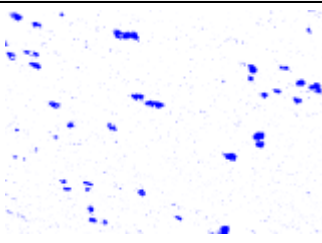
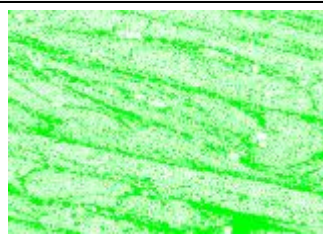
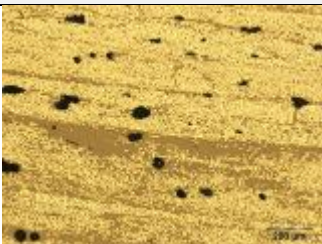
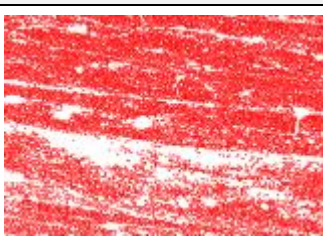
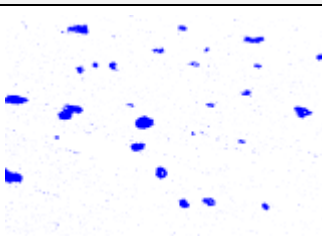
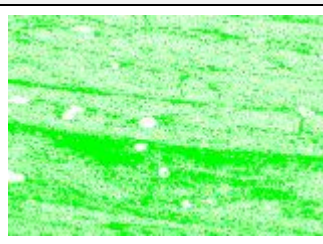
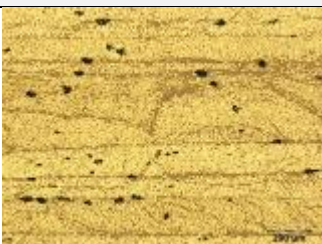
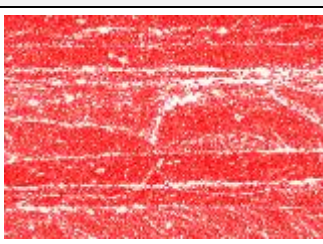
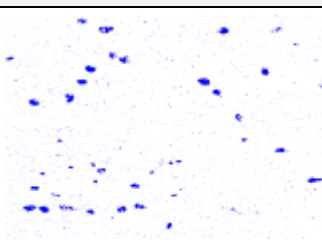
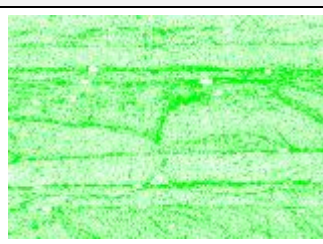
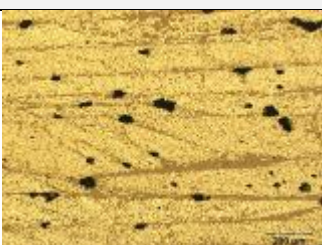
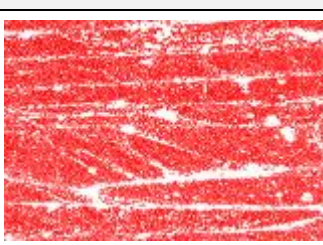
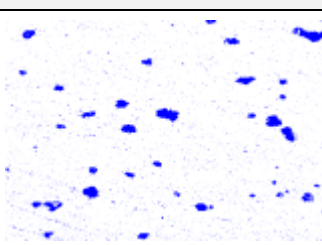
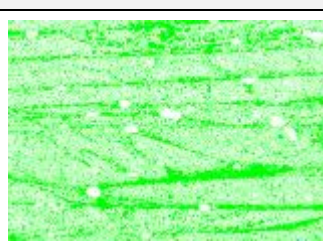
A.3.6 Micrografías pertenecientes a la Corrida 8.

Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

Tabla A.3.6: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 8.



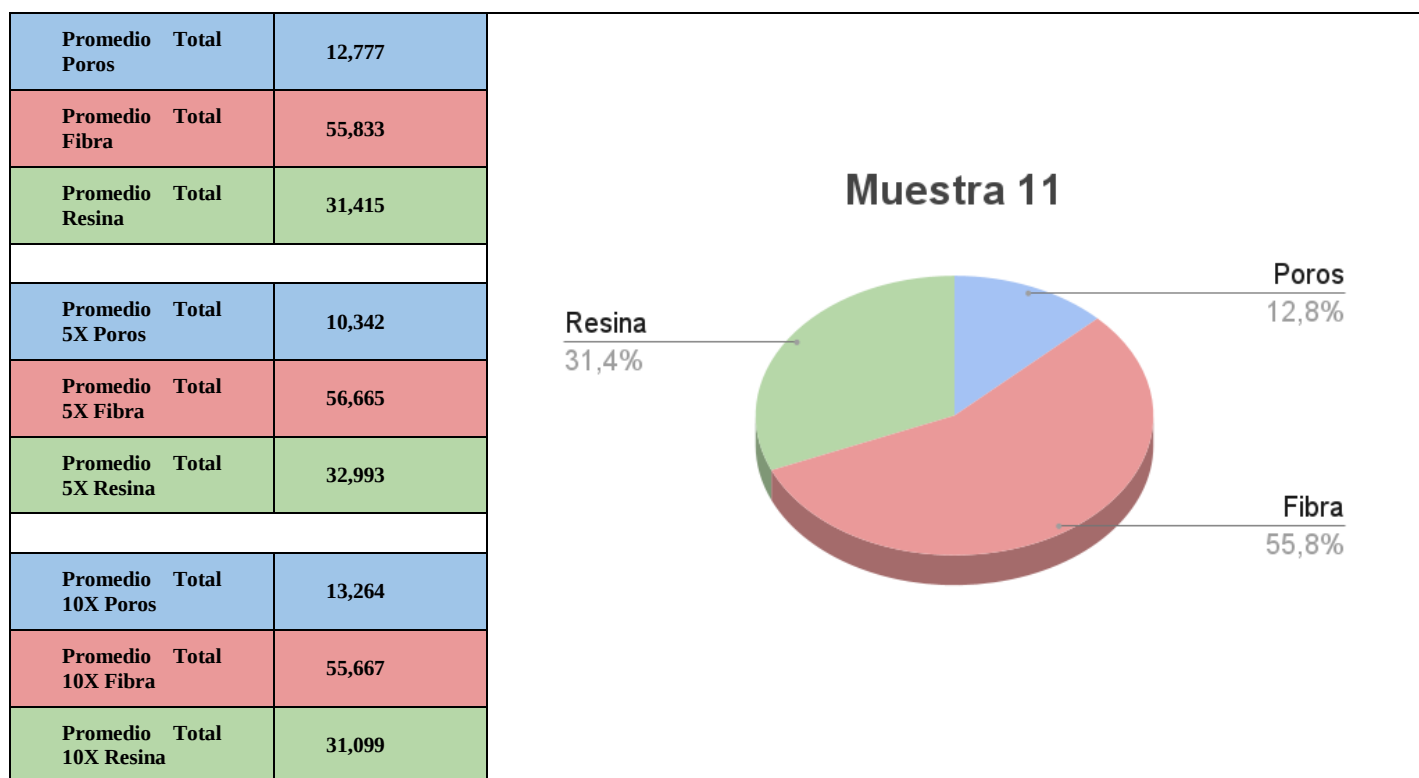
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
8_5X_1	71,296	1,469	27,234
			
8_5X_2	60,614	2,640	36,746
			
8_5X_3	61,181	2,611	36,208
			
8_5X_4	65,888	1,676	32,436
			
8_5X_5	66,454	2,969	30,577

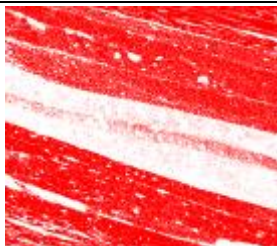
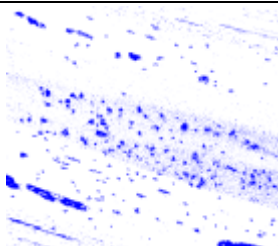
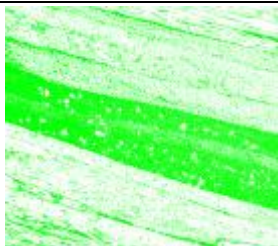
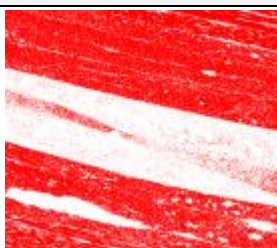
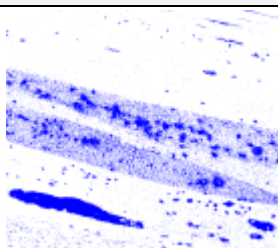
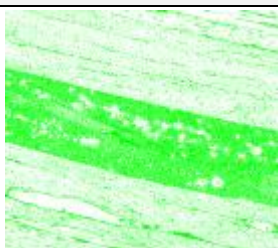
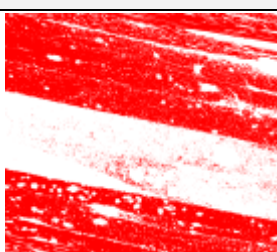
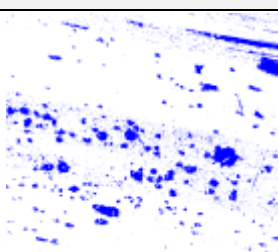
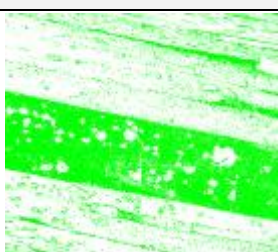
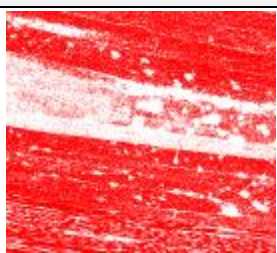
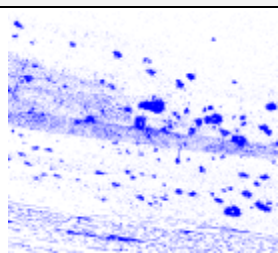
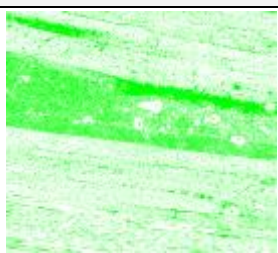
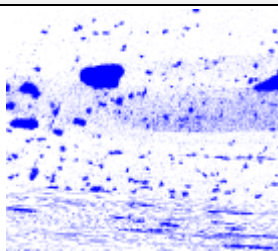
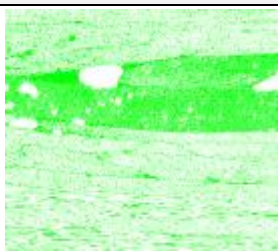
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
8_10X_1	64,686	1,694	33,620
			
8_10X_2	56,755	2,448	40,798
			
8_10X_3	52,920	2,807	44,273
			
8_10X_4	60,349	2,081	37,571
			
8_10X_5	56,023	4,019	39,958

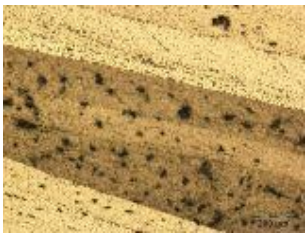
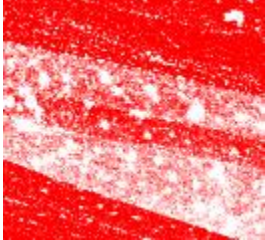
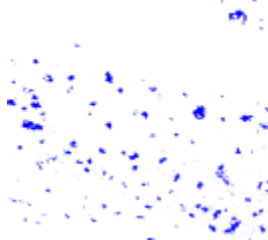
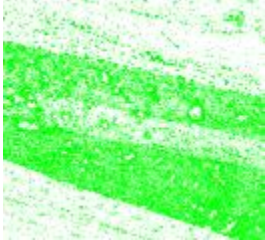
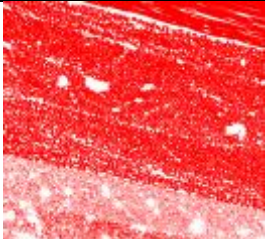
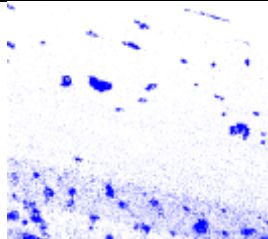
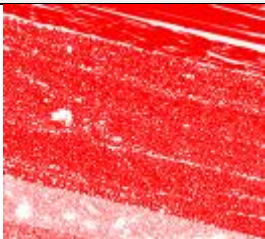
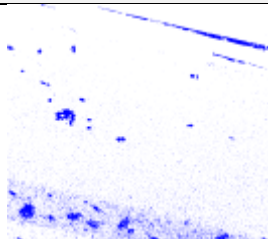
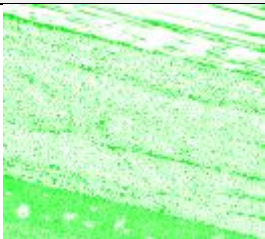
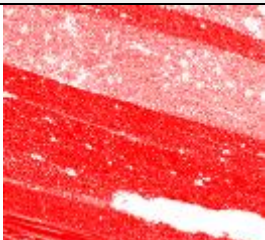
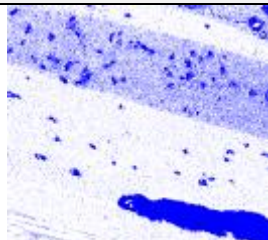
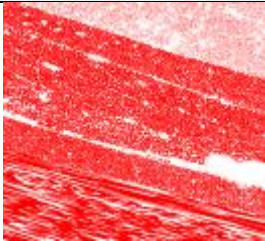
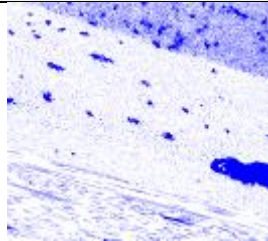
A.3.7 Micrografías pertenecientes a la Corrida 11.

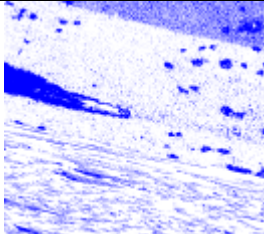
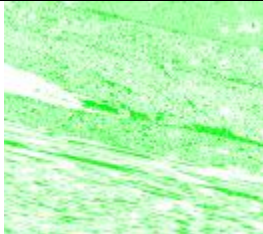
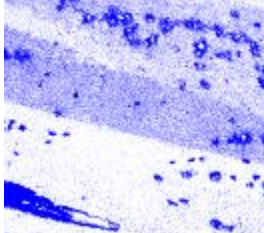
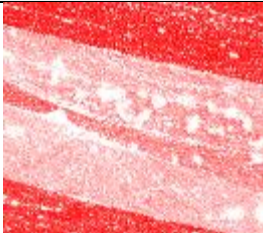
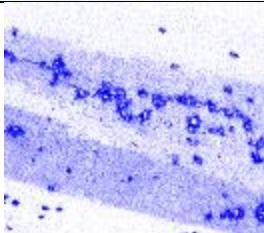
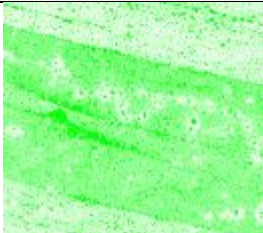
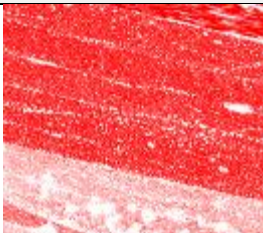
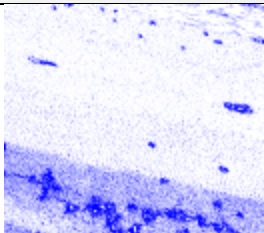
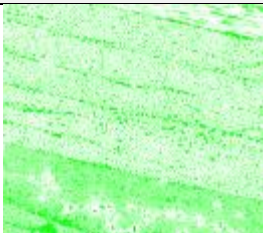
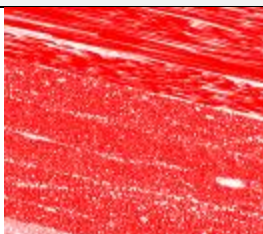
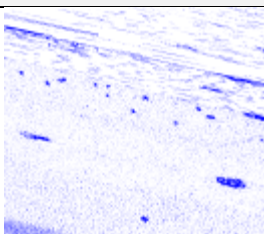
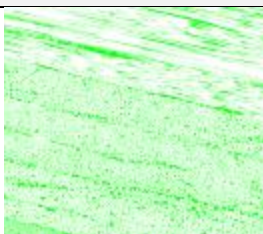
Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

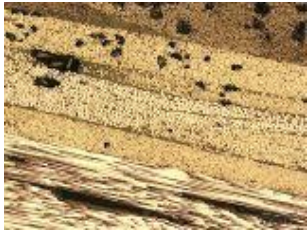
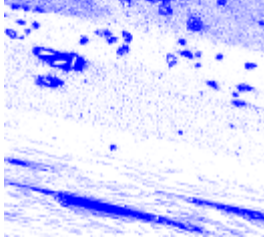
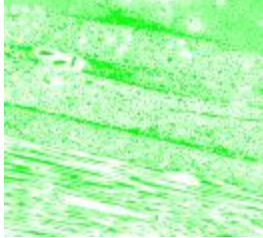
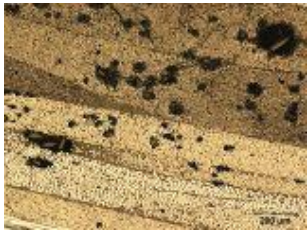
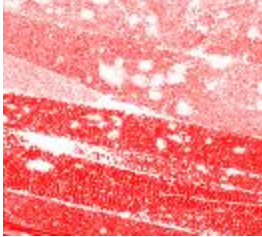
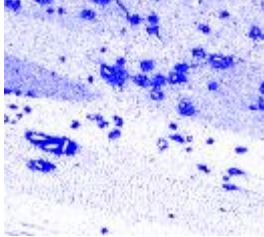
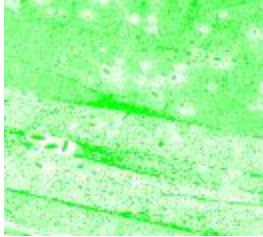
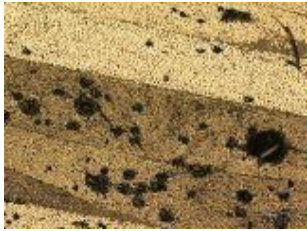
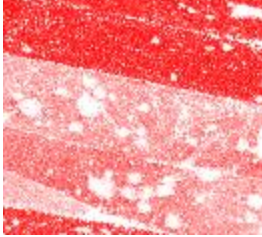
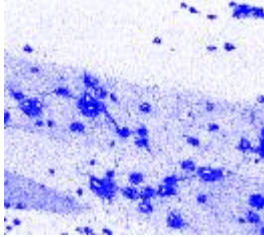
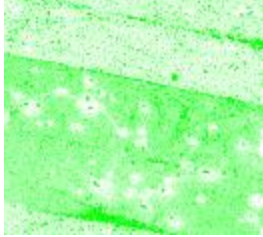
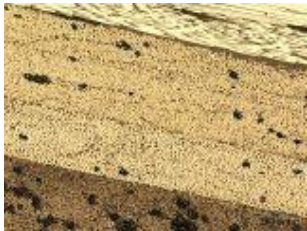
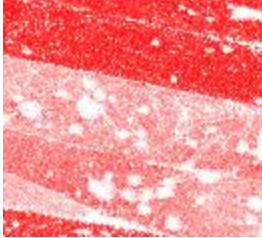
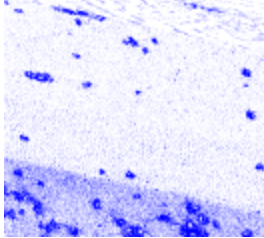
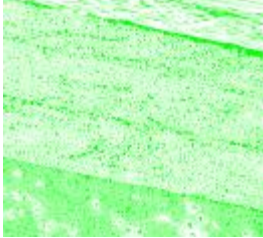
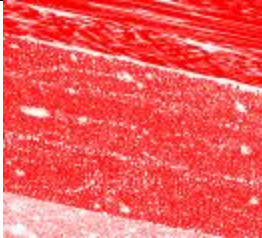
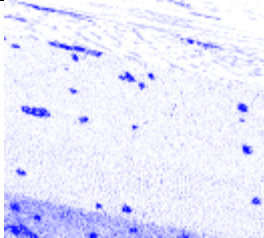
Tabla A.3.7: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 11.

