



Universidad
Zaragoza

1542

Trabajo Fin de Grado

Caracterización mediante tomografía industrial de fallos
en proceso productivo de fibra óptica.

Characterization by industrial tomography of faults in
Optical Fiber production process.

- Autor -

Luis Pedro Carbonel Alonso

- Director -

Juan José Aguilar Martín

- Codirector -

Javier Calvo Blasco

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2023-2024



AGRADECIMIENTOS

El esfuerzo, sacrificio, dedicación y entrega a lo largo de todos estos años cursando el grado de ingeniería de tecnologías industriales al fin han dado sus frutos y con mi trabajo de fin de grado logro cerrar una importantísima etapa de mi vida.

Quería agradecer a todos aquellos profesores que a lo largo de toda mi carrera me han atendido muy amablemente en tutorías y que sin ellos no me habría convertido en la promesa de ingeniero que espero llegar a ser, llevando los valores de la universidad en la que estudié, universidad de ingeniería y arquitectura de Zaragoza (EINA).

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi director del proyecto, Dr. Juan José Aguilar Martín. También quería agradecer y dejar constancia de todo el apoyo, enseñanza y supervisión de mi codirector D. Javier Calvo Blasco el cual me ha brindado toda la ayuda necesaria a lo largo de estos meses.

También quería hacer una mención especial del profesor Dr. Miguel Ángel Martínez Barca que supuso en mi trayectoria académica un punto de inflexión y que sin su consejo, apoyo y tutela no habría sido capaz de superar todas las adversidades durante estos años.

Gracias también a toda el cariño y apoyo de amigos, de mi familia y quiero hacer especial mención a mi madre María Teresa Alonso Bartolomé y a mi abuela Carmen Bartolomé Torcal. Este proyecto no existiría de no haber sido por ellos.

Gracias a todos por haber contribuido a lograr mi sueño de ser ingeniero de tecnologías industriales.

RESUMEN

El Trabajo de Fin de Grado descrito a continuación consiste en crear un procedimiento para la caracterización mediante tomografía industrial de los fallos en proceso productivo de fibra óptica.

Dirigido por el Dr. Juan José Aguilar Martín y D. Javier Calvo Blasco, se realiza en el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

Planteamos como objetivo final el desarrollo de un procedimiento en el cual nos permita discernir que cable de micromódulo cumple con las especificaciones de dimensiones geométricas y tolerancias de sus parámetros y cuáles no los cumple.

Hemos tenido en cuenta la posición de las almas (FRP) que van embutidas en la periferia de los cables.

La principal necesidad del proyecto es que sea capaz de adaptarse a diferentes tipos de cables de micromódulos sin perder precisión en las mediciones.

Hemos utilizado el software Zeiss Inspect X-Ray, comúnmente conocido como GOM para generar la malla del volumen 3D reconstruido previamente con el software Metrotom OS tras el tomografiado y así poder analizar los parámetros de interés en las secciones que hemos creado sobre la malla: angularidad, distancias, coaxialidad, Gap.

Posteriormente, Se ha estudiado un análisis de repetibilidad y de variabilidad para el restante de las muestras mediante el cálculo de incertidumbres de medición y a través del Excel poder hacer una comparación de resultados.

Índice

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Objetivo	8
1.2 Alcance	8
1.3 Contenido de la memoria y anexos	9
2 ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1 La fibra óptica	10
2.2 Tipos de fibra óptica	10
2.3 Sección de los cables de micromódulos	11
2.4 Refuerzos en los cables de micromódulos	11
2.5 Proceso productivo de los micromódulos	12
2.6 Tomografía computarizada industrial.....	13
2.6.1 Resumen histórico de la tomografía	13
2.6.2 Concepto de tomografía computarizada	13
3 ESCANEADO TC DE LAS MUESTRAS DE CABLE.....	16
3.1 Descripción de máquina y programas empleados	16
3.2 Preparación de la muestra en la máquina.....	17
3.3 Control de máquina y parámetros de tomografiado.	19
3.4 Mediciones en Zeiss Inspect X-Ray	24
3.4.1 Reducción del volumen	24
3.4.2 Identificación de materiales.....	25
3.4.3 Poligonización del volumen	27
3.4.4 Alineamiento de la malla y volumen	28
3.4.5 Seccionamiento de la malla del cable	30
3.5 Parámetros de medición.....	32
4 CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES	34
4.1 Fase 1: Estudio de la repetibilidad de las mediciones	34
4.2 Fase 2: Análisis del proceso de medición del producto	36
4.3 Explicación de los cálculos y análisis de resultados	38
5 Conclusiones	42
6 Referencias	43
ANEXO I TIPOS DE FIBRA ÓPTICA	44
ANEXO II PROCESO PRODUCTIVO DE CABLES DE MICROMODULO	47

Fase I: Proceso de pintado de las fibras ópticas	48
Fase II: Líneas de producción de micromódulos	49
ANEXO III: CONTROLES DE CALIDAD	53
Pintadoras – Proceso de pintado	54
Arranque de las líneas de micromódulos	55
Pauta de autocontrol en el final de las líneas	56
ANEXO IV PRINCIPALES FALLOS EN PROCESO PRODUCTIVO DE MICROMODULOS	57

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Esquema sobre la fibra óptica</i>	10
<i>Figura 2: Fibra óptica Monomodo y Multimodo.....</i>	10
<i>Figura 3: Secciones de micromódulos.....</i>	11
<i>Figura 4: Cubierta cable con almas embutidas</i>	11
<i>Figura 5: Cable de cubierta de conjunto de micromódulos</i>	13
<i>Figura 6: Esquema de los componentes de un tomógrafo.....</i>	14
<i>Figura 7: Tomógrafo METROTOM.....</i>	16
<i>Figura 8: Interior del tomógrafo METROTOM con el cable en el utilaje y plato</i>	16
<i>Figura 9: Cable sobre el utilaje en el plato giratorio.....</i>	18
<i>Figura 10: Parámetros Metrotom OS (I).....</i>	21
<i>Figura 11: Parámetros METROTOM OS (II).....</i>	21
<i>Figura 12: Descripción del histograma de visualización</i>	22
<i>Figura 13: Número de radiografías 2D para hacer la tomografía</i>	22
<i>Figura 14: Visualización de la radiografía 2D del cable e histograma en la parte inferior.....</i>	23
<i>Figura 15: Volume Merge para unir varias tomografías.....</i>	24
<i>Figura 16: Reducción de volumen y área de transición.</i>	25
<i>Figura 17: Histograma de Poligonización</i>	26
<i>Figura 18: Identificación Materiales.....</i>	26
<i>Figura 19: Poligonización del volumen.....</i>	27
<i>Figura 20: Creación cilindros de ajuste.....</i>	28
<i>Figura 21: Sistema de coordenadas resultante</i>	30
<i>Figura 22: Construir curva sección</i>	31
<i>Figura 23: Curva sección</i>	31
<i>Figura 24: Secciones perpendiculares a la curva sección</i>	32
<i>Figura 25: Parámetros de medición.....</i>	33
<i>Figura 26: Especificaciones de monomodo</i>	45
<i>Figura 27: Extrusora</i>	50

Índice de Tablas

<i>Tabla 1: Resultados del análisis de repetibilidad del proceso de medición</i>	35
<i>Tabla 2: Resultados del análisis de medición del producto y comparación entre cables.....</i>	37
<i>Tabla 3: Resumen de resultados</i>	40
<i>Tabla 4: Comparativa entre monomodo y multimodo</i>	45
<i>Tabla 5: Pintadoras</i>	48
<i>Tabla 6: Arranque líneas de producción.....</i>	49
<i>Tabla 7: Zonas extrusora.....</i>	50
<i>Tabla 8: Zonas enfriamiento bañera</i>	51
<i>Tabla 9: Velocidades en línea de producción</i>	51
<i>Tabla 10: Comprobación de las Atenuaciones en Fibras de 200 µm</i>	54

1 INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Fin de Grado “Caracterización mediante tomografía industrial de fallos en proceso productivo de fibra óptica” ha sido realizado en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación y la parte experimental en el Taller de Mecánica de Precisión y en el Laboratorio de Metrología de Fabricación del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

1.1 Objetivo

El **objetivo principal** de nuestro proyecto consiste en desarrollar un procedimiento para la caracterización dimensional del interior de una selección de muestras de cubiertas de cables reforzadas con FRP (2 almas embutidas en la cubierta) de fibra óptica de tipo micromódulo mediante tomografía industrial computarizada.

Para lograr el mencionado objetivo principal se tienen los siguientes **objetivos secundarios**:

- Aprendizaje sobre la tomografía computarizada industrial, el control de la máquina Zeiss Metrotom 800 G3/225 KV y su software de control METROTOM OS.
- Aprendizaje sobre software de medición ZEISS INSPECT X-RAY para el tratamiento de volumen reconstruido de tomografía y su posterior reducción del volumen, identificación de materiales, poligonización del volumen obteniendo el mallado y realizando secciones del mismo para efectuar las mediciones.
- Aprendizaje sobre cálculos metrológicos y análisis de los resultados obtenidos a través de los parámetros de medición.