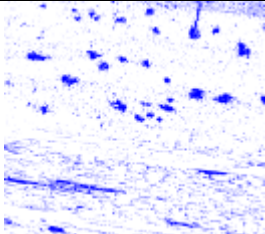
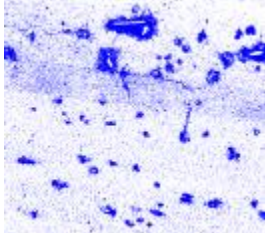
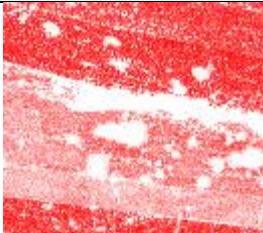
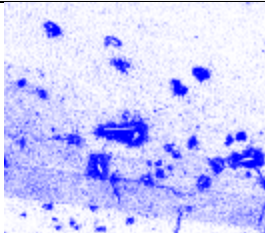
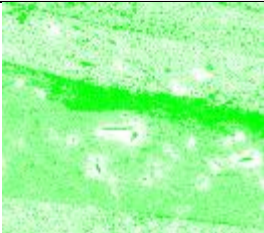
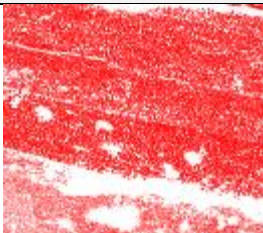
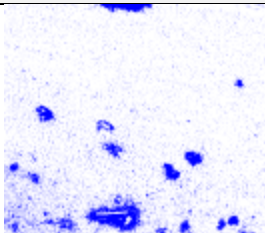
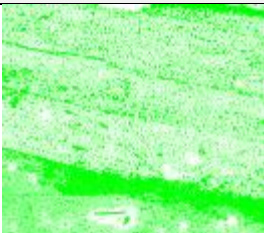
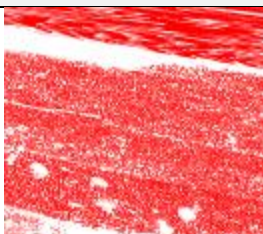
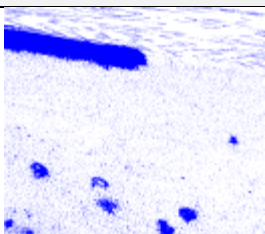


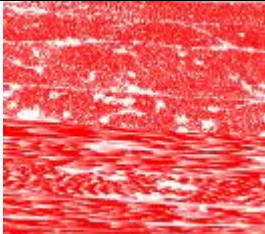
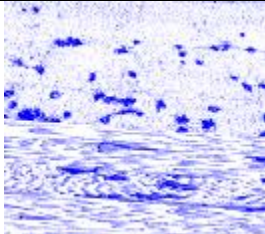
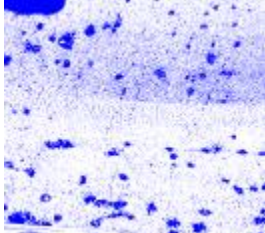
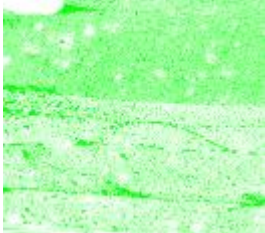
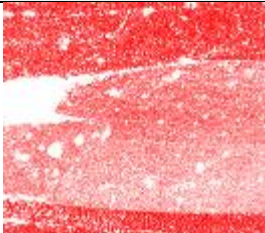
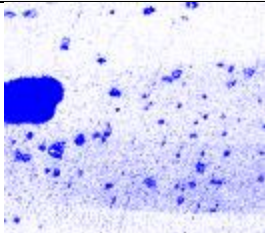
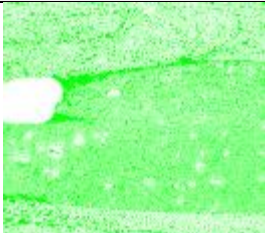
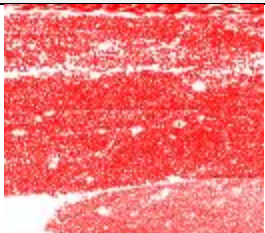
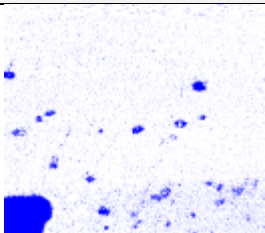
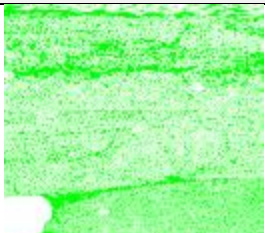
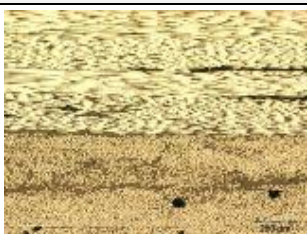
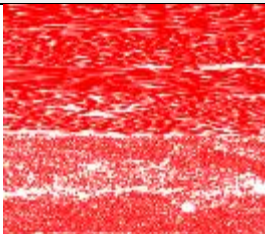
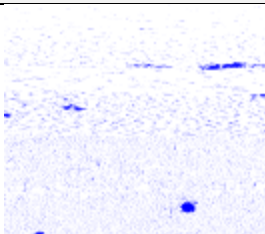
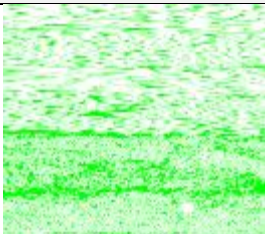
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
11_5X_8	57,673	6,124	36,202
			
11_5X_9	55,198	13,054	31,749
			
11_5X_10	55,703	8,144	36,153
			
11_5X_12	59,920	11,107	28,972
			
11_5X_16	54,832	13,279	31,889

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
11_10X_8A	59,725	2,758	37,517
			
11_10X_8B	64,850	7,290	27,860
			
11_10X_8C	69,281	4,682	26,037
			
11_10X_8D	59,189	19,667	21,144
			
11_10X_8E	58,139	13,657	28,204

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
11_10X_9A	65,240	3,907	30,853
			
11_10X_9B	41,537	22,111	36,352
			
11_10X_9C	40,959	20,308	38,733
			
11_10X_9D	56,591	14,924	28,484
			
11_10X_9E	71,826	6,960	21,214

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
11_10X_10A	53,435	14,822	31,743
			
11_10X_10B	44,899	18,372	36,729
			
11_10X_10C	44,767	21,579	33,655
			
11_10X_10D	58,545	13,115	28,340
			
11_10X_10E	65,689	8,762	25,549

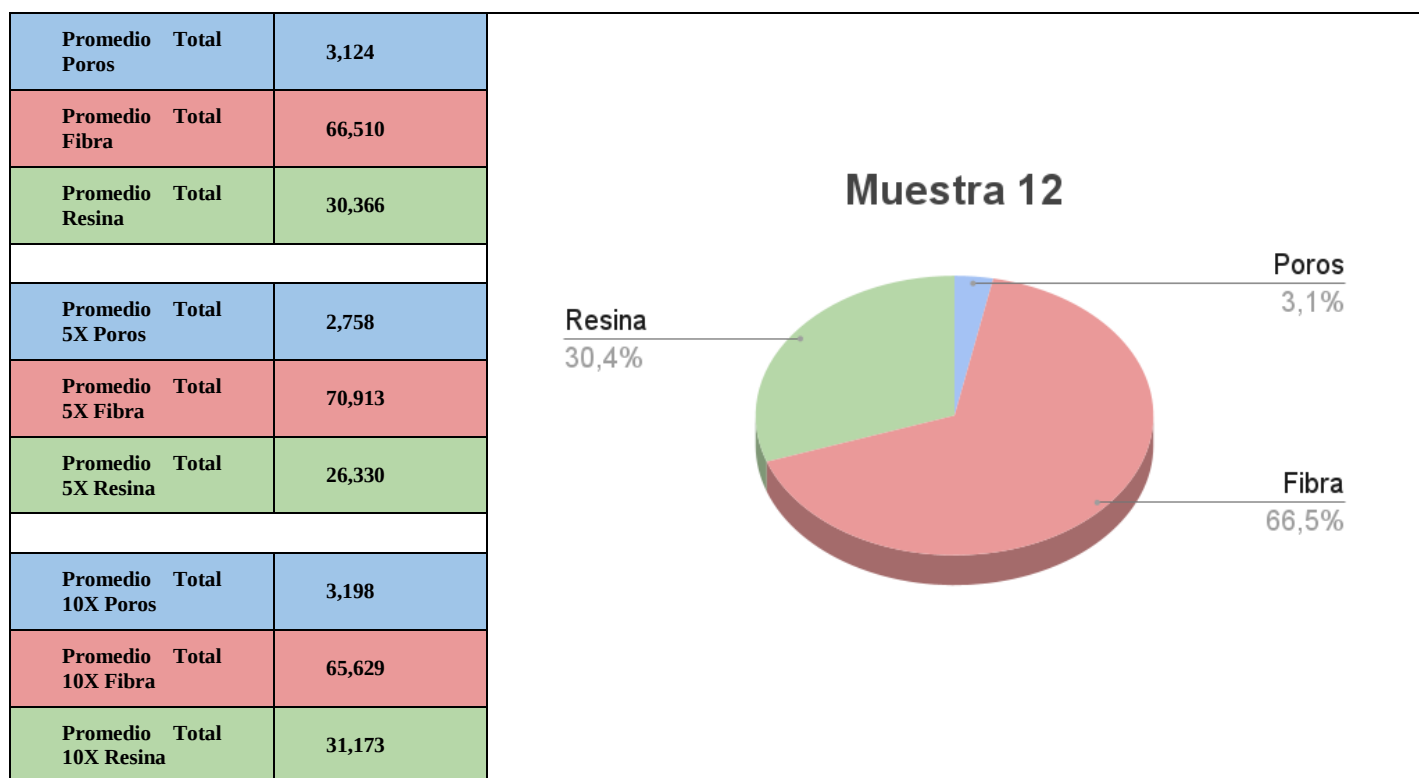
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
11_10X_12A	63,559	7,809	28,632
			
11_10X_12B	49,906	15,753	34,340
			
11_10X_12C	43,374	19,423	37,204
			
11_10X_12D	52,023	9,143	38,834
			
11_10X_12E	55,517	11,929	32,553

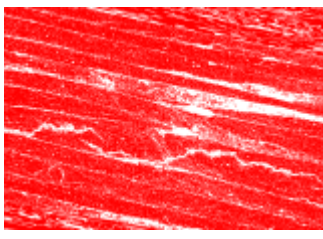
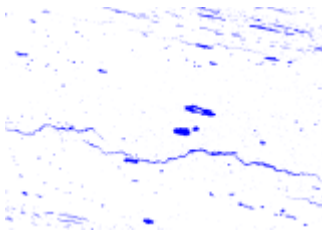
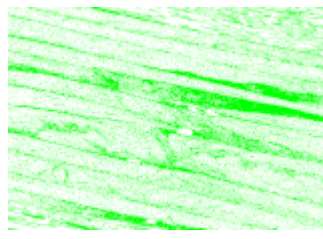
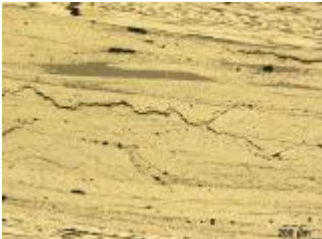
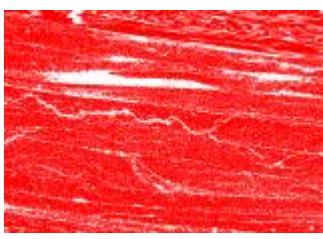
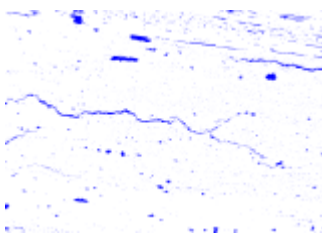
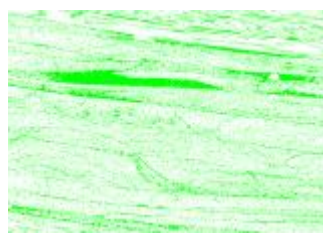
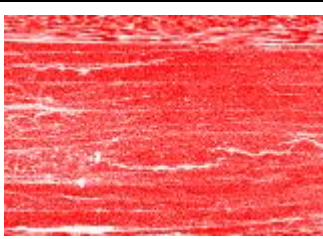
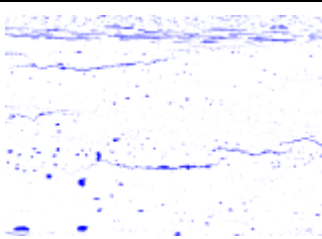
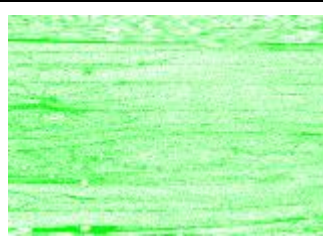
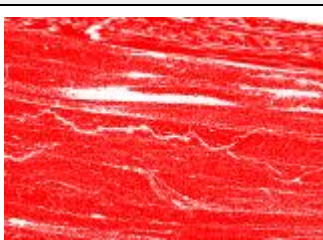
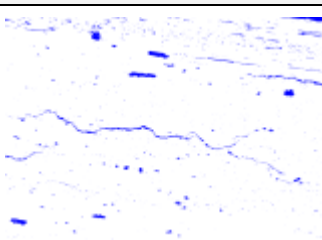
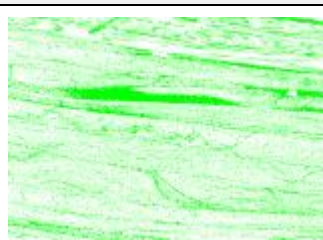
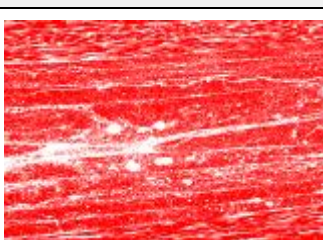
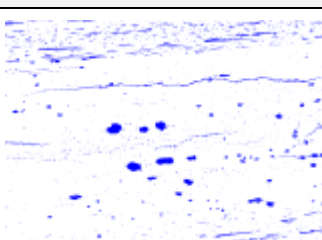
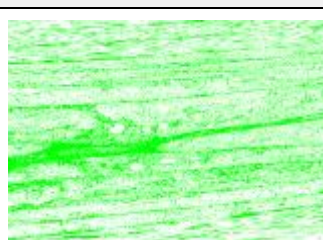
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
11_10X_16A	62,113	16,386	21,501
			
11_10X_16B	51,975	17,399	31,380
			
11_10X_16C	45,204	16,110	38,685
			
11_10X_16D	54,863	7,464	37,673
			
11_10X_16E	67,463	4,164	28,373

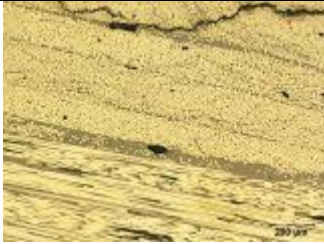
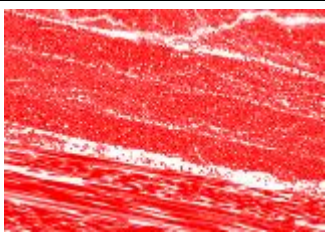
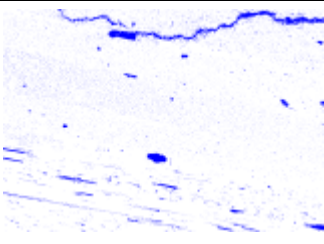
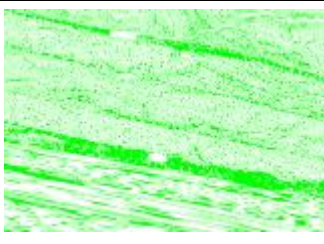
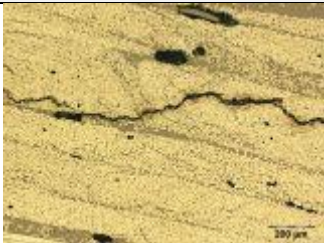
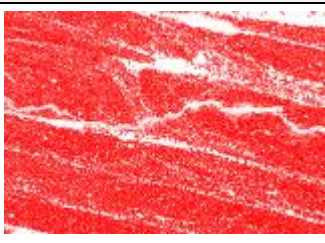
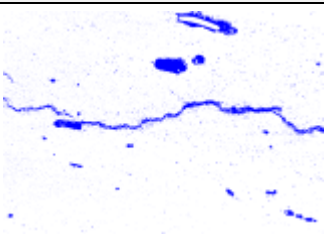
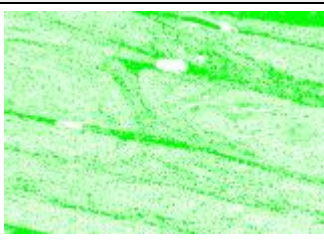
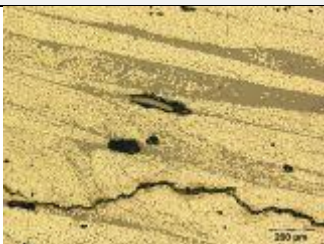
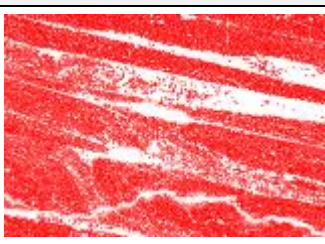
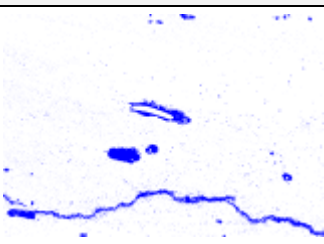
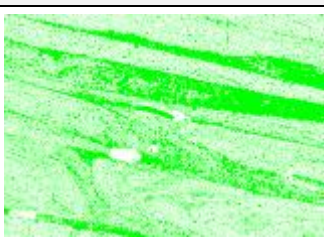
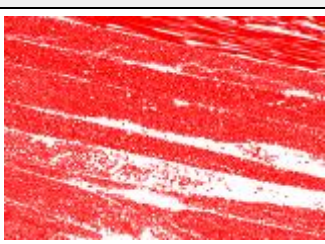
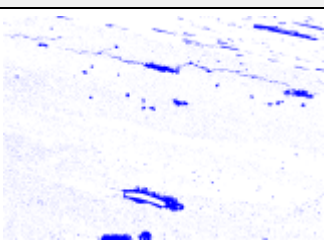
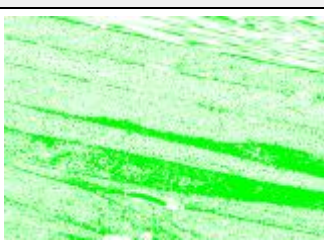
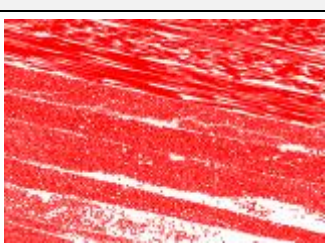
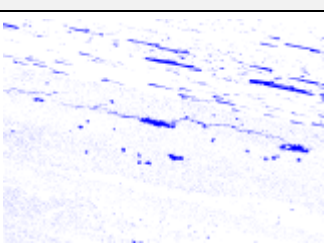
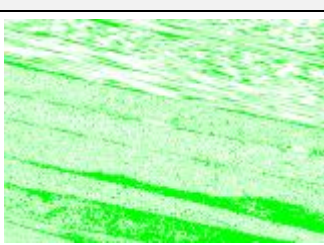
A.3.8 Micrografías pertenecientes a la Corrida 12.

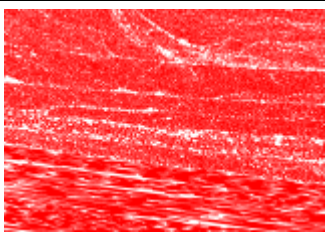
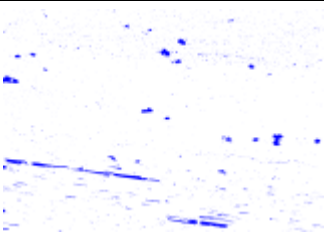
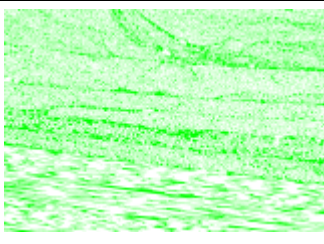
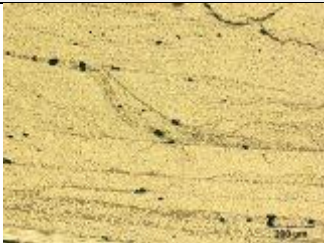
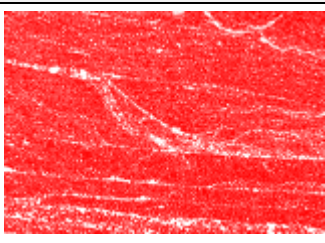
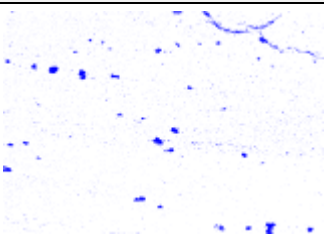
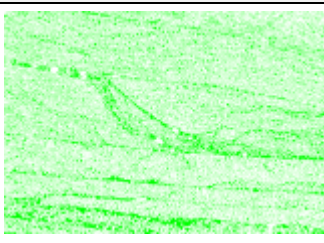
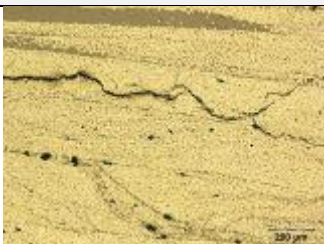
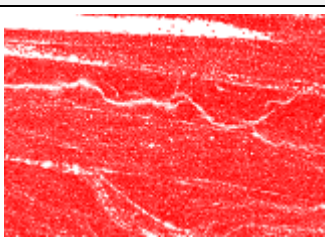
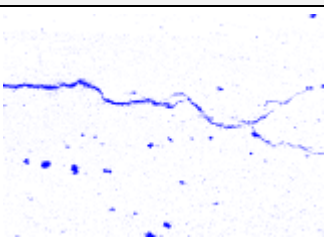
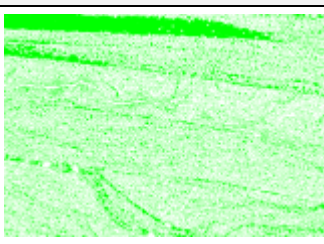
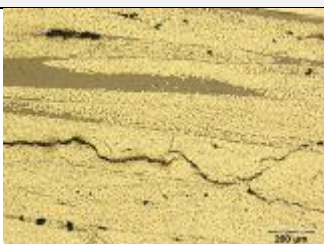
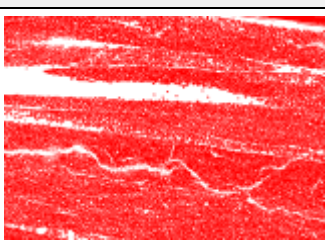
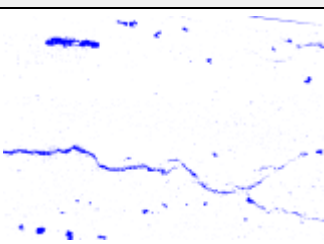
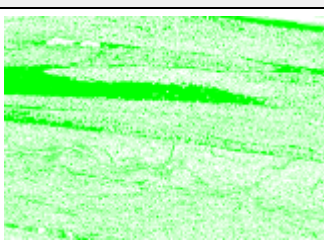
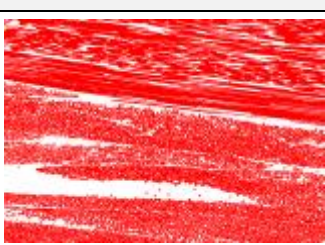
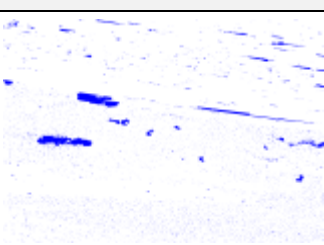
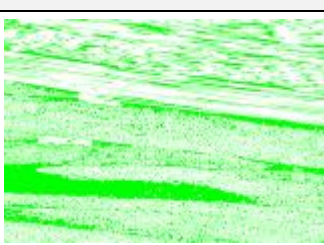
Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

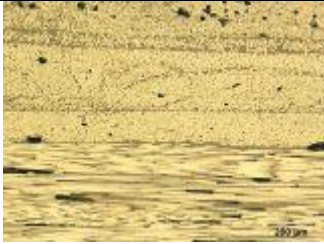
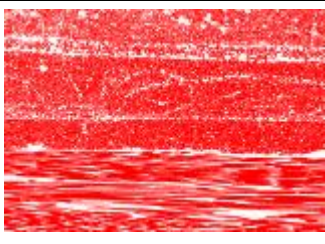
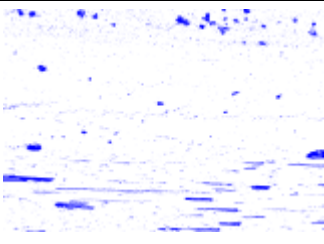
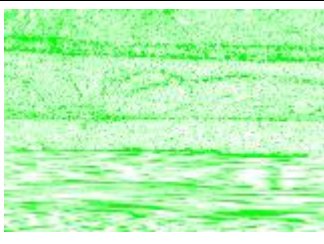
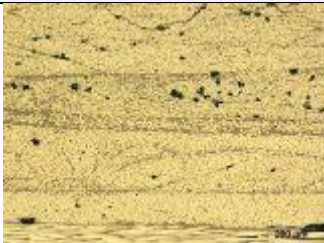
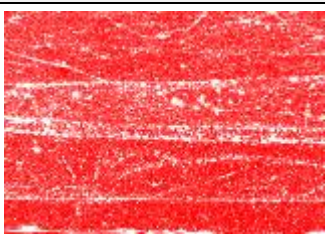
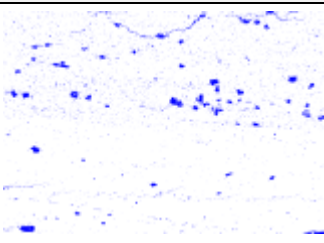
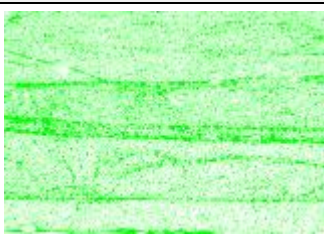
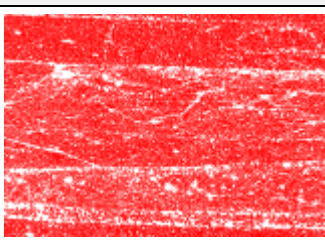
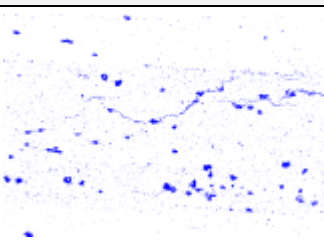
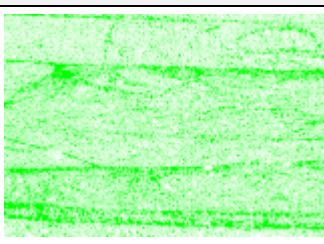
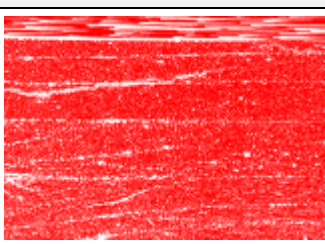
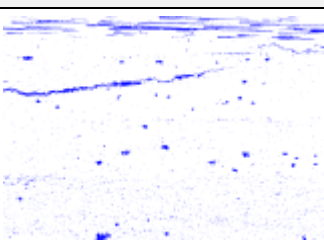
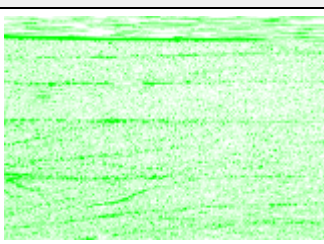
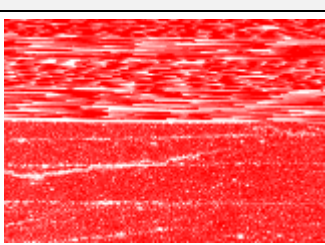
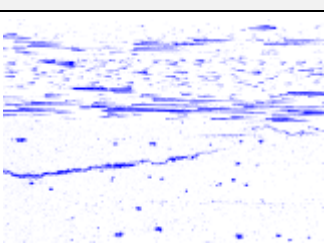
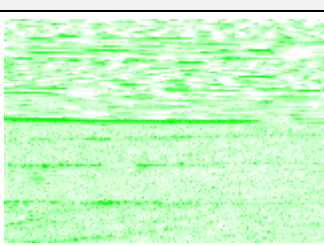
Tabla A.3.8: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 12.

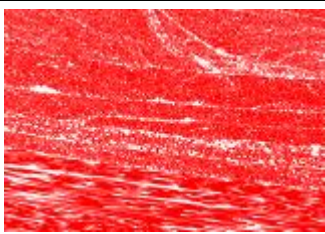
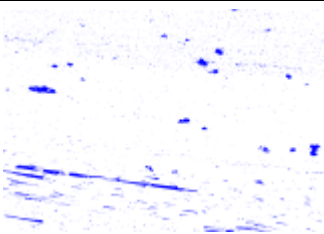
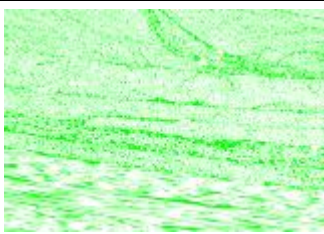
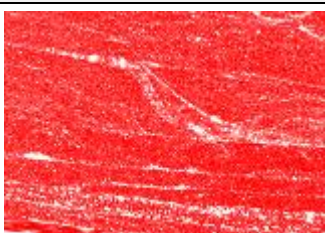
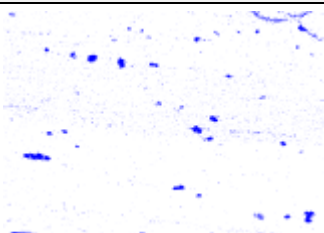
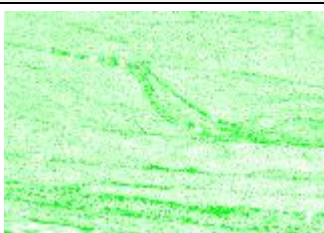
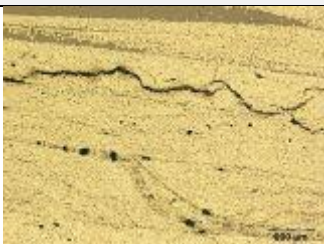
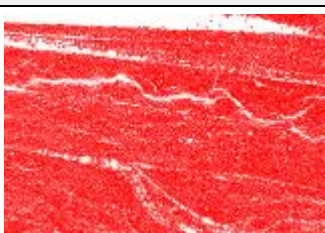
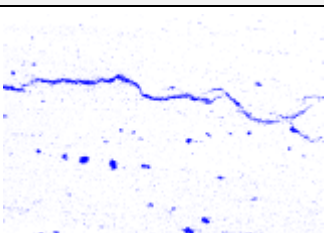
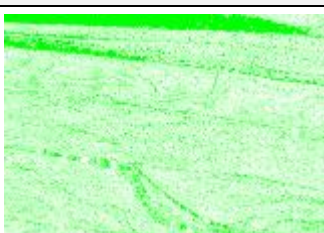
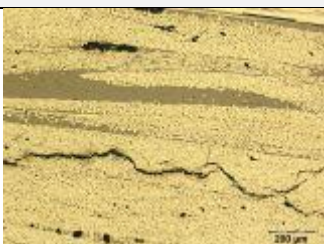
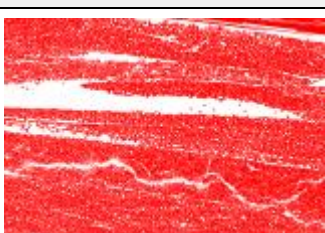
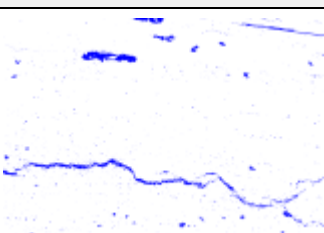
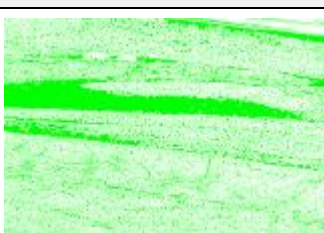
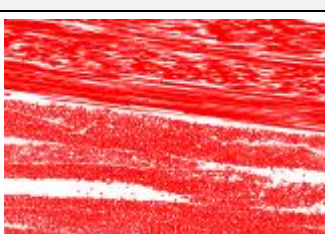
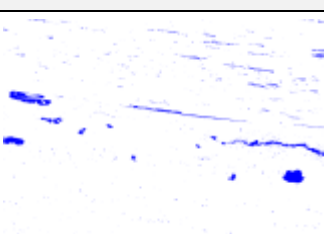