1.2 Alcance

Dentro del Laboratorio del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación del edificio Torres Quevedo de la Escuela de Ingeniería Y Arquitectura (EINA) de la Universidad de Zaragoza ha sido donde hemos realizado este proyecto que ha abarcado las siguientes actividades:

- i. Identificación y selección de diversas muestras de cables de fibra óptica de diversos lotes de fabricación.
- ii. Escaneo de las muestras mediante el tomógrafo Zeiss – Metrotom 800 G3/225.
- iii. Uso del software METROROM OS para la reconstrucción del volumen escaneado.
- iv. Aprendizaje del software ZEISS INSPECT X-RAY para abordar el postproceso del volumen escaneado:
 - Reducción del volumen
 - Poligonización
 - Alineamiento principal de la muestra
 - Seccionamiento de nuestro cable para poder medir e inspeccionar los parámetros
- v. Elaboración de las mediciones e inspección de parámetros a través de GD&T:
(Dimensiones geométricas y tolerancias)
 - Redondez
 - Angularidad
 - Concentricidad
 - Distancias
 - Gap



- vi. Análisis de influencia de diversos parámetros.
- vii. Análisis de los resultados de medición:
 - En una primera fase realizaremos un estudio de repetibilidad midiendo 10 tomografías de la primera muestra evaluando los parámetros definidos en 3 secciones.
 - A continuación, en una segunda fase se toma una sola tomografía de las 4 muestras disponibles y se evalúan 10 secciones en cada caso.
 - Finalizaremos el proyecto calculando las incertidumbres de medición, las tolerancias mínimas admisibles y pudiendo hacer una comparativa entre los 4 cables.

1.3 Contenido de la memoria y anexos

La memoria de este proyecto se organiza de la siguiente manera:

- En el **Capítulo 2**, se lleva a cabo el estudio del estado del arte donde mencionaremos brevemente la fibra óptica, el producto que analizaremos que son cables del tipo micromódulo y su proceso productivo.
- En el **Capítulo 3**, se expone una detallada explicación acerca del proceso de tomografía industrial en el cual se incluye tanto el procedimiento de escaneado del lote de cables de fibra con el software METROTOM OS como el procedimiento de medición mediante el software ZEISS INSPECT X-RAY.
- En el **Capítulo 4**, se realiza el análisis de los resultados obtenidos a través del proceso de medición y se calculan los parámetros estadísticos como la media, desviación típica, recorrido e incertidumbre de medición de los resultados obtenidos.
- Por último, en el **Capítulo 5** se exponen las conclusiones que se extraen del desarrollo de este proyecto.

En los anexos se incluye la siguiente información adicional:

- En el **Anexo 1**, se encuentran explicados los tipos de fibra óptica y las características más notables de cada tipo.
- En el **Anexo 2**, se incorpora y se detallan las etapas del proceso productivo de los cables micromódulos.
- En el **Anexo 3**, se muestran los controles de calidad que se efectúan a lo largo del proceso productivo desde la fase inicial de pintado hasta las pautas de control del final de línea.
- En el **Anexo 4**, se detallan los principales fallos que surgen en los micromódulos durante el proceso productivo.

2 ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

2.1 La fibra óptica

La fibra óptica es un medio hecho con vidrio que hace que la luz se confine en su interior y por lo tanto se transmita a lo largo de toda su longitud.

¿Por qué no se sale la luz de la fibra óptica?

La luz no se escapa del núcleo porque la cubierta (cladding) y el núcleo (core) tienen diferentes vidrios con distinto índice de refracción que obligan a la luz a ser totalmente reflejada dentro del núcleo de la fibra. (Ver Figura 1)

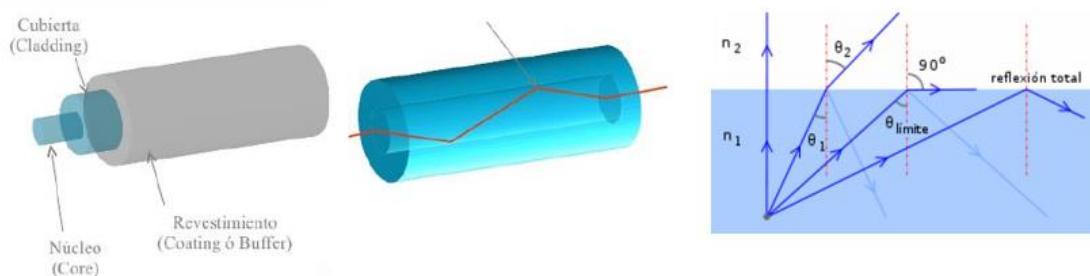


Figura 1: Esquema sobre la fibra óptica

Un cable de fibra óptica se compone de dos elementos principales:

- **Núcleo:**
 - Contiene las fibras¹
 - Aporta protección adicional para las fibras
- **Cubierta:**
 - Externas y concéntricas al núcleo
 - Multitud de variantes, en función de la aplicación del cable

2.2 Tipos de fibra óptica

Como se puede observar en la Figura 2 hay dos tipos de fibra óptica: Monomodo (un haz) y Multimodo (varios haces de luz).

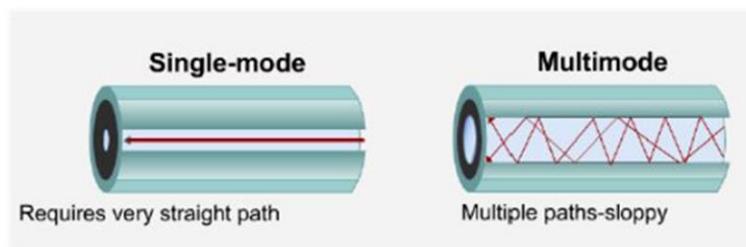


Figura 2: Fibra óptica Monomodo y Multimodo

En nuestro Proyecto nos centraremos en la fibra monomodo que es el tipo de fibra que van a llevar las muestras de cables de micromódulos que tomografaremos en el laboratorio.

¹ Fibra Óptica: De aquí en adelante emplearemos las siglas FO para referirnos a la fibra óptica

2.3 Sección de los cables de micromódulos

Micromódulos:

Las fibras ópticas individuales de 250 μm (coloreadas o no) se agrupan en una microestructura, la cual consiste en un grupo de fibras ópticas alojadas en el interior de un tubo plástico de material suave y flexible y de pared fina. (Ver Figura 3)

Los micromódulos están compuestos de 6 o 12 fibras ópticas. Aunque pueden llegar a tener hasta 24 FO. Llevan un compuesto de relleno en su interior y un diámetro máximo de 1.4 mm.

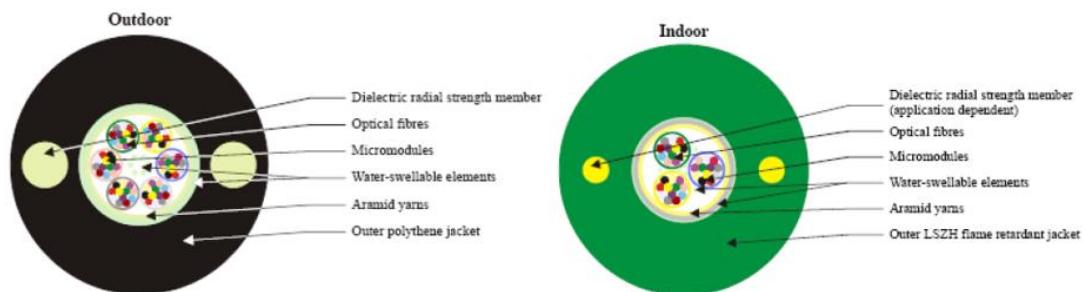


Figura 3: Secciones de micromódulos

Ventajas y características del uso de micromódulos:

- Mayor densidad de fibras.
- Mayor rapidez de preparación para empalme.
- Permite extracción de un micromódulo individual.
- Interior de tubos de plástico son suaves y flexibles.
- Elementos de refuerzo periféricos llamados FRPs.

2.4 Refuerzos en los cables de micromódulos

Para dotarle de robustez a los cables de micromódulos se embuten unos elementos de refuerzo llamados FRP que en este proyecto denominaremos Almas. (Ver Figura 4)

1. FRP liso (sin relleno por dentro).
2. FRP recubierto de material termo-ignífugo (tiene baja emisión de gases y baja propagación de llama).
3. FRP recubierto de polietileno (PE).
4. Varillas macizas negras de relleno.



Figura 4: Cubierta cable con almas embutidas

2.5 Proceso productivo de los micromódulos

A continuación, describiremos brevemente las etapas del proceso productivo las cuales detallaremos en el anexo del proyecto:

Fase 1: *Proceso de pintado de las fibras ópticas*

- Los micromódulos están compuestos por 6 FO, 12 FO y 24 FO.
- Los proveedores traen bobinas de fibra óptica natural, es decir, sin colorear. Antes del pintado, vamos a la zona de batido de pintura.

Las etapas del pintado y los elementos que intervienen son las siguientes:

1. Desbobinador / Desencarretador de la bobina de fibra óptica neutra:
 - a) Es el punto de partida de nuestro proceso el cual irá desenrollando la fibra natural.
2. Pintadora (sin anillos):
 - a) Inyección de Pintura (entra aire a presión en un tubo y por una varilla metálica sale la pintura).
 - b) Horno de Curado por radiación (se colocan dos hornos en serie para aumentar la velocidad del curado de la pintura).
3. Bobinador / Encarretador donde recogeremos la bobina de FO pintada:
 - a) Si la pintadora fuera con anillos es importante que sepamos que primero se pintan los anillos y después la FO. Es crucial este orden.

Fase 2: *Líneas de producción de micromódulos*

Tras la fase 1 de pintado, llevaremos todas las bobinas de FO coloreadas a la sección de las líneas de producción de micromódulos.

A continuación, haremos una breve enumeración de las etapas y elementos que intervienen en el proceso de fabricación de los micromódulos las cuales explicaremos con detenimiento en el Anexo II:

- | | |
|--|--|
| 1) Colocación de las bobinas de FO en los suplidores | 8) Detectores de bultos y valles |
| 2) Arranque de las líneas de producción | 9) Danzarín – Bailarín seguido del Capstan |
| 3) Sistema de gel | 10) Capstan |
| 4) Extrusora | 11) Detector mecánico de bultos y valles |
| 5) Enfriamiento a través de las bañeras | 12) Control de exceso de fibras |
| 6) Secado de agua de los micromódulos | 13) Encarretador / Bobinador |
| 7) Detectores del diámetro de los micromódulos | 14) Extrusora de cubiertas |

Una vez enrollados en bobinas los micromódulos fabricados, se llevan a otra sección para realizarles la cubierta final donde se juntarán otros micromódulos los cuales se atarán a través de hilatura de aramida y anti bloqueante de agua y se embutirán los 2 FRP en la periferia de la cubierta. (Ver Figura 5)



Figura 5: Cable de cubierta de conjunto de micromódulos

2.6 Tomografía computarizada industrial

2.6.1 Resumen histórico de la tomografía

La metrología juega un papel esencial para potenciar la innovación tecnológica y el desarrollo industrial de un país [1].

La Tomografía Computarizada (TC) revolucionó la medicina al convertirse en el primer método no invasivo para obtener imágenes internas del cuerpo humano, con contribuciones clave del premio nobel Allan McLeod Cormack sobre TC permitieron a Godfrey Newbold Hounsfield realizar el primer escáner médico con un sistema de tomografía axial computarizada.

En los años 80, la TC se introdujo en la industria para pruebas no destructivas y análisis de materiales. En los 90 se realizaron las primeras mediciones no especializadas y fueron imprecisas.

Fue en 2005, con el desarrollo del "Werth TomoScope" por Werth Messtechnik, cuando la TC se consolidó como una alternativa viable y real a las máquinas de medición por coordenadas táctiles u ópticas, impulsando significativamente su investigación [2].

La evolución de las áreas de la industria hacia una mayor complejidad ha supuesto una mejora continua de los sistemas de medición surgiendo nuevas tecnologías de medición que ofrecen grandes posibilidades y garantías como la técnica de la tomografía computarizada.

La Tomografía Computarizada ofrece grandes posibilidades en el área de la metroología industrial. Para contribuir con el crecimiento de la tecnología, desarrollamos un procedimiento optimizado de medición para las muestras de cables de diferente geometría, tamaño, haciendo uso del software de inspección y medición Zeiss Inspect X-Ray.

2.6.2 Concepto de tomografía computarizada

La tomografía computarizada (TC) es un proceso no destructivo que permite crear un volumen 3D del objeto mediante imágenes transversales obtenidas con rayos X durante el escaneado (tomografiado).

La máquina de TC tiene un emisor de rayos X, una mesa giratoria y un detector. (Ver Figura 6)

Los rayos X atraviesan el objeto, siendo absorbidos según la densidad y espesor del material. La radiación no absorbida es captada por el detector y, al combinar diferentes ángulos de exposición, se generan múltiples imágenes bidimensionales.

Estas imágenes se procesan con un algoritmo matemático para reconstruir el modelo 3D del objeto, sin que este quede radioactivo tras la exposición.

Nosotros realizaremos las tomografías de las muestras de cables de fibra óptica de distintos lotes de fabricación en el tomógrafo ZEISS METROTOM.

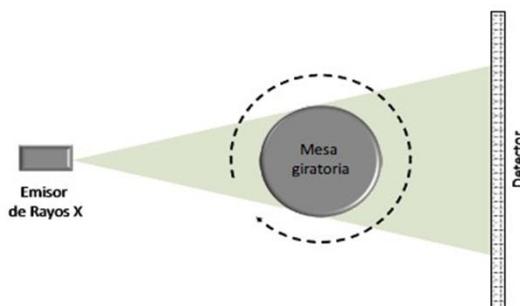


Figura 6: Esquema de los componentes de un tomógrafo

Anteriormente, la inspección de estructuras internas requería pruebas destructivas para obtener mediciones precisas. Esto ha cambiado con la introducción de la tomografía computarizada en la metrología industrial, que permite inspeccionar completamente las piezas de manera no destructiva, facilitando el análisis y la corrección sin dañar los componentes.

Las ventajas de las mediciones por tomografía computarizada:

- **Precisión:** mide, analiza e inspecciona defectos y estructuras dentro de las piezas de trabajo con un solo escaneo.
- **No destructiva:** gracias a la tomografía computarizada y a los rayos X, es posible realizar mediciones sin destruir los componentes.
- **Reproducción:** la digitalización mediante tomografía computarizada permite la reproducción de componentes incluso sin un modelo CAD.

Las Prestaciones y técnicas del tomógrafo son las siguientes:

- **Escaneado tomográfico:**
 - Obtención de las imágenes del detector.
 - Obtención del volumen reconstruido.
- **Inspección cualitativa del volumen:**
 - Información técnica y asesoramiento.
 - Análisis del interior de las piezas.

- Detección de defectos como porosidad, incusiones, grietas, cortocircuitos en electrónica...
 - Análisis de piezas multimaterial.
- **Ingeniería Inversa:**
 - Obtención de un archivo malla para su uso en programas de modelado, simulación o laminadores para impresión 3D.
 - **Inspección metroológica:**
 - Comparación de pieza real vs archivo CAD.
 - Comprobación de tolerancias.
 - Informe metroológico.

Las aplicaciones de la metroología son las siguientes:

- **Control y aseguramiento de calidad:** Inspección de la integridad interna de los componentes para detectar defectos como porosidad, inclusiones, fisuras o delaminaciones sin dañar el objeto.
- **Análisis de piezas multimaterial:** Estudio de las características internas de los materiales, como la distribución de fibras en composites, orientación de granos en metales o la estructura interna de polímeros y cerámicas.
- **Análisis de ensamblaje y montaje:** Verificación de la correcta alineación y ajuste de componentes internos en ensamblajes complejos.
- **Ingeniería inversa:** Digitalización en 3D componentes o sistemas completos, facilitando la ingeniería inversa de objetos para los cuales no existen planos o modelos digitales.
- **Inspección de empaques:** Inspección no destructiva de empaques sellados y verificar la integridad del sello, la ausencia de contaminación y la correcta distribución del contenido.

La tomografía computarizada permite escanear completamente un componente, incluyendo sus contornos internos y rebajos, lo que facilita el análisis preciso de estructuras internas y externas en un solo escaneo.

También permite medir piezas de múltiples materiales y comparar el componente escaneado con su modelo CAD para detectar desviaciones. Esto mejora la precisión y ahorra tiempo en el control de calidad.

Este proceso también facilita la ingeniería inversa, recuperando datos de diseño y corrigiendo moldes sin necesidad de un modelo CAD.

Además, la inspección 2D por rayos X complementa el control de calidad en la línea de producción, permitiendo una detección rápida y precisa de fallos.