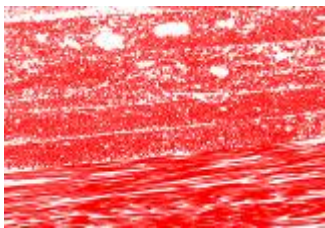
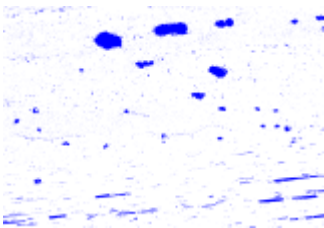
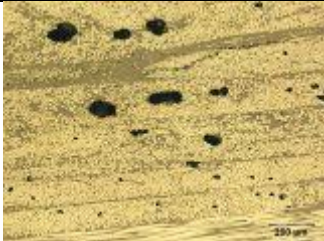
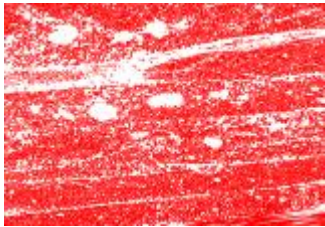
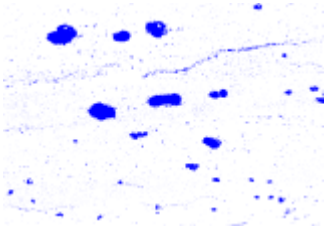
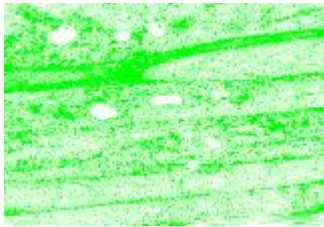
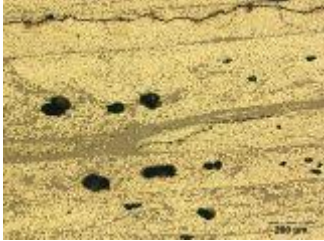
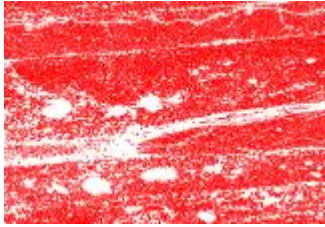
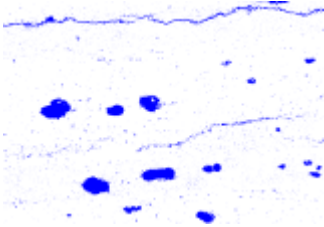
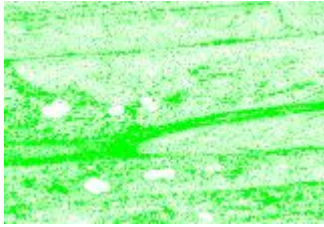
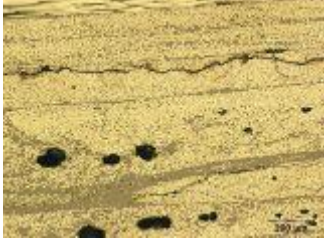
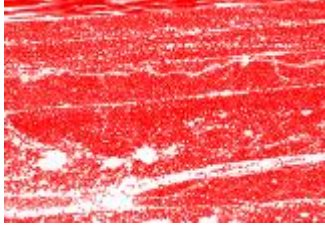
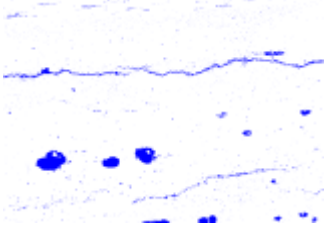
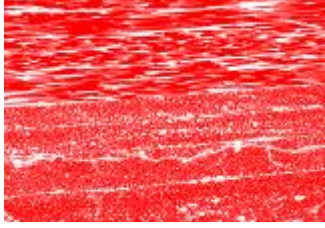
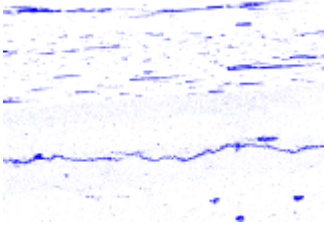
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
12_5X_1	74,452	2,487	23,061
			
12_5X_2	76,096	2,586	21,318
			
12_5X_3	64,240	2,780	32,980
			
12_5X_4	74,817	2,120	23,064
			
12_5X_5	64,958	3,815	31,227

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
12_10X_1A	65,240	3,907	30,853
			
12_10X_1B	63,568	4,122	32,311
			
12_10X_1C	56,818	4,020	39,162
			
12_10X_1D	62,139	3,984	33,878
			
12_10X_1E	64,729	3,970	31,301

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
12_10X_2A	70,931	1,907	27,161
			
12_10X_2B	71,245	1,798	26,957
			
12_10X_2C	67,344	2,329	30,327
			
12_10X_2D	65,696	2,144	32,160
			
12_10X_2E	65,657	2,784	31,560

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
12_10X_3A	66,237	3,370	30,393
			
12_10X_3B	66,429	2,705	30,867
			
12_10X_3C	64,872	2,710	32,418
			
12_10X_3D	72,794	3,388	23,818
			
12_10X_3E	71,042	6,090	22,868

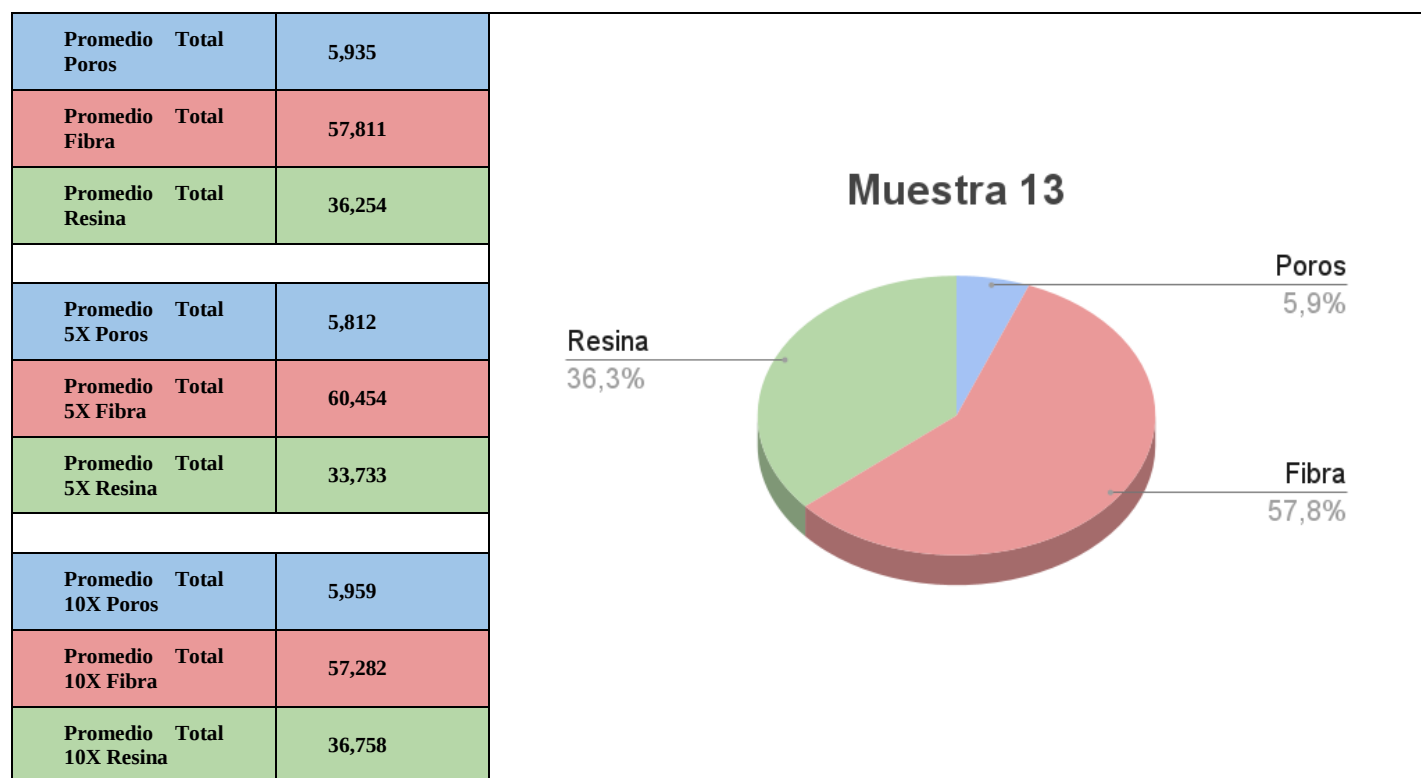
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
12_10X_4A	71,027	2,563	26,410
			
12_10X_4B	72,001	1,868	26,132
			
12_10X_4C	67,363	2,787	29,850
			
12_10X_4D	64,098	2,400	33,501
			
12_10X_4E	66,468	2,063	31,469

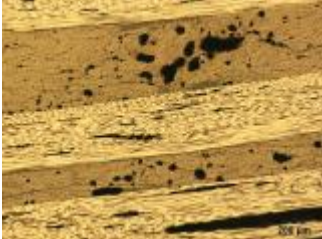
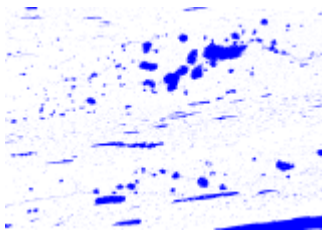
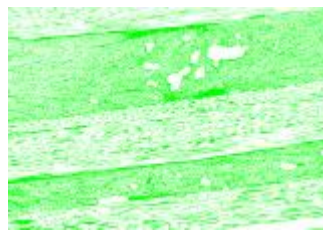
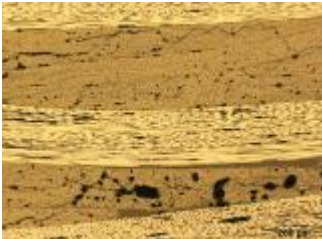
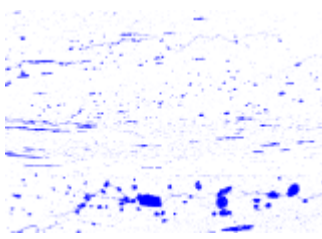
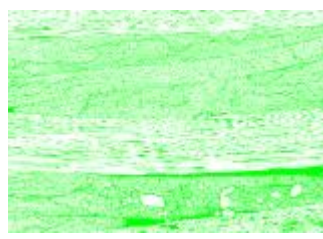
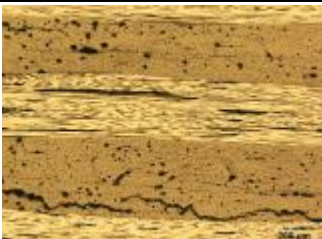
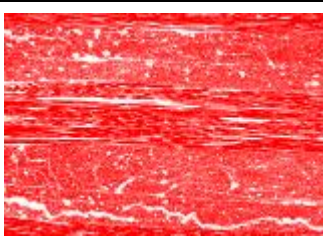
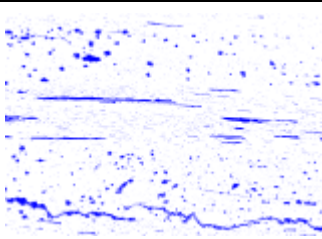
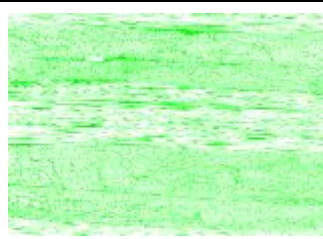
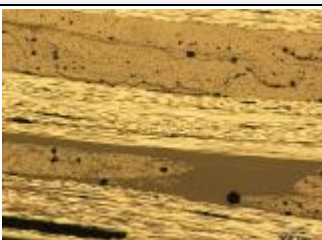
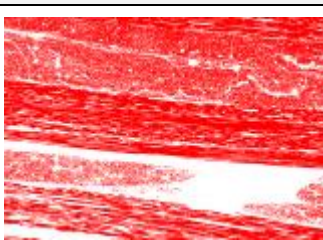
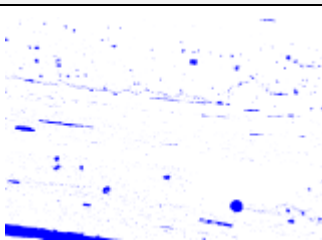
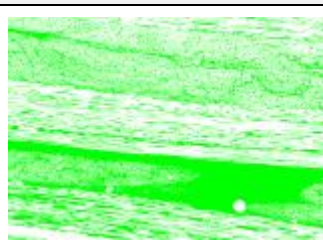
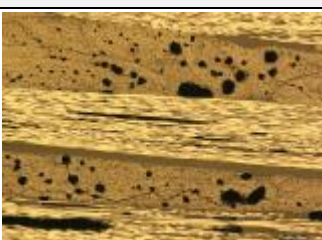
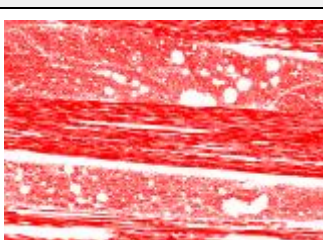
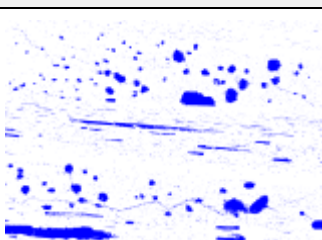
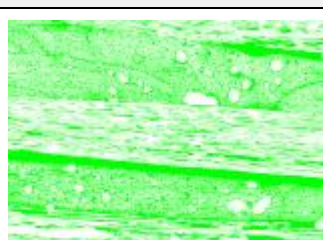
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
12_10X_5A	59,291	3,821	36,888
			
12_10X_5B	57,077	4,241	38,682
			
12_10X_5C	59,492	4,506	36,002
			
12_10X_5D	61,534	2,843	35,623
			
12_10X_5E	67,634	3,619	28,746

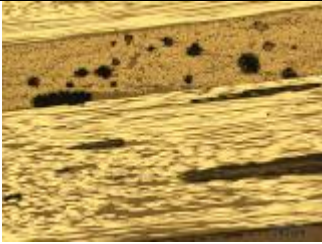
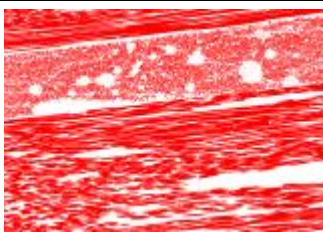
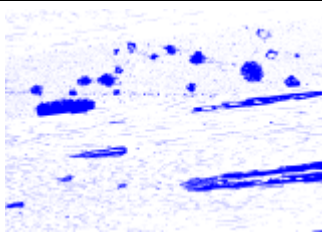
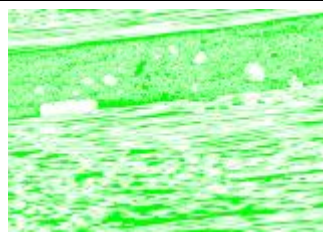
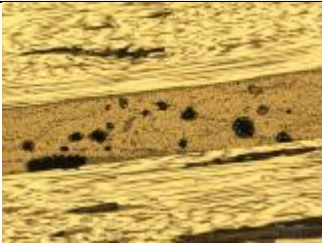
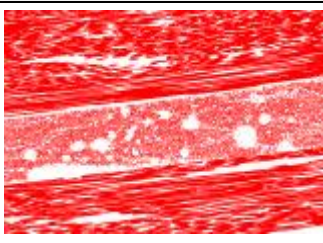
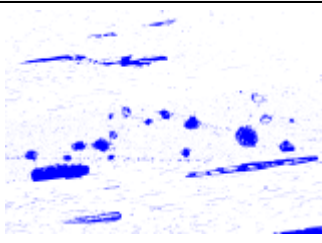
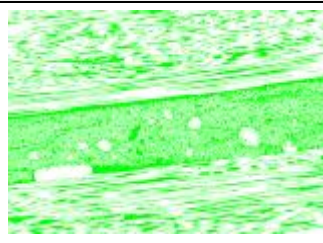
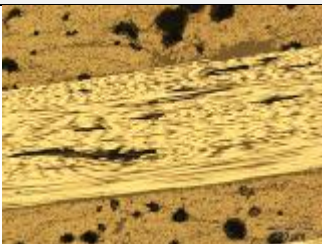
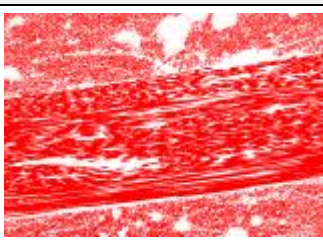
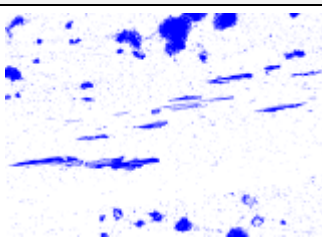
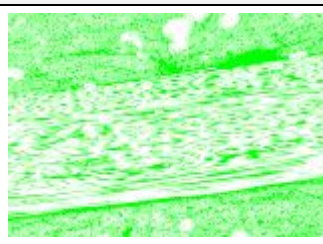
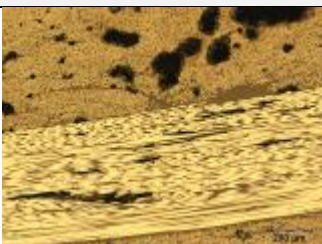
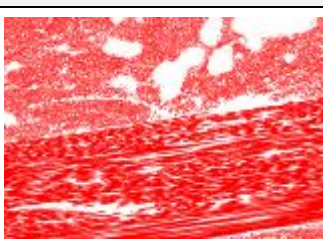
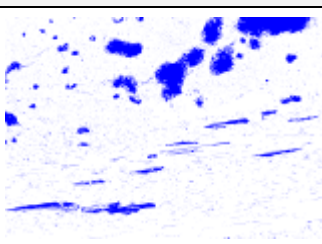
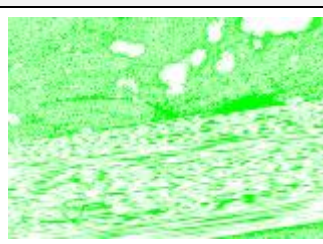
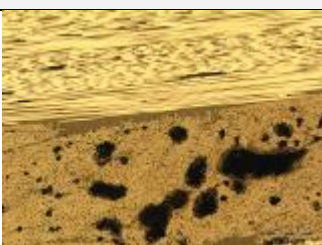
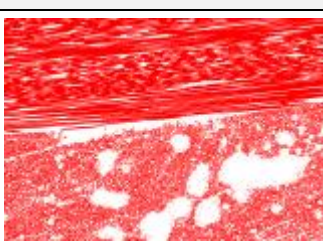
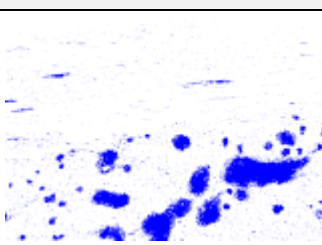
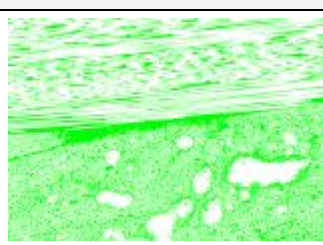
A.3.9 Micrografías pertenecientes a la Corrida 13.