3 ESCANEADO TC DE LAS MUESTRAS DE CABLE

3.1 Descripción de máquina y programas empleados

La máquina que emplearemos en nuestro proyecto es el tomógrafo del Laboratorio de Metrología TC Zeiss – Metrotom 800 G3 / 225 kV. (Ver *Figura 7* y *Figura 8*)



Figura 7: Tomógrafo METROTOM

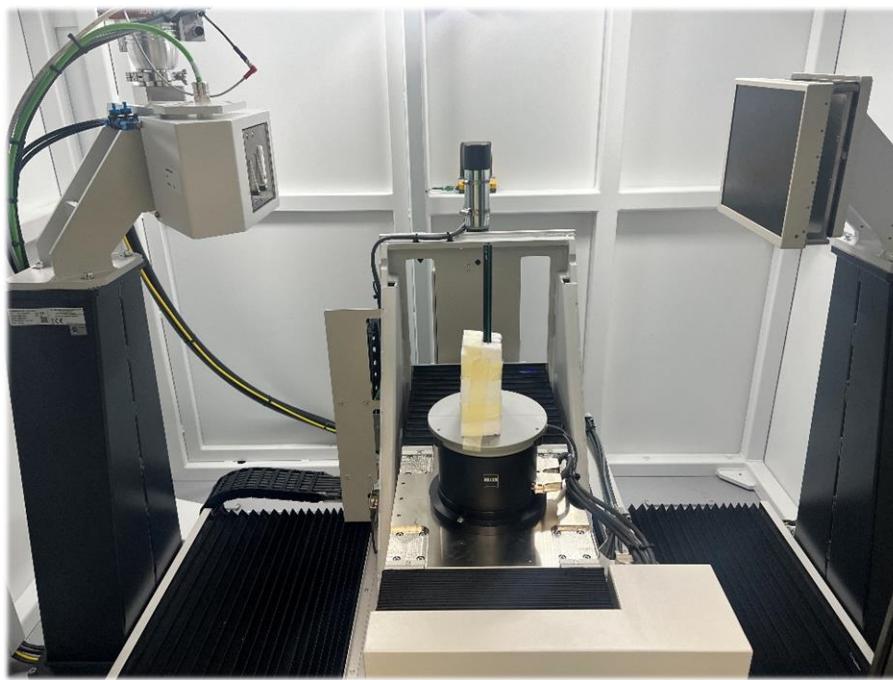


Figura 8: Interior del tomógrafo METROTOM con el cable en el utillaje y plato

La Hoja de características del tomógrafo es la siguiente:

- Características del emisor:
 - o Voltaje: 30 – 199 [kV]
 - o Intensidad: 10 – 3000 [μ A]
 - o Punto focal ≥ 7 [μ m]
- Características del receptor:
 - o Resolución: 1920 x 1536 píxeles
 - o Tamaño de pixel: 17 x 17 [μ m]
- Sistema de posicionamiento:
 - o Emisor – Receptor: 800 [mm]
 - o Movimiento XYZ: 700 – 270 – 270 [mm]
- Rangos máximos:
 - o Cilindro de medición: 300 x 360 [mm] (\varnothing x h)
 - o Pieza circunscrita: 650 x 550 / 550 x 800 [mm] (\varnothing x h)
 - o Peso Máximo: 5 (Medición) / 10 (Inspección) [kg]
- Espesores máximos recomendados (medición metrológica / análisis cualitativo)
 - o Acero: 3 / 10 [mm]
 - o Aluminio: 10 / 30 [mm]
 - o Plásticos: 150 / - [mm]

El programa de control de máquina que emplearemos será METROTOM OS el cual nos permite obtener un conjunto de radiografías 2D o bien el archivo del volumen de la pieza que hemos tomografiado.

A través del volumen obtenido con el programa METROTOM OS que será nuestro input, emplearemos el programa ZEISS METROTOM X-RAY para que a partir del volumen tomografiado generar la malla a través de la técnica de la poligonización y sobre dicha malla realizaremos toda la caracterización metrológica.

3.2 Preparación de la muestra en la máquina

En primer lugar, encenderemos la máquina. Girando la llave se produce la apertura de la puerta del tomógrafo.

La pieza la colocaremos sobre un utilaje de porexpan de baja densidad para que reciba bien toda la emisión de rayos X y no nos haga de barrera impidiendo escanear alguna parte de la pieza a tomografar.

Otro de los factores claves de elegir porexpan como utilaje es porque tiene muy poca atenuación de rayos X

La intensidad del haz de rayos X se atenúa cuando pasa a través de un objeto uniforme debido a los procesos de absorción. [3]

El grado de atenuación depende del espectro de energía de los rayos X, de la distancia atravesada (espesor del objeto), y de la densidad del objeto.

Es posible describirla matemáticamente por la Ley de Lambert-Beer.

$$I_T = I_0 e^{-\mu x}$$

- I_T intensidad del haz transmitido.
- I_0 intensidad del haz incidente.
- e constante de Euler (2.718).
- μ coeficiente de atenuación lineal.
- x espesor del objeto.

Las unidades Hounsfield (UH) se emplean en los estudios de tomografía computarizada (TC) para medir de forma cuantitativa la atenuación de las estructuras y órganos en el sujeto de estudio [4]

Podríamos colocar un filtro de cobre o de aluminio sobre nuestro emisor, pero al ser la pieza un cable de material plástico no es necesario utilizar ningún filtro. Los filtros sirven para evitar que los artefactos salgan en las radiografías 2D.

Existen varios tipos de filtro:

- Filtración Inherente del tubo: ~ 3 mm Al.
- Filtración Plana (Flat): hojas de espesor de 0,1 a 0,4 mm Cu – desvía el espectro hacia el rango de energías más altas.
- Filtración en forma de “bow-tie” – Material de bajo Z (Ej. Teflón) Atenúa la radiación en el centro y fuertemente en la periferia. Busca disminuir las diferencias del espectro entre el centro y la periferia, que se producen por el haz en abanico y el endurecimiento del haz.

El utilaje de porexpan lo colocaremos sobre un plato circular giratorio. El porexpan irá imantado al plato y lo colocaremos centrado en el plato. (Ver Figura 9)

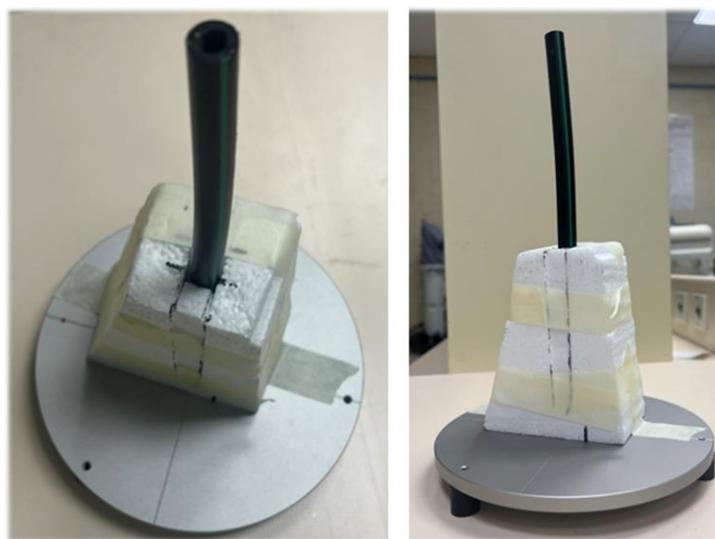


Figura 9: Cable sobre el utilaje en el plato giratorio

Antes de introducir la pieza con el utilaje centrado con el plato giratorio sobre el tomógrafo nos aseguraremos de que los rayos X están OFF.

Pulsaremos el botón de apertura de la máquina y depositaremos la pieza con el utilaje colocada ya sobre el plato giratorio centrándola visualmente en la mitad del plato. Acto seguido pulsaremos el botón de cierre de máquina.

A continuación, procederemos a controlar la máquina desde el software METROTOM OS.

3.3 Control de máquina y parámetros de tomografiado.

Iniciaremos el programa METROTOM OS para:

- Controlar la máquina – tomógrafo.
- Visualizar la tomografía del cable.
- Reconstrucción del volumen 3D del cable.
- Reducir los artefactos en la visualización de la tomografía.

Empezaremos haciendo una Preview.

El proceso de reconstrucción nos representa la pieza en 3D seccionada en secciones. Recordemos que esas secciones las tomamos respecto al plato giratorio el cual tomamos como origen de coordenadas. Siempre nos aseguramos de que el plato giratorio está plano a 0º, por tanto, las secciones que nos representa nos las mostrará paralelas al plato.

Metrotom OS nos indica para cada radiografía 2D obtenida, cuento ha girado el plato (De 0º a 360º).

Cabe destacar que las imágenes en 2D que vemos no son fotos sino reconstrucciones digitales en las que vemos el volumen de la pieza en secciones transversales.

El Volumen 3D que hemos reconstruido está compuesto por **vóxeles**.

Valor del Píxel: medida de la atenuación de los rayos X en el correspondiente elemento de volumen (vóxel).

Un **vóxel** es la abreviatura de "volumetric pixel" (píxel volumétrico) y se utiliza para describir un elemento en una cuadrícula tridimensional, similar a cómo un píxel representa un elemento en una cuadrícula bidimensional. Los vóxeles son las unidades básicas en los modelos de datos volumétricos y se utilizan en diversas aplicaciones, como gráficos por computadora, simulaciones médicas, y geociencias.

- **Vóxel:** Es un pequeño cubo tridimensional que representa una porción específica de espacio en un entorno tridimensional.
- **Píxel:** Es un pequeño cuadrado que representa una porción específica de espacio en una imagen bidimensional.

Cada vóxel tiene un valor en la escala de grises. La escala de grises va desde 0 hasta 65536. Conforme más aumentemos ese número, el vóxel asociado a dicho número se acercará más al color blanco. El color negro representa al aire, serían los números más pequeños de vóxeles en la escala de grises.

Cuanta más tonalidad de blanco tenga una zona de la imagen, significa que mayor densidad tendrá esa zona de la pieza, o bien, mayor será el espesor en dicha zona.

Es notable resaltar que a mayor número de vóxeles, mayor resolución tendrá la tomografía. Lógicamente cuanto mayor número de vóxeles, menor será el tamaño de cada uno.

Las restricciones que tenemos con el tomógrafo METROTOM que hay en el laboratorio de metrología son las siguientes: Nos permite medir como máximo piezas de plástico de 20 cm de espesor y si fueran piezas de aceros de 3 cm de espesor.

Esto no quiere decir que la pieza sea entera maciza, sino que pueda tener algún detalle en alguna zona y dicho espesor no puede superar los valores límites aconsejados.

Un aspecto relevante en la tomografía es saber distinguir a partir de que valor de la escala de grises se encuentra la frontera entre lo que es el cable y lo que es aire en la tomografía.

En nuestro proyecto trabajaremos con cables multimaterial ya que nos interesa que la tomografía nos represente tanto la cubierta de los cables como las dos almas que hay en la periferia y que están embutidas en ella.

Utilizaremos la segmentación para establecer un valor umbral que es una línea perimetral para definir entre que valores de la escala de grises es cable, entre que valores de véxeles son las almas del cable y entre qué valores es el aire.

En la TC existe un compromiso entre la calidad de la imagen y la dosis de radiación ionizante. El problema radica en que, al disminuir las dosis de radiación en TC, se aumenta la cantidad de ruido en las imágenes. Esto se debe a que los detectores del tomógrafo reciben una cantidad menor de fotones, lo que disminuye la relación señal a ruido.^[5]

Veremos que pueden aparecer **artefactos**, en las imágenes 2D obtenidas. Los artefactos consisten en unas líneas difuminadas, líneas borrosas de luz o destellos que nos ensucian las imágenes 2D que vamos obteniendo en el proceso del tomografiado. No debemos de confundirnos al visualizar los artefactos y pensar que haya físicamente rayos de luz en el cable.

La cantidad de escaneos 2D o imágenes 2D obtenidas en el proceso de tomografiado lo seleccionaremos nosotros. Esto dependerá de la resolución y calidad que queramos obtener del cable.

Con el METROTOM OS manejamos 4 parámetros principales los cuales son nuestros Inputs: (ver Figura 10 y Figura 11)

1. **Voltaje:** Capacidad de penetración en la pieza, por lo que piezas con mayor espesor o densidad requerirán mayor voltaje.
2. **Corriente:** cantidad de rayos que recibe el receptor. Viene preestablecido.
3. **Tiempo de exposición (Integration Time):** Tiempo en el que está expuesta la pieza a los rayos X. Es lo que le cuesta hacer una foto / escaneo en 2D de la pieza.
4. **Coordenadas del plato giratorio:**
 - **Eje X:** Indica los que nos acercamos o alejamos del emisor (En X=0, plato pegado al emisor).
 - **Eje Y:** Esta cota no la manipularemos para mantener el plato centrado respecto del receptor.
 - **Eje Z:** Indica la cota de la altura a la que está situada el plato.

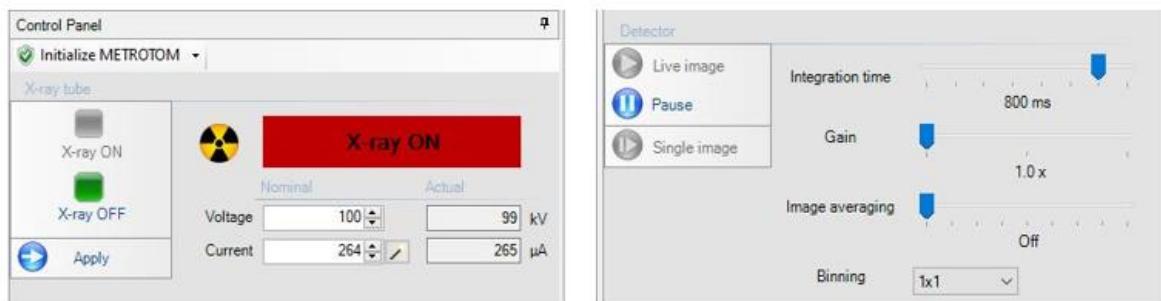


Figura 10: Parámetros Metrotom OS (I)

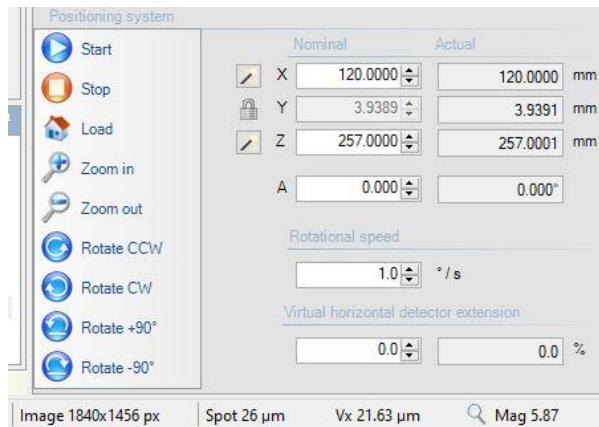


Figura 11: Parámetros METROTOM OS (II)

Los valores de Spot Size y Vóxel Size no son unos parámetros a introducir en el METROTOM OS. Vóxel Size solamente depende del valor de la cota X en la que esté situada el plato giratorio respecto al receptor. Mientras que el tamaño del haz de luz (Spot Size) es directamente proporcional al Voltaje e Intensidad.

Proceso en el control del tomógrafo:

1. Decidiremos el tamaño del voxel en función de la precisión deseada.
2. Ajustaremos el voltaje de la máquina en función del material de la pieza a analizar.
3. Con el asistente del Metrotom OS, autoajustamos el valor de la intensidad. Dicho asistente nos proporciona el mayor valor de intensidad posible de modo que se obtenga una proporción adecuada entre Spot size y Vóxel Size

“Regla de oro”: **Spot size \leq 1.5*Vóxel Size** aproximadamente.

4. Tiempo de exposición (Integration Time): Nos indica el periodo de tiempo en el que está emitiendo el emisor para cada radiografía 2D. Tiempos demasiado cortos proporcionan imágenes demasiado oscuras (subexposición, histograma en el extremo izquierdo) y el caso opuesto imágenes “quemadas”(sobreexposición, histograma en el extremo derecho).
5. Histograma de visualización: En todo momento se nos muestra en pantalla una gráfica representativa de la imagen captada por el receptor. En el eje X se tiene el valor de gris

de cada píxel de la imagen y en el eje Y el número de píxeles con dicho valor. (Ver Figura 12)



Figura 12: Descripción del histograma de visualización

Observar el histograma sirve de gran utilidad durante el ajuste de nuestra visualización. Nos interesa posicionarlo lo más centrado y ancho posible con unos picos bien diferenciados, los cuales representan los tipos de materiales según la atenuación.

- Cuanto más a la izquierda esté el histograma, estaremos ante una menor atenuación, es decir lo que esté más a la izquierda será el aire-fondo.
- Cuanto más a la derecha esté el histograma, más clara y nítida es la visualización debido a que es mayor la atenuación, es decir, mayores espesores y materiales más densos.
- Conforme aumentemos el valor de Integration Time, nos desplaza hacia la derecha el histograma; sin embargo, si disminuimos este parámetro, nos desplazará hacia la izquierda el histograma.

6. Delimitaremos la región de interés. En función de cómo sea ajustada, irá asociado el número de radiografías 2D (number of projections). El programa nos propone la cantidad mínima de radiografías a seleccionar en función del ancho de dicha región para una correcta obtención del volumen. (Ver Figura 13)