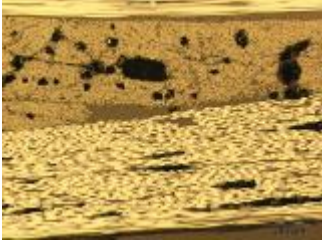
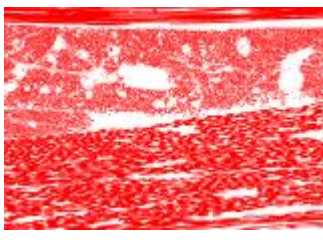
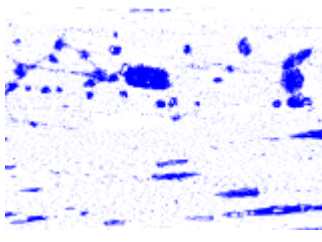
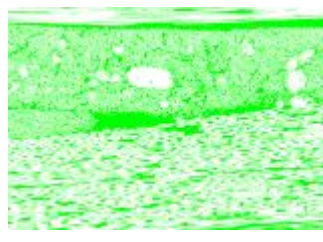
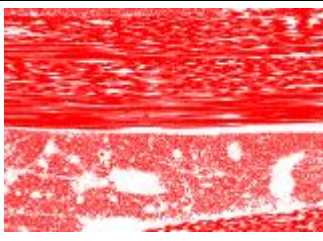
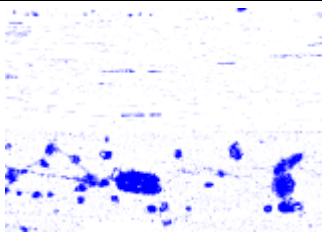
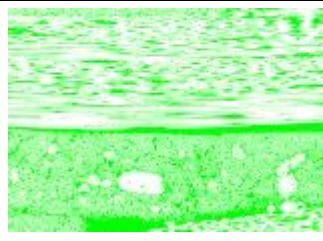
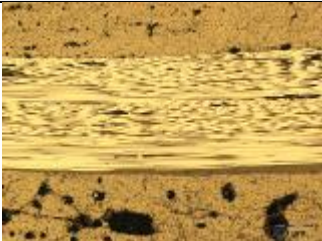
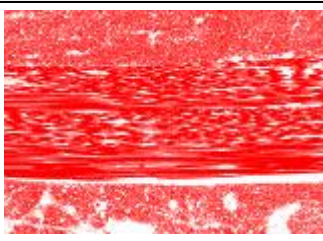
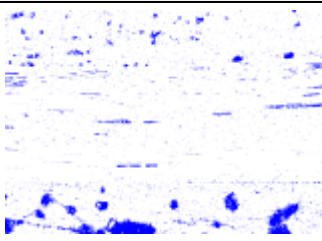
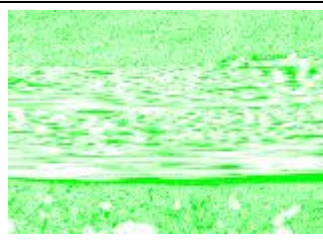
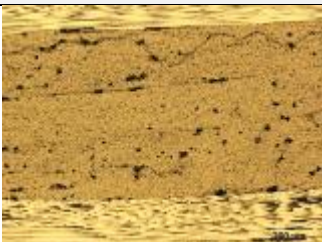
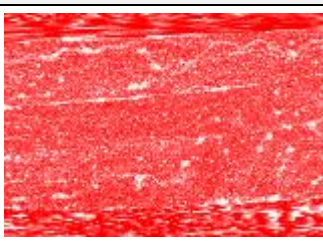
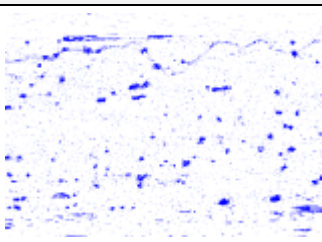
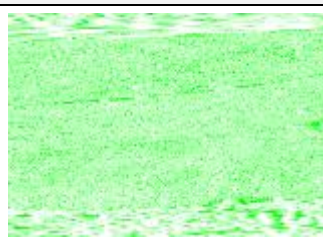
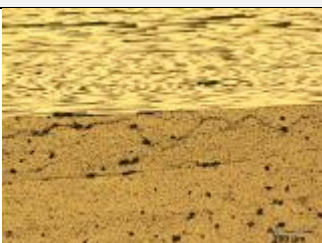
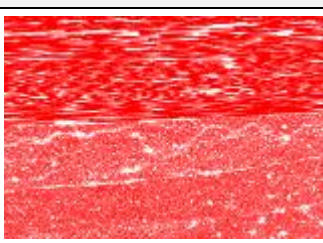
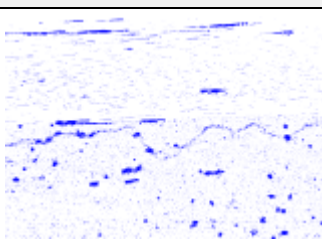
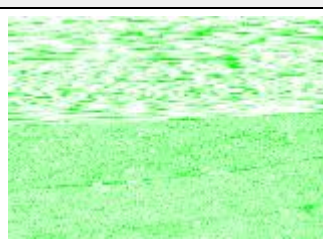
Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

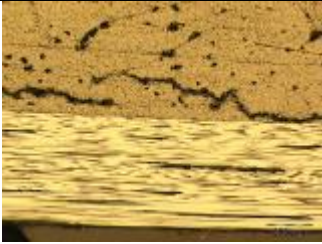
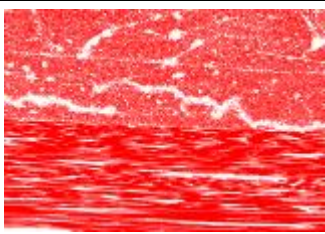
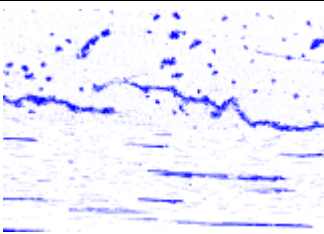
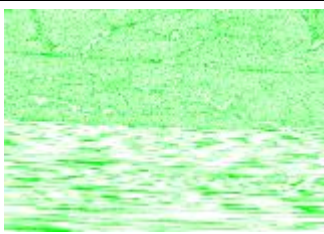
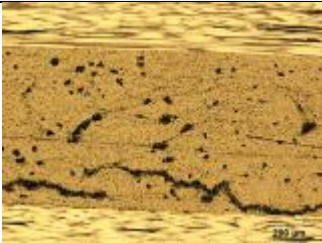
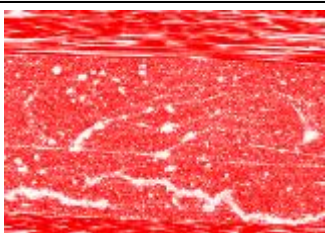
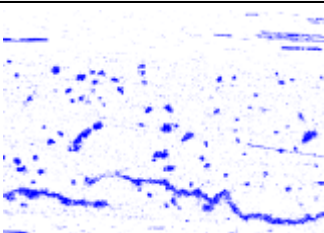
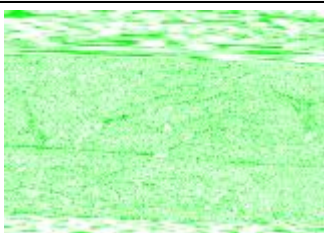
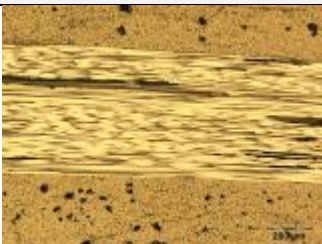
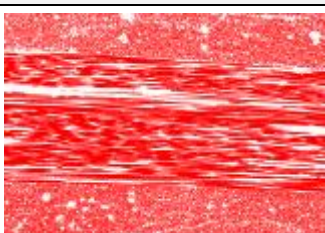
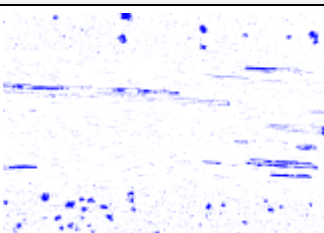
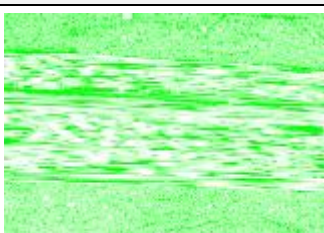
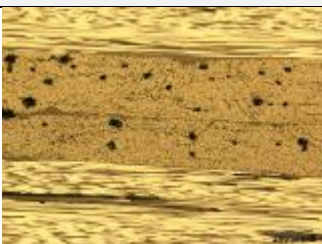
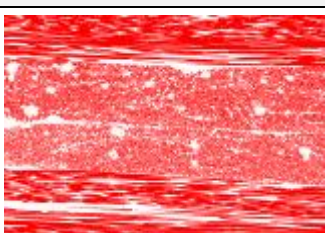
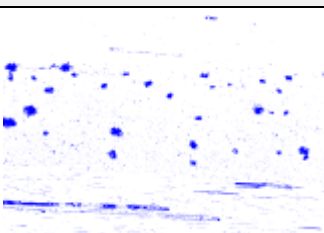
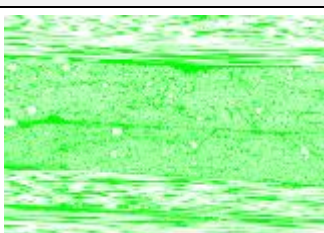
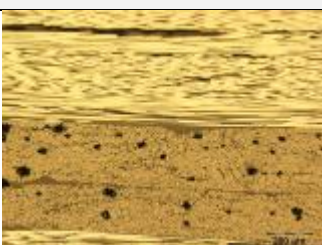
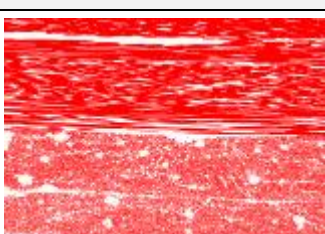
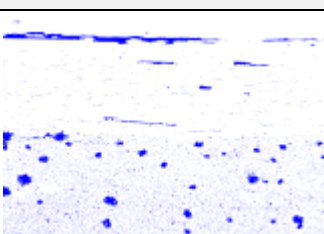
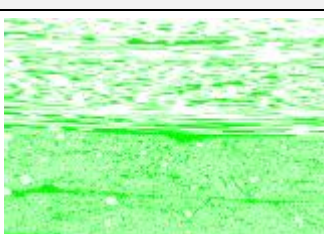
Tabla A.3.9: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 13.

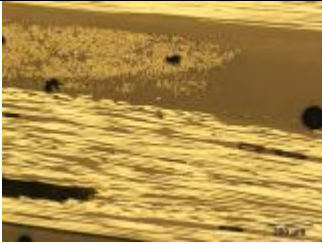
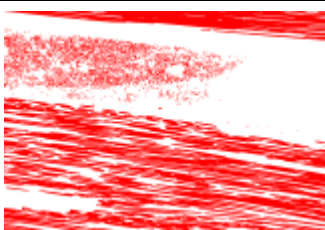
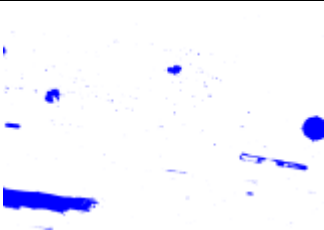
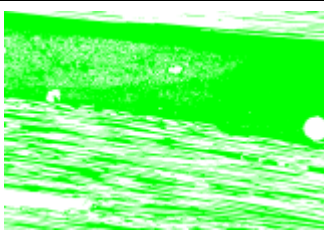
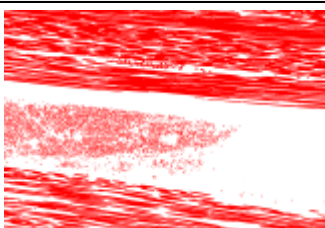
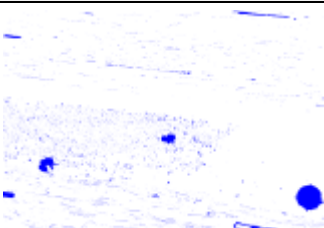
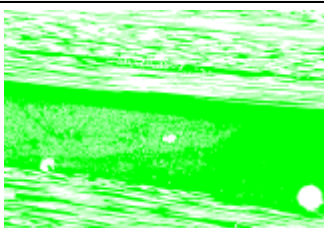
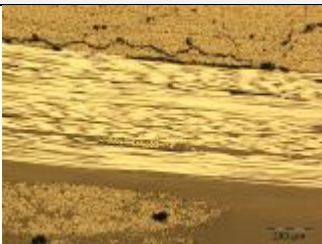
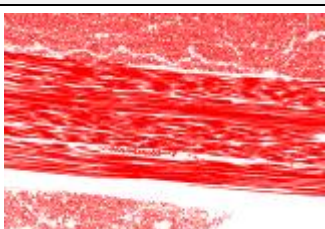
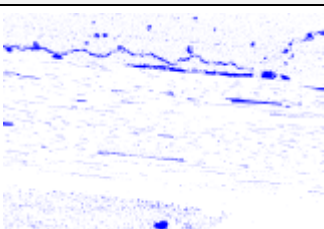
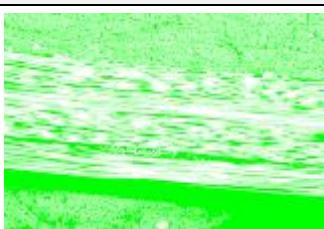
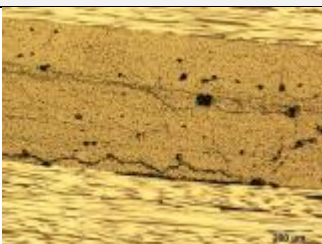
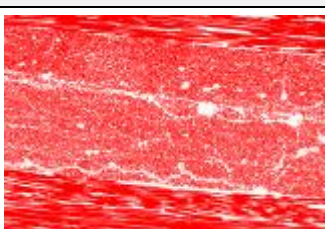
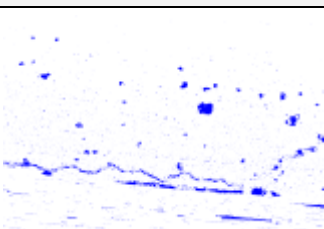
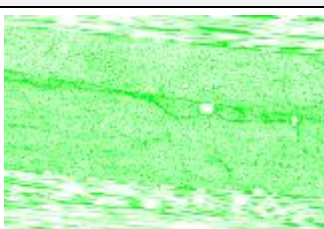
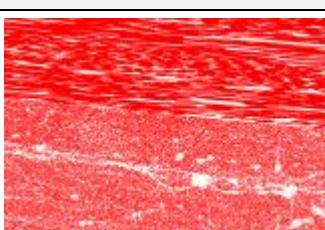
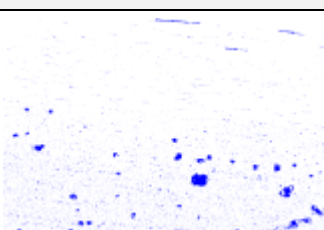
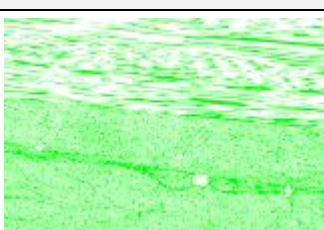


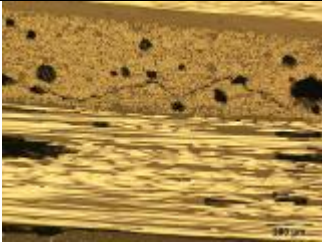
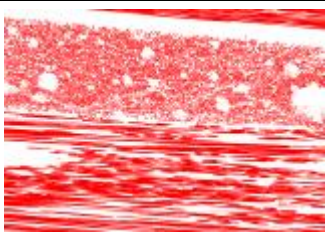
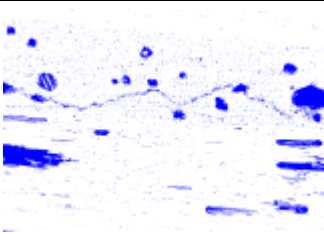
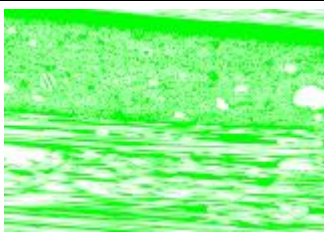
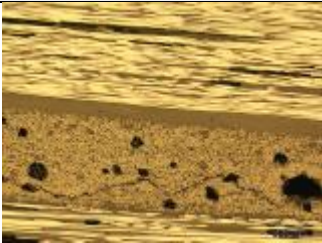
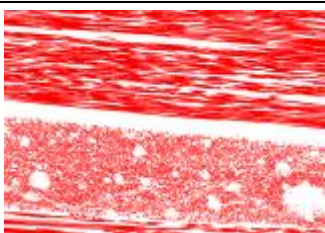
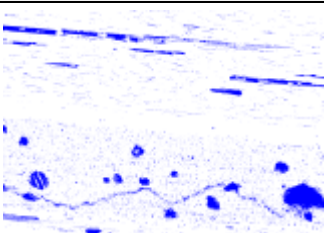
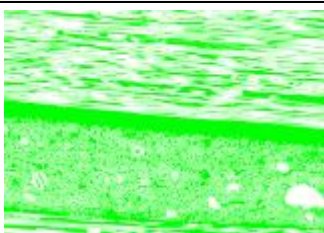
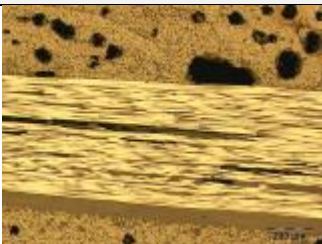
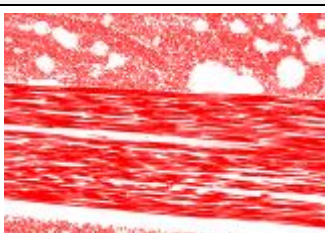
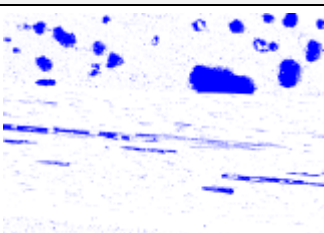
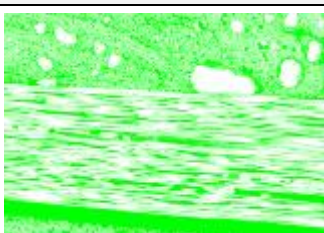
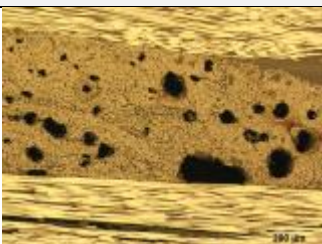
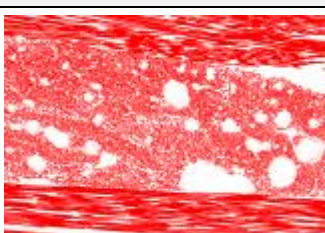
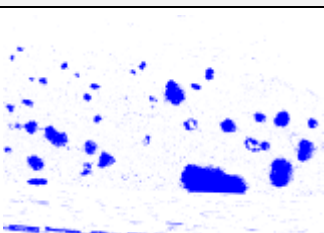
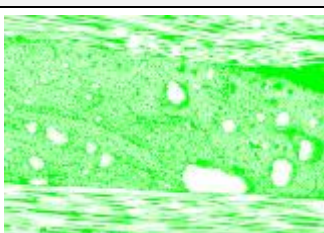
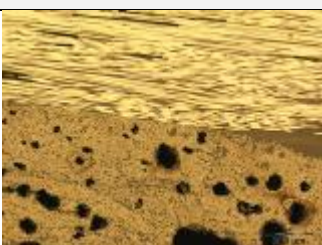
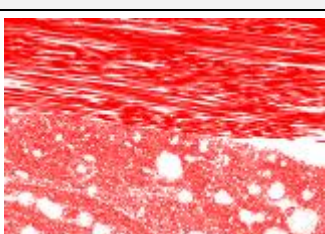
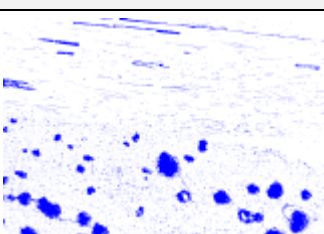
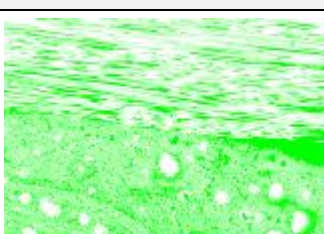
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
13_5X_1	61,715	7,830	30,455
			