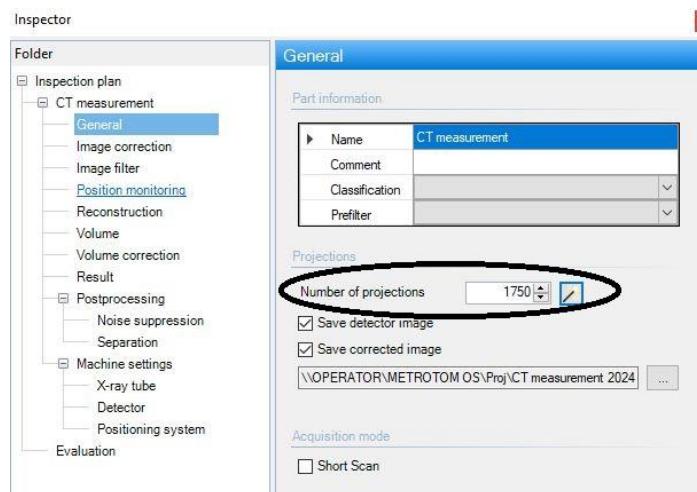


Figura 13: Número de radiografías 2D para hacer la tomografía

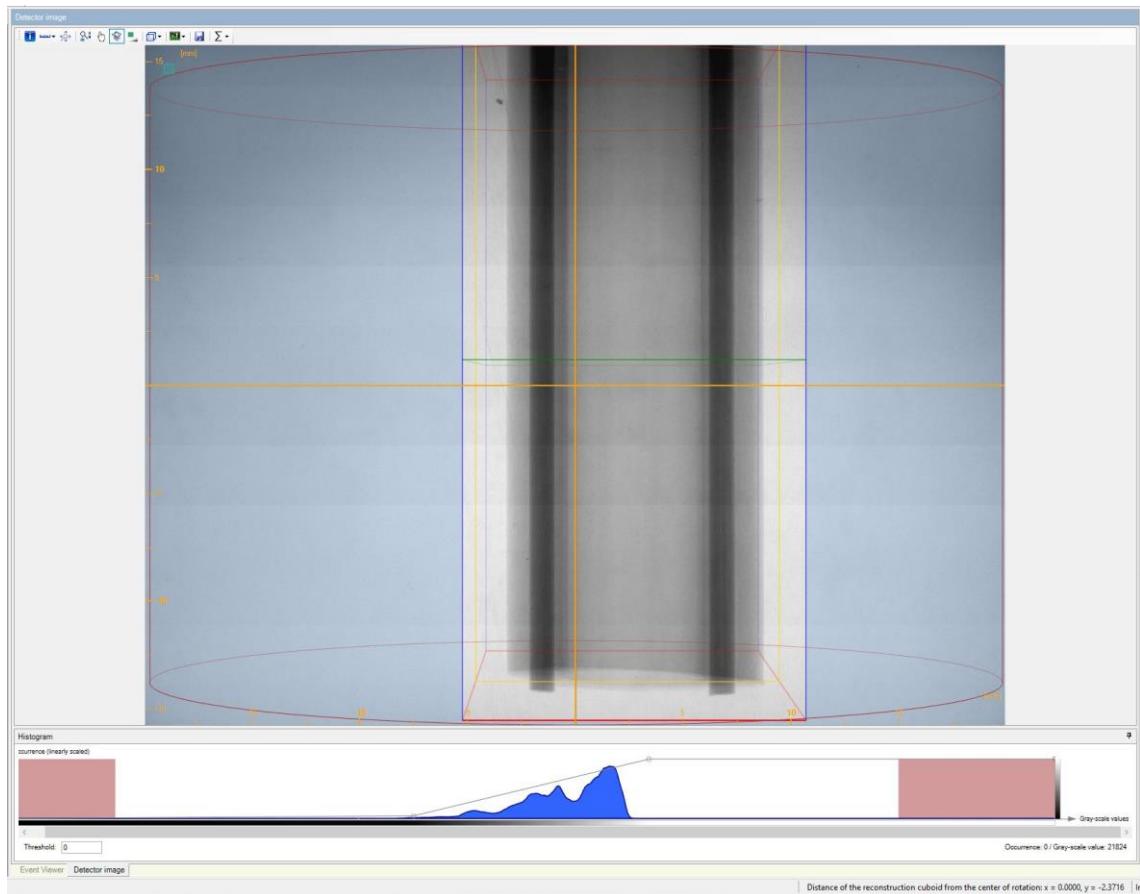


Figura 14: Visualización de la radiografía 2D del cable e histograma en la parte inferior

Las zonas rojas que se pueden apreciar en la *Figura 14* indican los límites para una tomografía con correcta exposición. Se ha de buscar un histograma (gráfica azul) centrado en la sección blanca.

Las elipses rojas que están en la zona superior e inferior de la ventana azul delimitan el rango del detector en el que el fabricante asegura la precisión. Para un correcto análisis metrológico posterior, nuestra región de interés no deberá exceder dichos límites

7. Dado que los cables son muy largos vamos a aplicar la función llamada **VOLUME MERGE** que permite unir varias tomografías en una sola cambiando la altura de la cota Z del plato. Para ello se han de mantener los demás parámetros de tomografiado (Voltage, Current, Integration Time y Cota X del plato giratorio). Para poder realizar esta unión se requiere una pequeña zona de superposición entre regiones de interés consecutivas. (ver *Figura 15*)

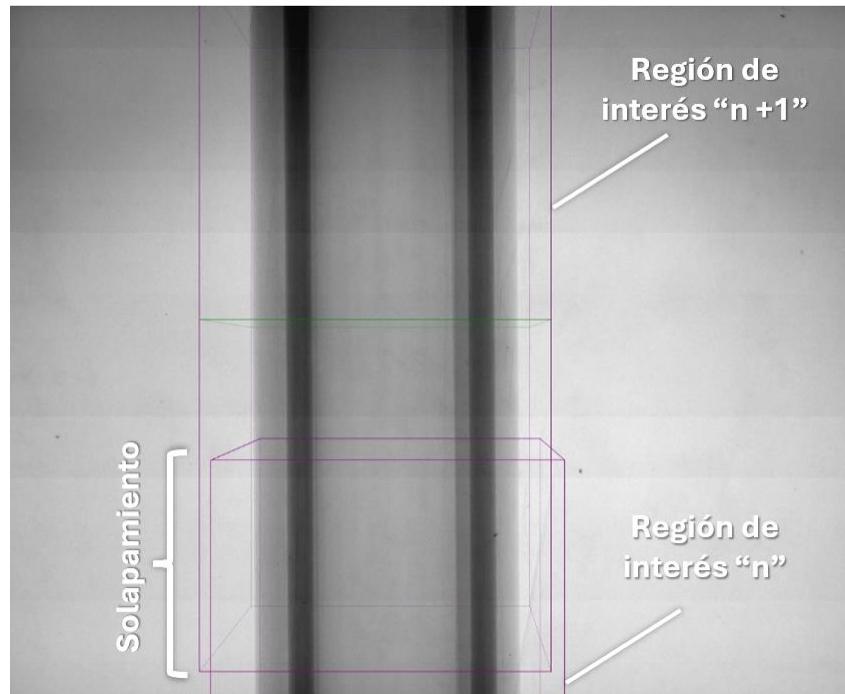


Figura 15: Volume Merge para unir varias tomografías

El resultado será el **volumen completo** de la muestra escaneada a partir de varios volúmenes más pequeños y este archivo de programa será el que trasladaremos a continuación al ZEISS INSPECT X-RAY.

3.4 Mediciones en Zeiss Inspect X-Ray

3.4.1 Reducción del volumen

Para poder trabajar con mayor fluidez y que el archivo que hemos tomografiado ocupe menos espacio en el disco duro, el primer paso que hacemos es una reducción del tamaño del volumen.

Queremos desechar información innecesaria del fondo de la pieza (aire alrededor de la pieza), ya que al realizar la tomografía lo que capturamos es un volumen cúbico (Pieza + fondo aire). Para ello, el software asignará un valor de escala de gris de 0 a todo lo que es el área detectada como fondo.

Se realiza este paso previo para que vaya más rápido el ZEISS INSPECT ya que al eliminar información irrelevante de la tomografía, el archivo del volumen que hemos importado ocupará menos memoria y trabajar con él consumirá menos recursos del ordenador agilizando el proceso.

Es necesario comprobar que la reducción que propone el software es correcta y no se están eliminando vóxeles correspondientes a la muestra a analizar. Para ello podemos modificar el número de vóxeles de margen que deja el algoritmo “Área de transición”. Este procedimiento queda ilustrado en la *Figura 16*.

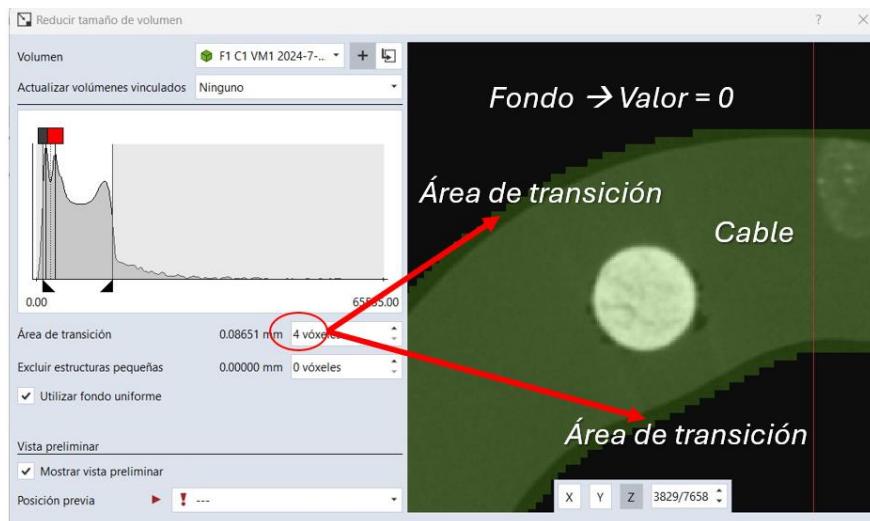


Figura 16: Reducción de volumen y área de transición.

3.4.2 Identificación de materiales

Como en nuestro proyecto trabajaremos con piezas multimaterial, necesitamos hacer este paso previo. Posteriormente efectuaremos la poligonización que consiste en la generación de la malla.

Al abrir el menú de esta herramienta se nos mostrará el **histograma del volumen reducido**. (Eje X valor de gris, eje Y N° de voxels con dicho valor de gris). Sobre dicho histograma el software trata de identificar los picos correspondientes a cada material presente.

- Se ha de ajustar la posición de dichos picos en caso de que la identificación haya sido errónea. (lado izquierdo de la *Figura 18*)
- Para dicho ajuste nos podemos ayudar de una previsualización de la separación propuesta. (lado derecho de la *Figura 18*)
- Una vez ubicados los picos, se elige la frontera entre materiales “*ratio for material threshold*” parámetro cuyo valor oscila entre 0 y 1.

HISTOGRAMA DEL VOLUMEN

Tenemos 3 picos - máximos, la cubierta del cable, las almas y el aire ya que es una pieza multimaterial. En piezas multimaterial habrá tantos picos como número de materiales distintos que compongan la pieza (contabilizando el aire como si fuera un material).

El pico representa el mayor máximo de densidad que tiene la pieza y el aire.

En caso de que salieran más picos, es porque hemos realizado incorrectamente la tomografía y la consideraríamos nula.

Cabe resaltar que a mayor separación de los picos en el histograma mayor será la diferencia de densidades entre el material y el aire. (Ver Figura 17)

- Bandera negra: Representa el pico del aire (fondo).
- Bandera roja: Representa el pico del material 1.
- Bandera verde: Idem para el material 2.

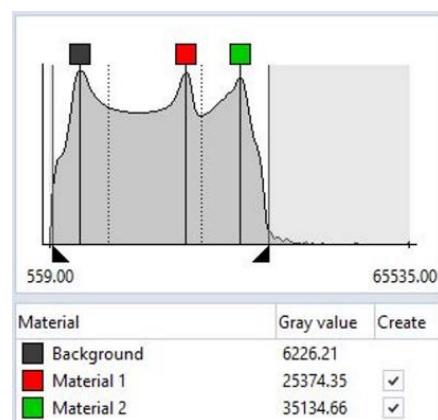


Figura 17: Histograma de Poligonización

Ejemplo:

- Pico de material 1 en valor de gris 34567.
- Pico de material 2 en valor de gris 45678.
- Un ratio de 0,5 situará la frontera en el valor medio entre ambos picos.
 - o $Frontera = Pico 1 + (Pico 2 - Pico 1) * Ratio = 40123$
- Observando el histograma de volumen ajustaremos el Ratio para que la frontera coincida con el punto más bajo del valle entre picos.

Nosotros visualizamos cuatro materiales, pero trabajaremos únicamente con tres materiales ya que las tres zonas de color verde de la cubierta de los cables nos la identifican como un material adicional.

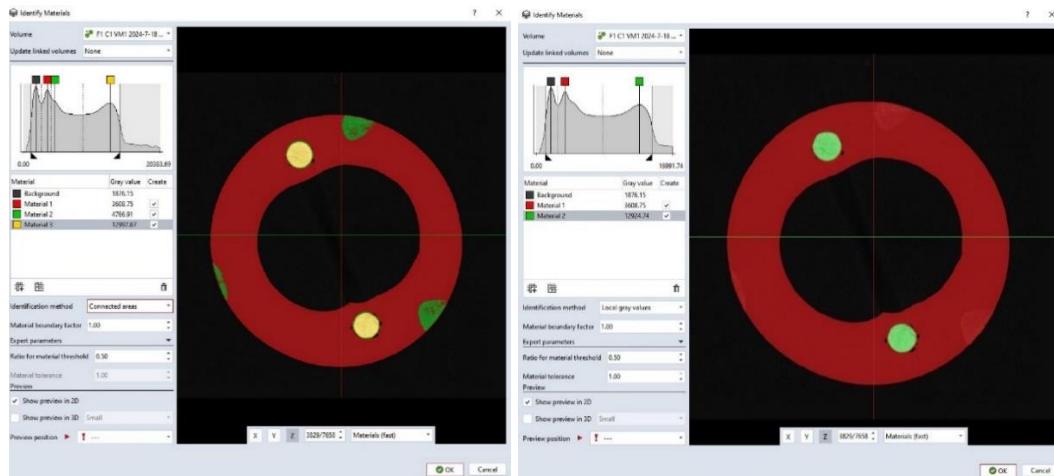


Figura 18: Identificación Materiales

Se elimina esa sección y nos quedarán tres materiales: las almas, la cubierta del cable y el aire. Al eliminar el material de las bandas verdes a lo largo de la cubierta en la representación de identificación de materiales (Figura 18), tendremos como resultado que la cubierta junto al material eliminado se representará conjuntamente de color rojo, las almas se verán de color verdoso y por último el aire se verá de color negro.

3.4.3 Poligonización del volumen

La función de la Poligonización parte del valor de gris frontera entre pieza y aire. A partir de él se define una nube de puntos que construye la ‘piel’ de la pieza. Estos puntos se unen formando triángulos y constituyen la malla sobre la que se realizarán nuestras mediciones. (Ver Figura 19)

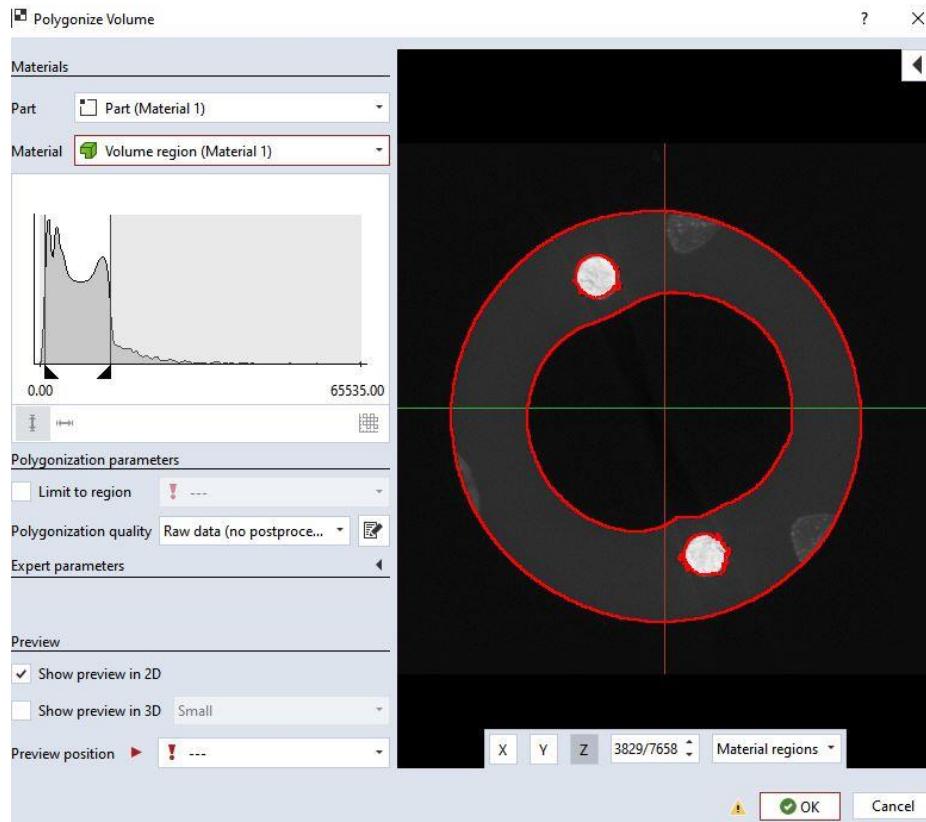


Figura 19: Poligonización del volumen

En pieza multmaterial se requiere una malla para cada material de interés. En nuestro caso, solo necesitaremos una para la cubierta del cable con el alojamiento de las almas.

A continuación, se describen los parámetros requeridos en este proceso y los valores seleccionados junto con su justificación:

Calidad de Poligonización: Datos en Bruto (sin posprocesamiento)

Existen dos técnicas de postprocesamiento llamadas “Smoothing” y “Thinning” las cuales son unos algoritmos de postprocesado que pueden aplicarse para simplificar el mallado y hacer un suavizado sobre la malla, por lo que se perdería o alteraría información en la malla. Si optáramos por estos métodos, al hacer un zoom en la malla veríamos que los elementos triángulos que constituyen la malla serían más grandes lo que implicaría una disminución en la resolución de la pieza.

En metrología trabajamos en crudo, sin posprocesamiento, pues no queremos perder ningún tipo de detalle o información de la pieza a la hora de generar la malla. Por tanto, en este paso seleccionaremos la opción de trabajo: Datos en bruto.

3.4.4 Alineamiento de la malla y volumen

Conceptualmente partimos de que la pieza tiene 6 GDL (grados de libertad), es decir, 3 rotaciones (3R) y 3 traslaciones (3T).

- Definimos un plano: Eliminamos 2R y 1T (la pieza solo puede moverse por el plano).
- Definimos una línea: Eliminamos 1R y 1T (la pieza solo puede moverse por la línea).
- Definimos un punto: Eliminamos 1T (la pieza queda fijada en un punto el cual tomaremos como origen de coordenadas).