13_5X_2	65,999	4,422	29,579
			
13_5X_3	66,654	5,561	27,785
			
13_5X_4	55,972	3,079	40,949
			
13_5X_5	51,931	8,170	39,899

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
13_10X_1A	56,460	9,588	33,952
			
13_10X_1B	61,003	6,137	32,860
			
13_10X_1C	59,520	7,509	32,971
			
13_10X_1D	56,615	9,392	33,994
			
13_10X_1E	58,016	9,263	32,721

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
13_10X_2A	56,081	8,955	34,964
			
13_10X_2B	59,749	5,965	34,286
			
13_10X_2C	63,561	5,272	31,166
			
13_10X_2D	65,634	4,350	30,015
			
13_10X_2E	66,924	4,383	28,694

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
13_10X_3A	65,915	6,241	27,844
			
13_10X_3B	64,723	6,296	28,980
			
13_10X_3C	60,856	3,240	35,904
			
13_10X_3D	58,541	3,080	38,379
			
13_10X_3E	62,575	5,146	32,279

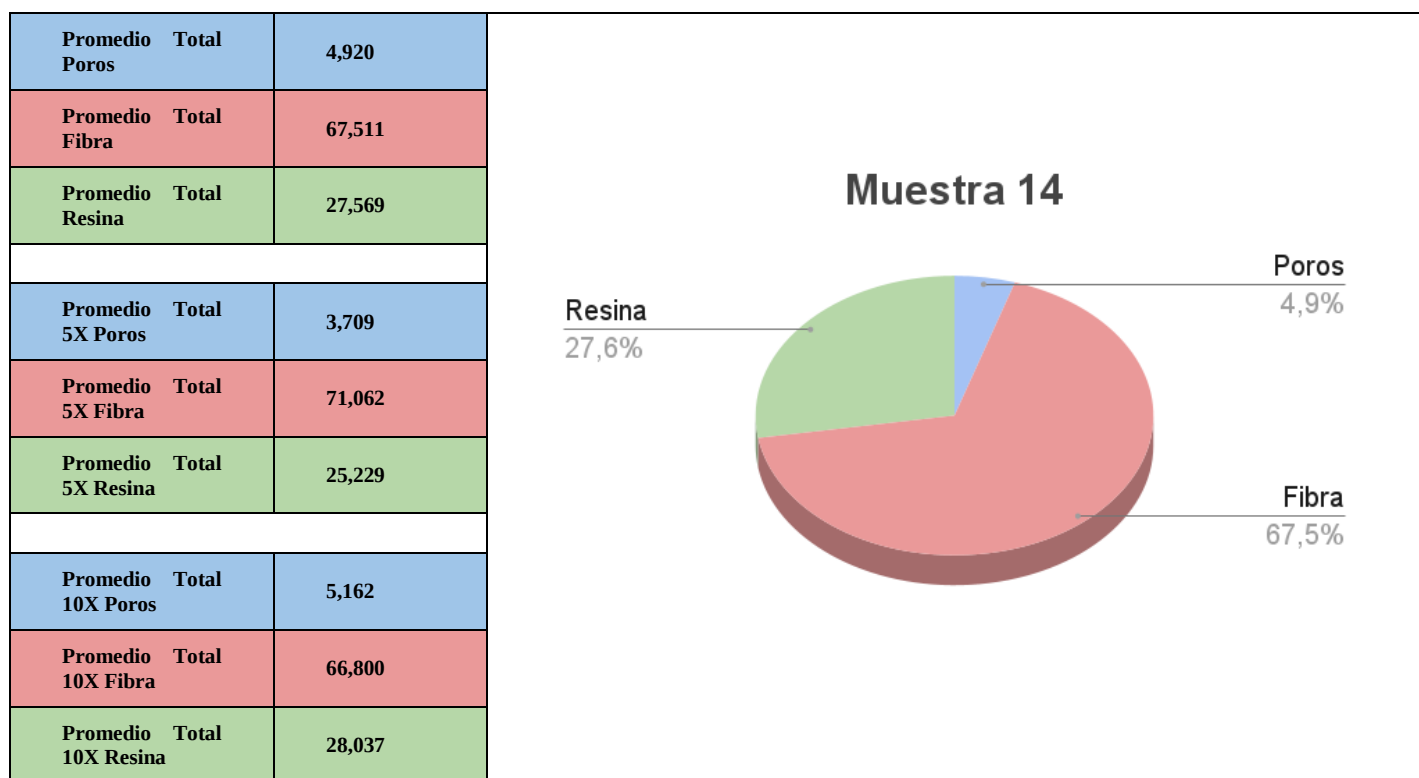
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
13_10X_4A	38,688	3,499	57,812
			
13_10X_4B	42,560	2,867	54,574
			
13_10X_4C	53,100	4,045	42,855
			
13_10X_4D	63,812	2,712	33,475
			
13_10X_4E	65,347	2,825	31,828

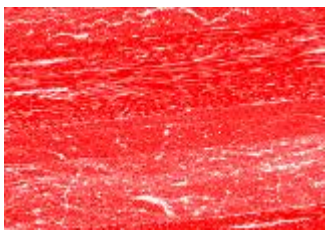
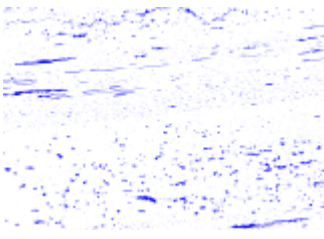
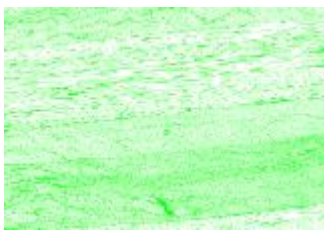
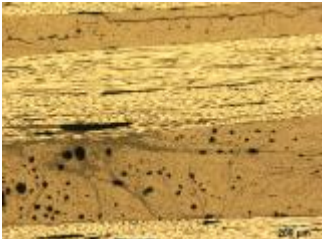
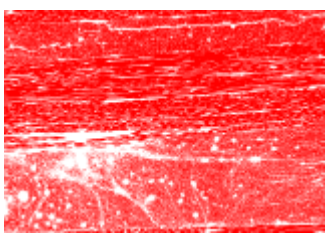
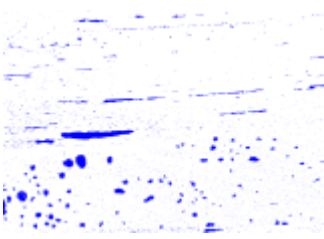
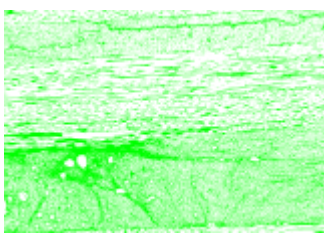
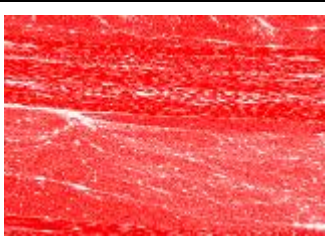
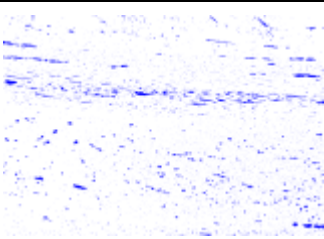
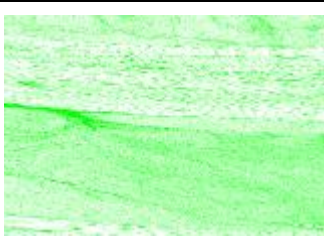
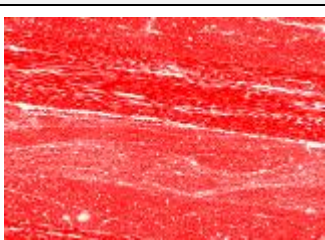
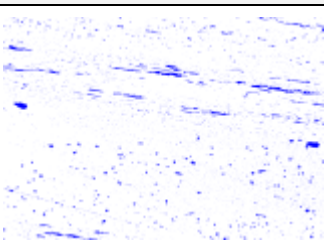
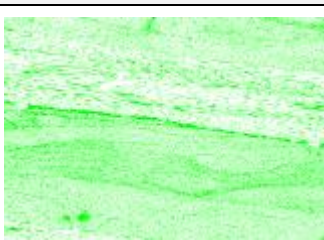
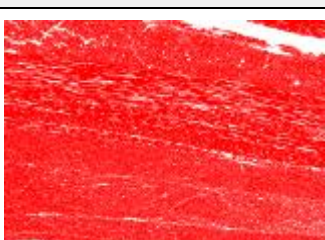
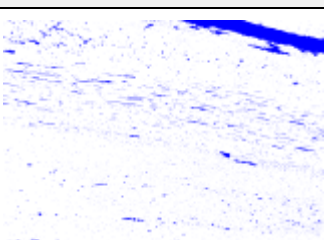
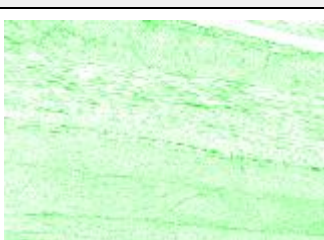
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
13_10X_5A	43,967	6,985	49,047
			
13_10X_5B	47,887	7,068	45,046
			
13_10X_5C	50,137	8,421	41,441
			
13_10X_5D	53,468	8,028	38,504
			
13_10X_5E	56,922	7,716	35,362

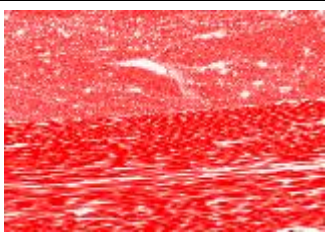
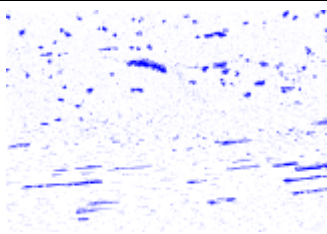
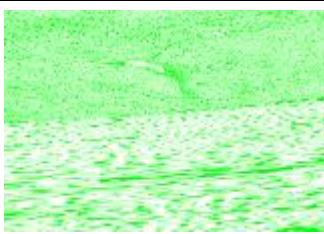
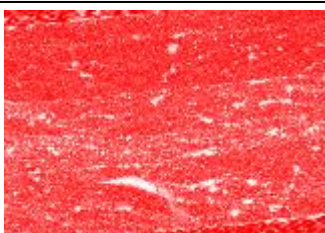
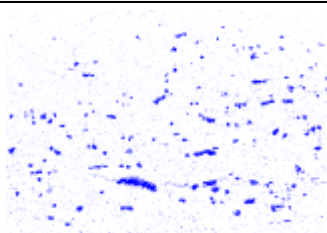
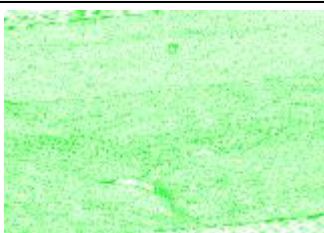
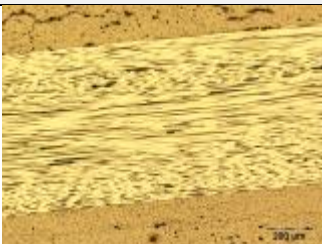
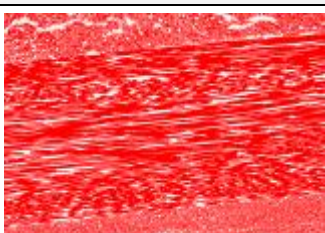
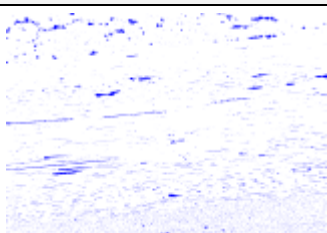
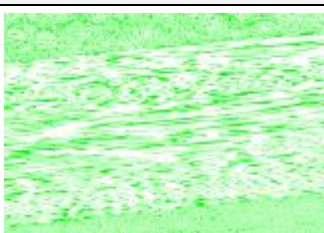
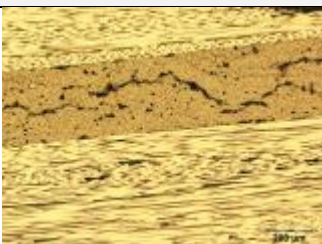
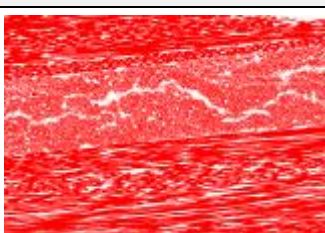
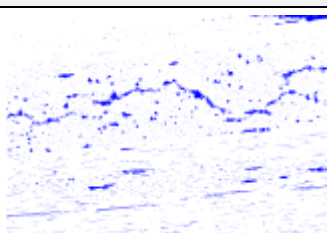
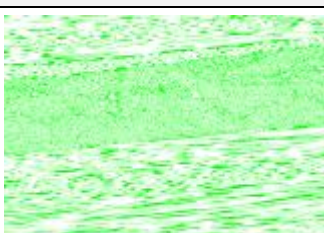
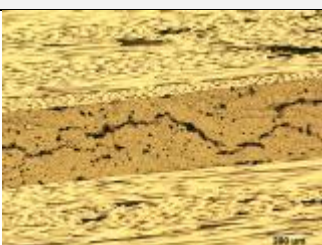
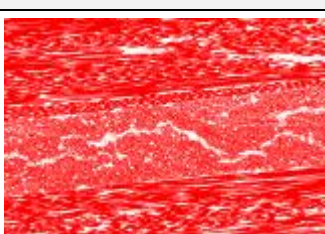
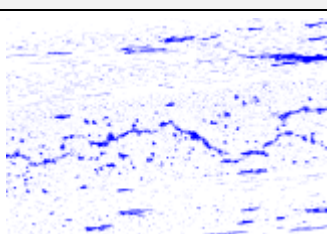
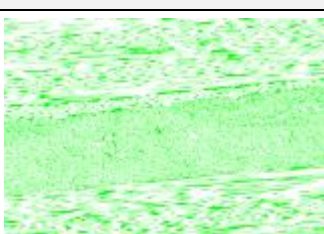
A.3.10 Micrografías pertenecientes a la Corrida 14.

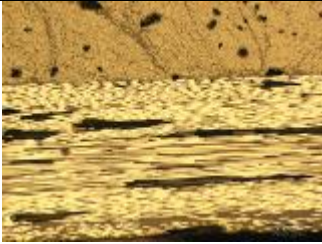
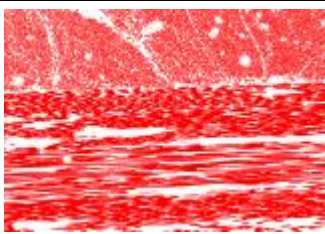
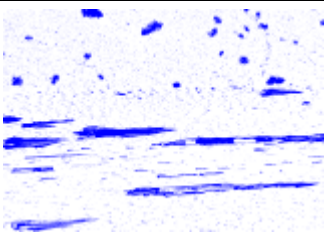
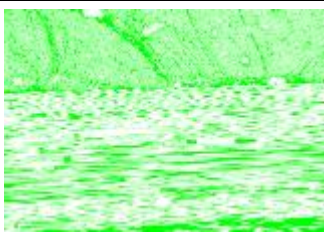
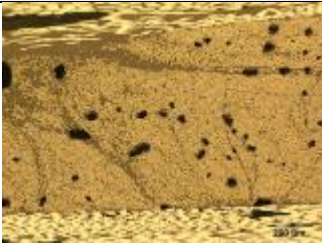
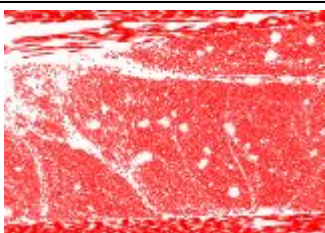
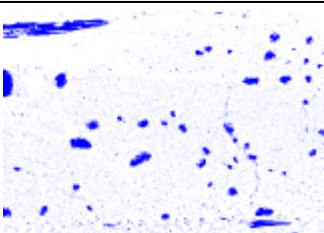
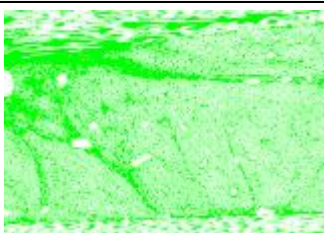
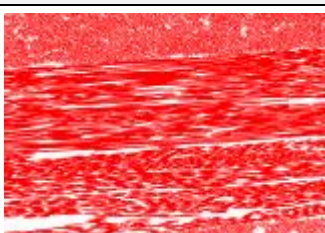
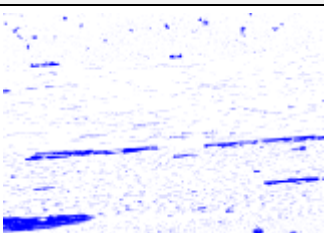
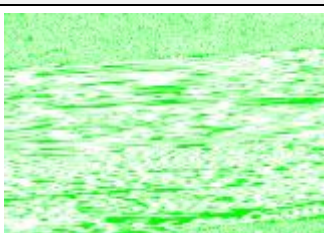
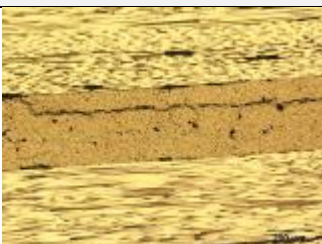
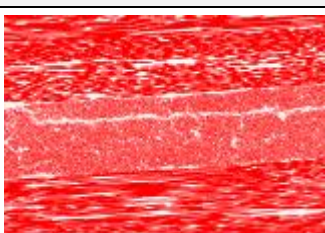
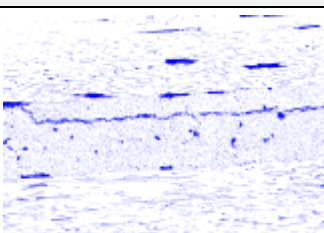
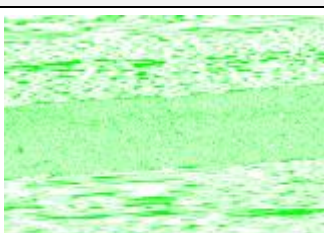
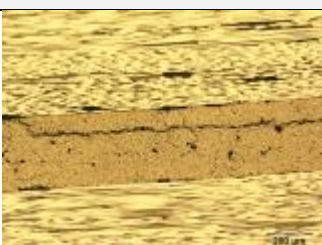
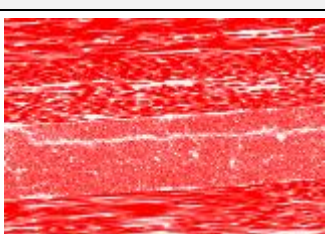
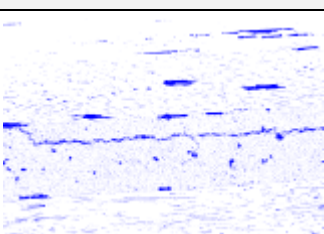
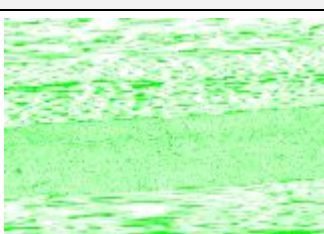
Los resultados del cálculo del porcentaje de fibra, de resina y poros se presenta a continuación:

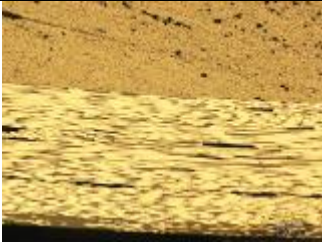
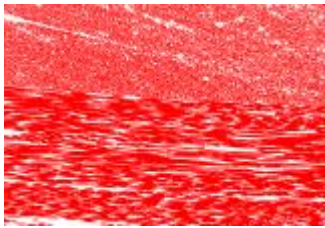
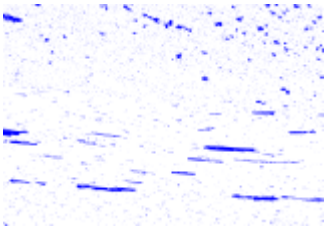
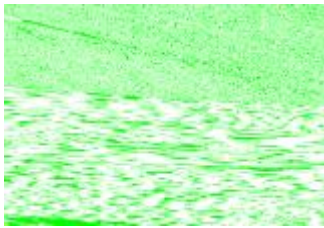
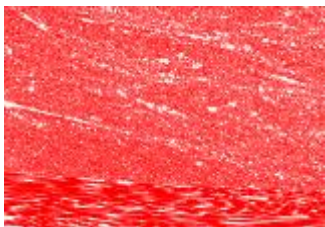
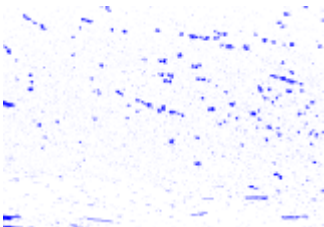
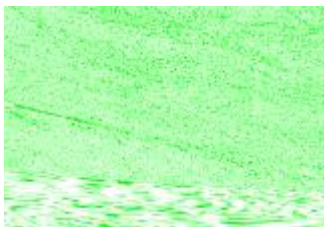
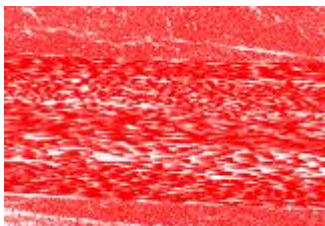
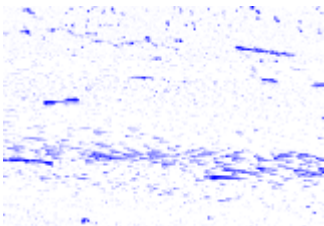
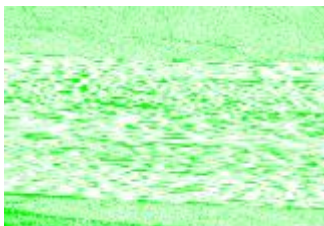
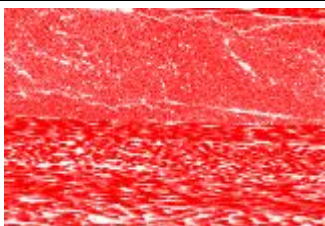
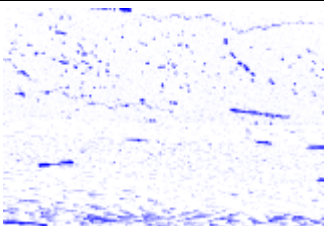
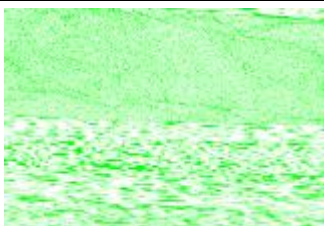
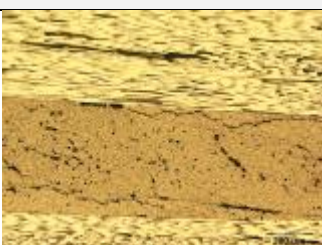
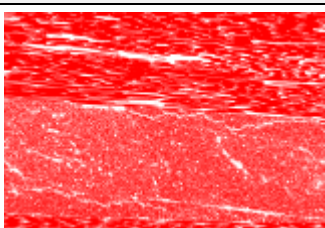
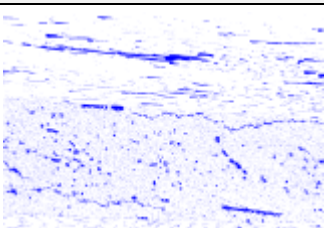
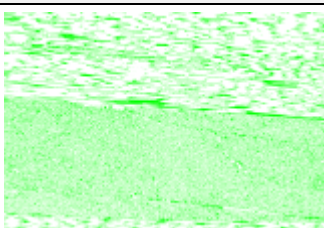
Tabla A.3.10: Resumen de datos de porcentajes de Fibra, Resina y Poros de la Muestra 14.

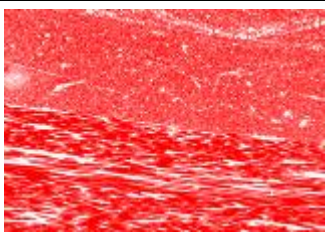
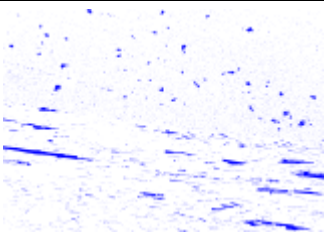
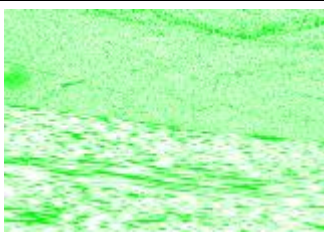
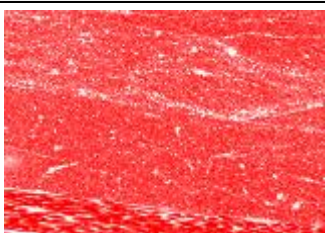
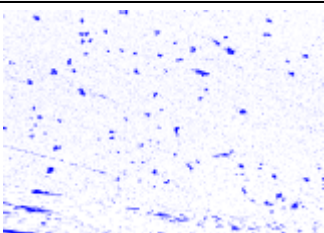
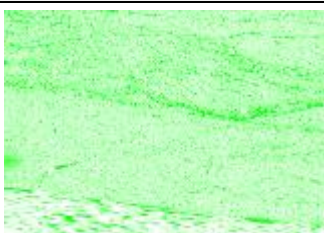
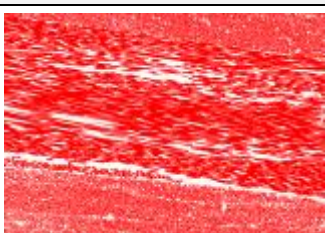
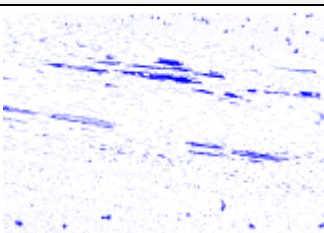
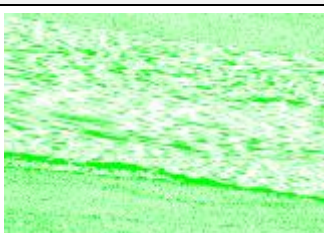
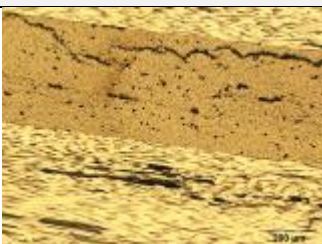
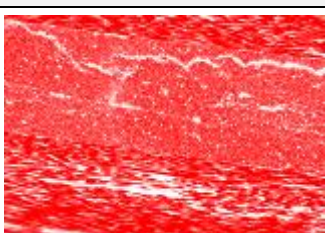
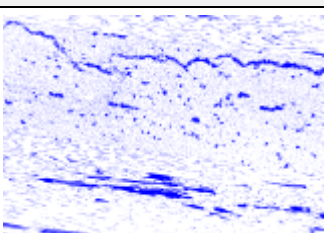
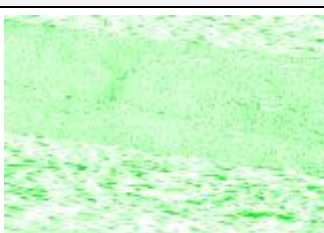
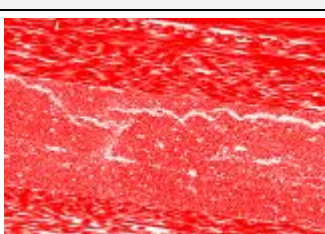
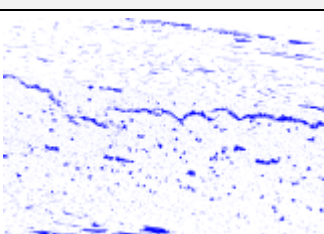
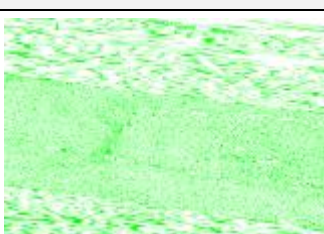


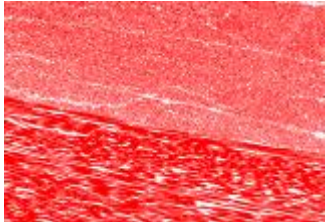
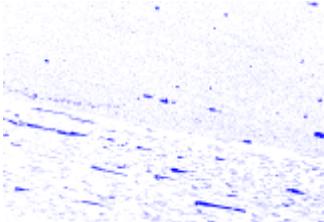
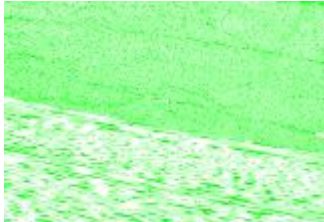
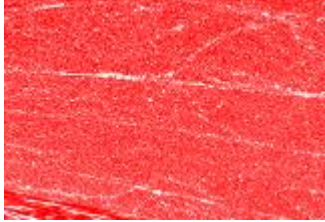
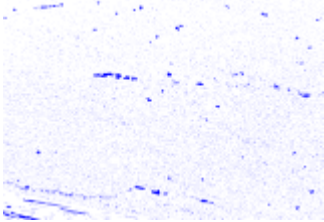
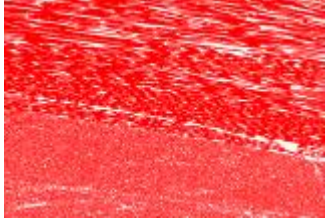
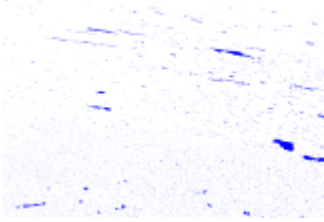
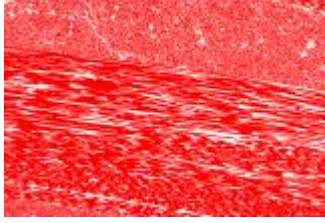
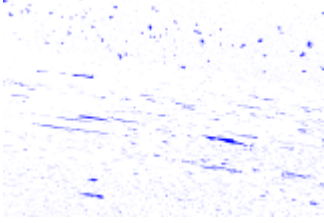
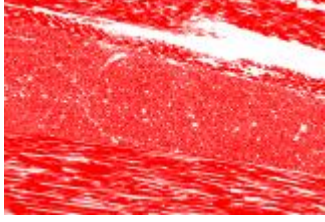
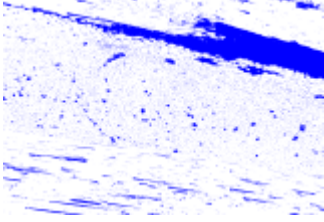
Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
14_5X_1	72,063	3,533	24,404
			
14_5X_2	66,374	3,551	30,075
			
14_5X_3	69,650	3,313	27,037
			
14_5X_4	69,801	2,967	27,231
			
14_5X_5	77,421	5,181	17,398

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
14_10X_1A	65,026	4,211	30,763
			
14_10X_1B	67,746	3,995	28,259
			
14_10X_1C	70,994	3,125	25,880
			
14_10X_1D	69,019	4,096	26,885
			
14_10X_1E	69,840	6,216	23,944

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
14_10X_2A	58,239	8,184	33,577
			
14_10X_2B	52,706	6,704	40,590
			
14_10X_2C	66,700	4,984	28,316
			
14_10X_2D	67,782	6,749	25,469
			
14_10X_2E	68,268	4,953	26,778

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
14_10X_3A	68,043	3,731	28,226
			
14_10X_3B	65,697	2,918	31,385
			
14_10X_3C	67,975	4,576	27,449
			
14_10X_3D	67,407	4,499	28,095
			
14_10X_3E	70,569	6,713	22,719

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
14_10X_4A	65,882	3,777	30,341
			
14_10X_4B	66,687	4,585	28,728
			
14_10X_4C	66,037	4,264	29,700
			
14_10X_4D	67,934	10,901	21,166
			
14_10X_4E	69,133	6,035	24,832

Micrografía	% Fibra	% Poros	% Resina
			
14_10X_5A	62,554	3,689	33,757
			
14_10X_5B	68,510	3,532	27,958
			
14_10X_5C	71,391	1,943	26,666
			
14_10X_5D	69,437	2,061	28,502
			
14_10X_5E	66,431	12,617	20,952

Anexo 4: Cámara de control de temperatura multipropósito

En el siguiente anexo se pretende sentar las bases y al menos un esquema de un dispositivo que permita solucionar los siguientes problemas relacionados al proceso de EF y medición de las TR:

- Ajuste al modelo teórico de *Tensiones Residuales*.
- Calentamiento del mandril previo al proceso de laminación a 80°C.
- Realización del proceso de curado rotativo.

Se propone para trabajos futuros, estudiar en una mejora de los modelos para predecir TR. La motivación de esto es que hay que tener en cuenta la contracción química que tiene un compuesto, además del comportamiento visco-elástico del mismo, y la tensión aplicada en el proceso de EF.

Según lo revisado en la literatura, a la temperatura de curación del compuesto, la TCL predice un estado de deformación cero, sin embargo, hay una cantidad significativa de deformación medida experimentalmente. Esto se debe al fenómeno de contracción química, que la TCL no tiene en cuenta. Habría hasta casi un 25% de contracción química debido al proceso de curado y en base a esto, un error mayor al 25% es normal en el cálculo de las TR con la TCL original (sin tener en cuenta todavía el comportamiento viscoelástico). Por lo tanto, la modificación debe implementarse en la TCL original para compensar el error. Al modificar la formulación original de TCL para incluir variaciones en las propiedades del material en función de la temperatura y las contribuciones químicas de contracción, podemos predecir el comportamiento de un laminado multidireccional.

El comportamiento viscoelástico durante la curación y, en particular, el comportamiento termo-reológicamente complejo es difícil de caracterizar y modelar con precisión para un compuesto. Se debe utilizar una ecuación constitutiva viscoelástica para describir el comportamiento tensión-deformación de un laminado compuesto de matriz polimérica. La naturaleza del problema termo-químico-viscoelástico a menudo involucra geometría compleja

de piezas y condiciones de contorno, produciendo fuertes efectos 3D e impidiendo el uso de modelos TCL o 2D. La deformación, la contracción y las TR son causadas por la compleja interacción de la transferencia de calor, el curado y las propiedades viscoelásticas. Para comprender cómo interactúan estos fenómenos, se requiere un modelo que tenga en cuenta los tres efectos. Los trabajos recientes modelan todo el ciclo de curación para el cálculo de las tensiones y tienen en cuenta otras fuentes de generación de TR, como las deformaciones de contracción de curado o la interacción herramienta-pieza, produciendo así modelos más complejos y precisos.

Por otra parte se desea completar a futuro el DOE original con 16 corridas. Para esto se debe calentar y controlar adecuadamente la temperatura del mandril. Lo más sencillo sería con mantas térmicas¹ previo al proceso. Pero dado que es un elemento caro, se propone utilizar el mismo dispositivo que el que se propone para el curado y para estudiar las TR. Esto conllevaría que se caliente el mandril previo al montaje en la máquina para realizar la laminación a una temperatura superior a la requerida que es de 80°C, supongamos, unos 90°C, de manera tal que cuando inicie el proceso esto ocurra a los requeridos 80°C (se requiere transportar el mandril desde la cámara donde se está calentando a la máquina de EF y preparar todo para iniciar el proceso, en ese intervalo el mandril se enfriaría un poco). La medición de la temperatura se realizará a futuro mediante una cámara térmica recientemente adquirida por el Departamento de Materiales Compuestos del CAC.

Por otra parte, durante la cura de los tubos mediante autoclave, se observó que la parte inferior quedaba con exceso de gotas y resina. Esto provoca un gradiente de espesores medible. Para evitar esto, se propone un horno de curado que, mediante un motor acoplado, gire el eje, de manera tal que este quede girando durante todo el proceso de curado. Además, el autoclave actual utilizado en el CAC es de dimensiones enormes porque está pensado para otras funcionalidades. Tiene por tanto una mejora en cuanto al autoclave del CAC debido a una menor inercia térmica, la manutención es más sencilla y tiene menores dimensiones.

Se propone entonces un dispositivo, cuyo esquema se muestra en la **Figura A.4.1**. Cuenta con un horno fabricado de mampostería; un motor eléctrico con reducción externo al horno

¹ <https://www.elementoscalefactores.com/aplicaciones-es/manta-aerogenerador.htm>,
<https://www.elementoscalefactores.com/aplicaciones-es/mantas-cables-alta-tension.htm>,
<https://fareresistencias.com.ar/mantas-calefactoras/>.

(en azul); dos bujes con rodamientos (en rojo), en donde se apoya el mandril para que gire libremente, una junta universal para acoplar con el motor externo (una mejor vista del conjunto motor-reductor y el acoplamiento al eje del mandril se muestra en la [Figura A.4.2](#)); las resistencias para el calentamiento (en verde); las señales para controlar la temperatura y las señales para cuando se desea realizar otras experiencias, como la de medir las TR en línea (en rojo); junto a ellas está un Controlador Lógico Programable (en amarillo) que controla las resistencias en base a la señal de los sensores de temperatura; se completa el conjunto con una tapa liviana de aluminio aislada con fibra de vidrio para lograr la hermeticidad y aislación de la cámara del horno durante el proceso.

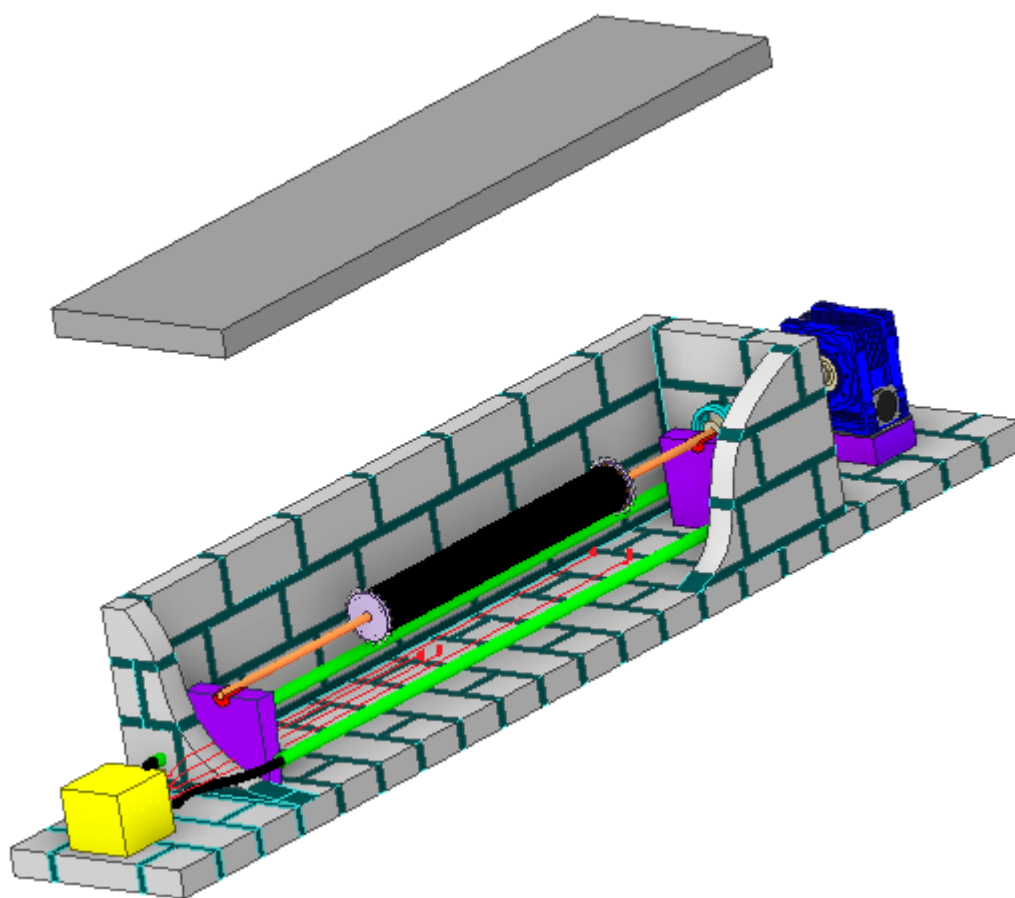


Figura A.4.1: Cámara de control de temperatura multipropósito.

La mampostería se propone como material por su sencillez de fabricación (no requiere personal calificado para fabricar la misma). Además es sencillo realizar orificios en los ladrillos refractarios, una vez fraguado el cemento. Los ladrillos propuestos son tipo K26,

que soportan 1400°C. El mortero refractario debe ser el que recomiende el fabricante según el tipo de ladrillo.

- Ejemplo de ladrillo térmico refractario:
<https://anper.net/productos/416/construccion-de-hornos/re005636-ladrillo-refractario-aislante-230x114x64-1300-c-t-23>.
- Ejemplo de mortero térmico:
<https://anper.net/productos/963/construccion-de-hornos/cemento-mortero-liquido-al-40h>.
- Ejemplo de lana de aislamiento térmica:
<https://anper.net/productos/414/construccion-de-hornos/re005607-fibra-ceramica-rollo-25x7320x610-1260-c-uso-profesional>.

La termocupla puede ser tipo J o K y el sistema de control Arduino® o similar. Las resistencias deben ser del tipo industrial y el sistema debe tener un reóstato para controlar la potencia de las resistencias. Es preferible un sistema de muchas resistencias pequeñas a uno con pocas resistencias pero de mayor tamaño. Esto para reducir la inercia térmica.

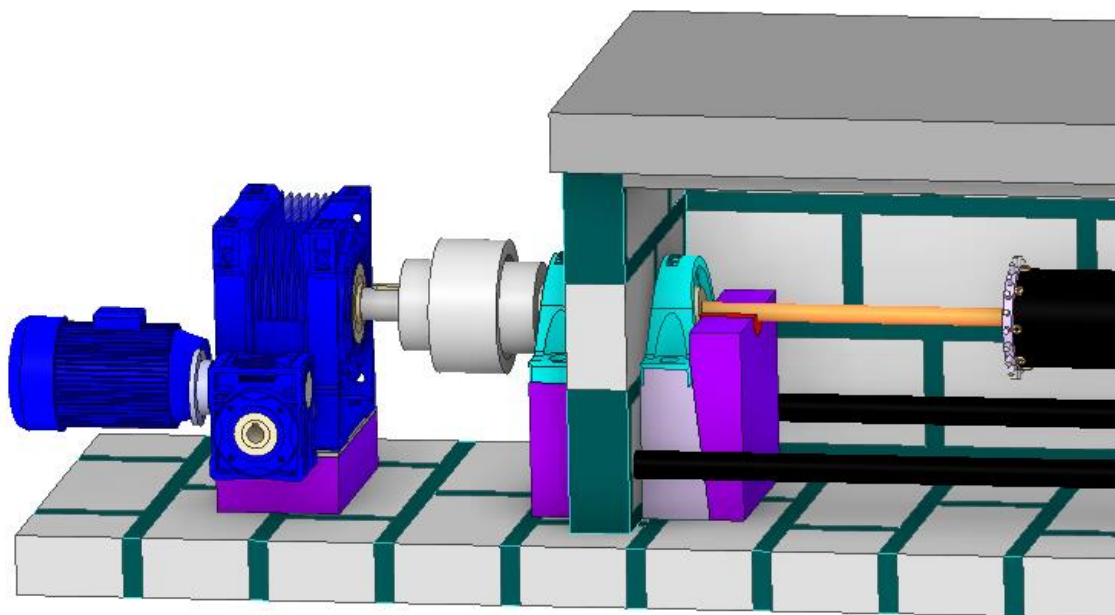


Figura A.4.2: Cámara de control de temperatura multipropósito: Detalle del motor y acoplamiento al eje.

Referencias.

- A. I. Lurie (Eds.) (2005). "Theory of Elasticity". Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ana María Monti (1997). Apunte "Defectos en cristales". Buenos Aires, Instituto Sábato.
- Antonio Miravete (Eds.) (2007). "Materiales compuestos. Vol. 1". Barcelona, Reverté.
- ASTM D 2290 -04, "Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe".
- Barbero, E. J. y Luciano (1995), R. Int. Journal Solids Structures Vol. 32, N° 13, (pp. 1859-1872). London, UK: Elsevier Science.
- Brian Hayes & Luther Gammon (2010). "Optical Microscopy of Fiber Reinforced Composites". Ohio, USA. ASM International.
- Catálogo de Vishay® Micro-measurements & SR-4. Datos técnicos de la Galga Extensiométrica. Recuperado el 15/11/2023 del sitio <https://www.ibselectronics.biz/pdf/cat500.pdf>.
- C. Kang et al. (2018). "Determination of residual stress and design of process parameters for composite cylinder in filament winding". Adv. Mater. Sci. Eng. 1821342 1–11.
- D. Cohen (1997) – Influence of filament Winding Parameters on Composite Vessel Quality and Strength.
- Dumanli, A.G., Windle, A.H. (2012), "Carbon fibres from cellulosic precursors: A review", Journal of Materials Science 47(10), pp. 4236-4250.
- E. J. Barbero (2011). "Introduction to composite materials design". (2da. Edición). Boca Ratón, FL.: Taylor and Francis Group, CRC Press.
- E. J. Barbero (2014). "Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS". (2da. Edición). Boca Ratón, FL.: Taylor and Francis Group, CRC Press.
- G. S. Schajer (2013). "Practical Residual Stress Measuring Methods". Sussex, Reino Unido. John Wiley & Sons Ltd.
- Humberto Gutiérrez Pulido (2008). "Análisis y diseño experimentos". México DC, McGrawHill.

- J. W. Kim and D. G. Lee (2005). "Measurement of residual stresses in thick composite cylinders by the radial-cut-cylinder-bending method," Composite Structures, vol. 77, no. 4, pp. 444–456.
- Jones, R. M. (1999). "Mechanics of Composite Materials". (2da. Edición). Washington, D.C.: Taylor and Francis Group.
- Jorge Domínguez Domínguez (2010). "Diseño de experimentos: estrategias y análisis en ciencias e ingenierías". México DC, Alfaomega.
- Koussios S. (2004). "Filament winding: a unified approach" (Tesis Doctoral). Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos.
- Lekhnitskii S. (1968). Anisotropic plates. Gordon and Breach, Science Publishers, Inc. New York.
- Lopez Betancur, D. A. (2022)."Caracterización de resina tipo epoxi en entornos radiactivos utilizada para la fabricación de CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono)". Tesis de Maestría, Instituto sábato.
- M. C. Waterbury and L. T. Drzal (1989) "Determination of Fiber Volume Fractions by Optical Numeric Volume Fraction Analysis," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 8, November 1989, pp. 627 - 636.
- M. Schlottermüller, R. Schledjewski y P. Mitschang (2004) – Influence of Process Parameters in residual Stress in Thermoplastic Filament-Wound Parts.
- Morgan, Peter (2005). "Carbon Fibers and their Composites". Taylor & Francis Group, LLC p. 167-170 / 305-306.
- Myers , D. G. (2004). Method for Measurement of Residual Stress and Coefficient of Thermal Expansion of Laminated Composites , MSc Thesis, University of Florida.
- P. Casari, F. Jacquemin y P. Davies (2006) – Characterization of Residual Stresses in Wound Composite Tubes.
- R. H. Knibbs (1971), "The use of polarized light microscopy in examining the structure of carbon fibres", Journal of Microscopy, 94:273–281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1971.tb02377.x>
- S. Akbari et al. (2012) – Slitting Measurement of Residual Hoop Stresses Through the Wall-Thickness of a Filament Wound Composite Ring.

- S. Nemat-Nasser y M. Hori (1999). “Micromechanics : Overall Properties of Heterogeneous Materials”. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Publishers B.V.
- Seif M.A. (2002). “Determination of residual stresses in thin-walled composite cylinders”. Exp Techniques.;2643–46.
- Shokrieh, M.M.(2014), Residual Stresses in Composite Materials: A volume in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Recupedado el 29 de Marzo de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/book/9780128188170/residual-stresses-in-comp>.
- S. T. Peters (2011). “Composite filament winding”. ASM International.
- Timoshenko, S.P. and Goodier, N.J. (1951). “Theory of Elasticity”. McGraw Hill Publishing Co., New York.
- Toray (2022), Fibras de Carbono de Toray®, Recupedado el 11 de Mayo de 2022, <https://www.toraycma.com/products/carbon-fiber/>.
- Toshio Mura (1987). Micromechanics of Defects in Solids. (2da. Edición). Dordrecht, Holanda: Martinus Nijhoff Publishers.
- Yamamoto G. et al. (2018), “Determination of Full Elastic Constants of Carbon Fiber in Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites”. Sendai, Japón.

Curriculum Vitae.



Gustavo Francisco Eichhorn

Edad: 37 años

Manuel Solá 4671, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

DNI: 32.453.960

ESTUDIOS

- 1998
Gualeguaychú, Entre Ríos
Título: Escuela Primaria
Escuela "La Sagrada Familia"
- 2004
Gualeguaychú, Entre Ríos
Título: Bachiller (Colegio Secundario)
Instituto PIO XII
- 2012:
La Plata, Buenos Aires
Título: Ingeniero Mecánico
Universidad Nacional de La Plata
- 2020:
San Martín, Buenos Aires
Título: Magister Mención Materiales
Instituto Sábató
(Tesis final en curso)
- 2022:
Ciudad Autónoma de Buenos Aires
Título: Full Stack Python

EXPERIENCIA LABORAL

- **NOMBRE DE LA EMPRESA: Nucleoeléctrica S.A.**

De 01/07/2010 a 30/10/2014; Lima-Buenos Aires

Cargo ocupado: Ingeniero Mecánico del Sector de Instrumentación y Control de la CNA 2 (Central nuclear Atucha 2).

Tareas realizadas: Encargado de la transferencia de Armarios de Instrumentación y control al sector de puesta en marcha de la central y la verificación e inspección de los mismos; compras de insumos y herramental necesario para las tareas; dirección y planeamiento de las diversas tareas a realizar. Sistemas supervisados: montaje de instrumentación de la Máquina de Recarga de Elementos Combustibles; Botella Basculante y el Canal de Transferencia; Sistemas pertenecientes a la turbina hidráulica auxiliar; Sistemas del edificio del equipo de la turbina central; sistemas auxiliares del edificio de piletas; sistemas complementarios tales como sistemas de ventilación, sistemas auxiliares del primario y sistemas del secundario.

- **NOMBRE DE LA EMPRESA, U.T.N. (Universidad Tecnológica Nacional, Sede del Delta).**

De Marzo 2013 a Diciembre de 2013; Campana-Buenos Aires

Cargo ocupado: Jefe de Trabajos Prácticos en la cátedra de Termodinámica del 3er año de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Tareas realizadas: Auxiliar del docente titular en la UTN encargado de impartir las clases de Trabajos Prácticos organizadas por la cátedra. Tareas consistentes en explicar los contenidos de la práctica, corregir los trabajos prácticos y también los exámenes de los alumnos. También participar en las clases de consulta.

- **NOMBRE DE LA EMPRESA, C.N.E.A. (Comisión Nacional de energía Atómica, Sede Constituyentes)**

De 03/11/2014 a la actualidad; Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Cargo ocupado: Ingeniero Mecánico perteneciente al Grupo MGSE (Mechanical Ground Support Equipment, Equipos de soporte en tierra mecánicos) perteneciente al Proyecto A.R.A.S. (Antena Radar de Apertura Sintética) del satélite SAOCOM. Tareas de Diseño y cálculo estructural en el Departamento de Tecnología de Materiales Compuestos perteneciente a la Gerencia de Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales.

Tareas realizados: Realización de sólidos de piezas mecánicas en programas de computación CAD, realización de planos y especificaciones técnicas, realización de simulaciones computarizadas para cálculo de solicitaciones mecánicas por métodos de elementos finitos, realización de pliegos para compras mediante Licitaciones y Concursos de Ofertas, realización de compras de insumos y materiales de fabricación, realización de tareas para manipuleo y transporte de los paneles y los módulos radiantes del SAOCOM. Participación en estudios de confiabilidad del CAREM 25 respecto a mecanismos de degradación de reactores, inspección de los mismos mediante ensayos no destructivos. Realización de planos de diseño respecto a diversos mecanismos del Reactor CAREM 25.

IDIOMAS

- **Español:** Natal
- **Inglés:** Nivel Avanzado (Instituto “My English School”, Gualaguaychú, Entre Ríos).
- **Alemán:** Nivel Intermedio (Instituto “La Alianza Francesa”, Gualaguaychú, Entre Ríos).
- **Portugués:** Nivel Básico (Profesora Gabriela Mercado, Ciudad Autónoma de Buenos Aires).

MANEJO DE PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN

- **Programas de CAD:**
Dibujo técnico: AutoCad (Avanzado); Sólidos en 3D: Autodesk inventor (Avanzado), Solid Edge (Intermedio), SolidWorks (Avanzado).
- **Simulación por elementos finitos (para cálculo estructural):**
ANSYS (avanzado); FEMAP (básico).
- **Otros:**
Matlab (avanzado); Origin (avanzado). VSCode.

DESARROLLADOR FULL STACK

Desarrollador con conocimientos sobre las siguientes tecnologías y lenguajes de programación: HTML, CSS, JavaScript, Bootstrap, GIT, GitHub, VUE, MySQL, Python.

FORMACIONES ADICIONALES E INTERESES

- **Curso I.L.V.E.M: Memoria, Oratoria y Lectura veloz**

Abril, Junio 2004 Gualeguaychú, Entre Ríos

- **Curso en CNEA: Materiales para Reactores tipo CANDU**

Marzo 2016 Ciudad Autónoma de Buenos Aires

- **Diplomatura en materiales para la industria nuclear.**

Año 2016, Instituto Sábato, San Martín, Pcia. de Buenos Aires.

- **Curso de posgrado virtual teórico-práctico: “TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE POLÍMEROS/BIOPOLÍMEROS, NANOCOMPUESTOS Y MATERIALES DERIVADOS”**

Año 2020, Universidad Nacional de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

- **Curso de Fundamentos de CAE (Computer Aided Engineering)**

Año 2020, Instituto ESSS Virtual, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

- **Deportes y otras actividades**

Habitualmente natación. Eventualmente fútbol y básquet.