Tenemos que alinear la pieza ya que en el tomógrafo nosotros colocamos la pieza inclinada y queremos definir un sistema de coordenadas adecuado. Necesitamos un sistema de coordenadas orientado respecto a la pieza y no respecto al plato en el que colocamos la pieza con el utilaje durante el proceso de tomografiado. Hay que tener en cuenta que el archivo de volumen 3D que obtenemos del programa METROTOM OS está referenciado respecto al plato y por eso en el programa ZEISS INSPECT X-RAY necesitaremos cambiar el sistema de coordenadas referenciándolo a la pieza.

Bloque 1: Crear Plano Z en el extremo superior del cable

1.1) Creamos 2 cilindros de ajuste:

Seleccionaremos una serie de puntos de la malla del extremo superior del cable y un conjunto de puntos del extremo inferior del cable. Los puntos que seleccionaremos serán aquellos de la zona externa de la malla sin incluir los bordes finales del cable (diámetro exterior del cable).

A partir de estos puntos construiremos el cilindro parte superior del cable y el cilindro parte inferior del cable (*Ver Figura 20*). Ambos son cilindros de ajuste mediante el método Best-fit-gaussiano tomando aquellos puntos de la selección dentro del rango 3σ (99%).



Figura 20: Creación cilindros de ajuste

1.2) Crearemos 2 puntos de la superficie:

Crearemos un punto de superficie sobre la malla en la zona del extremo superior del cable y otro en el extremo inferior del cable a los que llamamos:

- Punto superior cable.

- Punto Inferior cable.

1.3) Crear Plano-punto-normal:

Se crea un plano que contenga al punto creado en el anterior paso y cuya normal coincida con el eje del cilindro de ajuste.

- Plano Superior Cable:
 - El punto escogido será el punto superior cable.
 - La componente normal será la del cilindro extremo superior.
- Plano inferior cable:
 - El punto escogido será el punto inferior cable.
 - La componente normal será la del cilindro extremo inferior.

Bloque 2: Creación de la línea que queremos que sea nuestro eje x de la pieza

2.1) Crear puntos de intersección para conseguir los centros del cilindro cable parte superior y cilindro cable parte inferior:

Intersecando el eje de los cilindros de ajuste con los planos punto-normal correspondientes se consigue:

- Punto centro cable superior.
- Punto centro cable inferior.

2.2) Construir punto de proyección:

- Punto centro cable inferior proyectado
 - Elegimos: Punto centro cable inferior.
 - Zona de proyección: Plano superior cable.

2.3) Construir línea entre 2 puntos:

Uniendo los siguientes puntos: Punto centro cable superior y Punto centro cable inferior proyectado crearemos una línea que la denominaremos:

- Línea entre centros (decidiremos que será nuestro eje X de coordenadas).

Bloque 3: Construir punto origen de coordenadas.

Se selecciona como punto de origen de coordenadas el “punto centro cable superior”.

Resultado: Alineamiento Principal: Plano – Línea -Punto

En la *Figura 21* se ilustra el sistema de coordenadas resultante:

- Plano: Cilindro cable superior → Plano Z.
- Línea: Línea entre centros → Línea X.
- Punto: Punto centro cable superior → Origen de coordenadas (0,0).

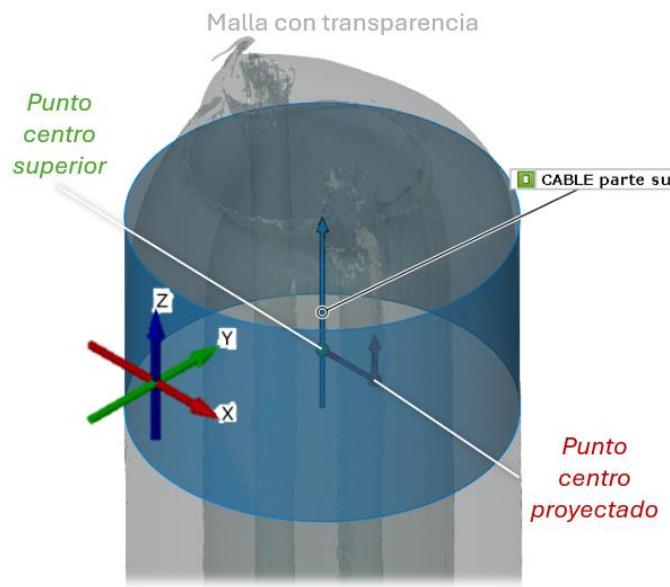


Figura 21: Sistema de coordenadas resultante

Una vez que tenemos la pieza alineada procederemos con el seccionamiento de la malla.

3.4.5 Seccionamiento de la malla del cable

Necesitamos dividir la malla en secciones transversales porque los parámetros de medición que deseamos medir en nuestro proyecto no los podemos medir sobre el 3D de la malla.

En primer lugar, nos crearemos una línea curva de tal forma que todas las secciones a lo largo de esa curva que efectuemos sobre el cable sean perpendiculares a ella.

Para conseguir dicha curva seleccionaremos mediante la opción On Surface una zona del cable sin incluir los extremos del cable. Una vez que tengamos seleccionada la zona del cable procederemos de la siguiente manera:

Paso 1: Construir una sección longitudinal

Nuestro objetivo es construir una curva sección longitudinal a lo largo de la malla para que a partir de ella construir secciones transversales perpendiculares a dicha curva sección.

Para construirla, recurriremos a la herramienta de multisección paralela. Le daremos a la opción de maximizar ya que queremos que el número de secciones que nos haga sea solamente una.

Como plano de referencia elegiremos el plano Y. La posición del plano Y marcaremos que sea 0 mm ya que pasa justo por el centro del origen de coordenadas.

El Plano Y secciona al eje x que es la línea que nos definimos como línea entre centro superior cable – centro proyectado. (Ver Figura 22 y Figura 23)

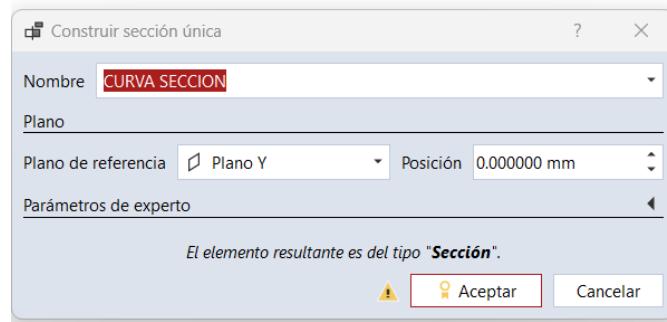


Figura 22: Construir curva sección

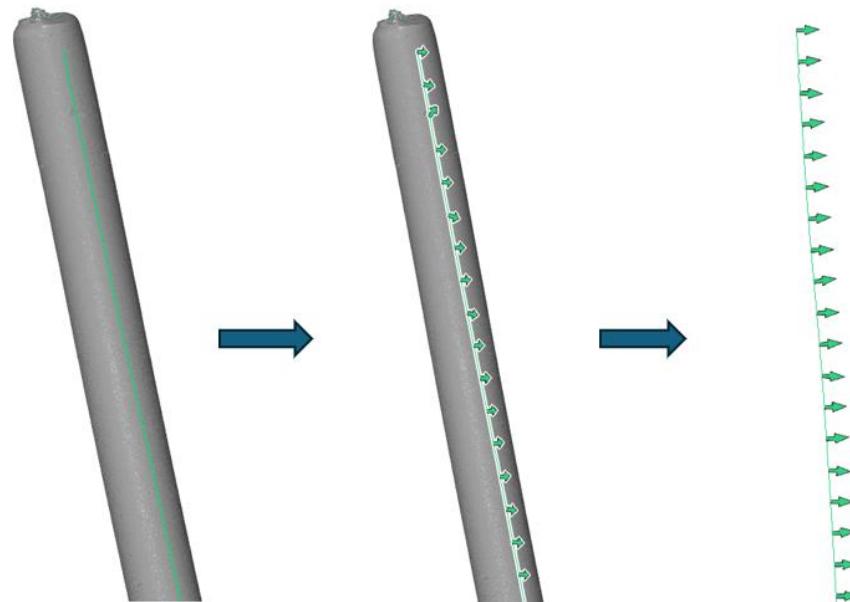


Figura 23: Curva sección

Paso 2: Construir una sección transversal

Deseamos a través de la curva sección longitudinal construir secciones transversales para poder efectuar las mediciones correspondientes. Para ello recurriremos a la herramienta del software llamada “multisección curva”.

En este caso efectuaremos tantas secciones a lo largo del cable como nos interese.

Hemos decidido en la fase 1 del proyecto que se trata de un análisis de repetibilidad del tomógrafo, donde efectuaremos 10 tomografías seguidas y en cada una realizaremos 3 secciones a lo largo del primer cable que hemos tomografiado. Esas secciones las elegimos de tal forma que una sea en la zona de inicio del cable, otra sección en la zona intermedia y la última sección en la zona final del cable. (Ver Figura 24)

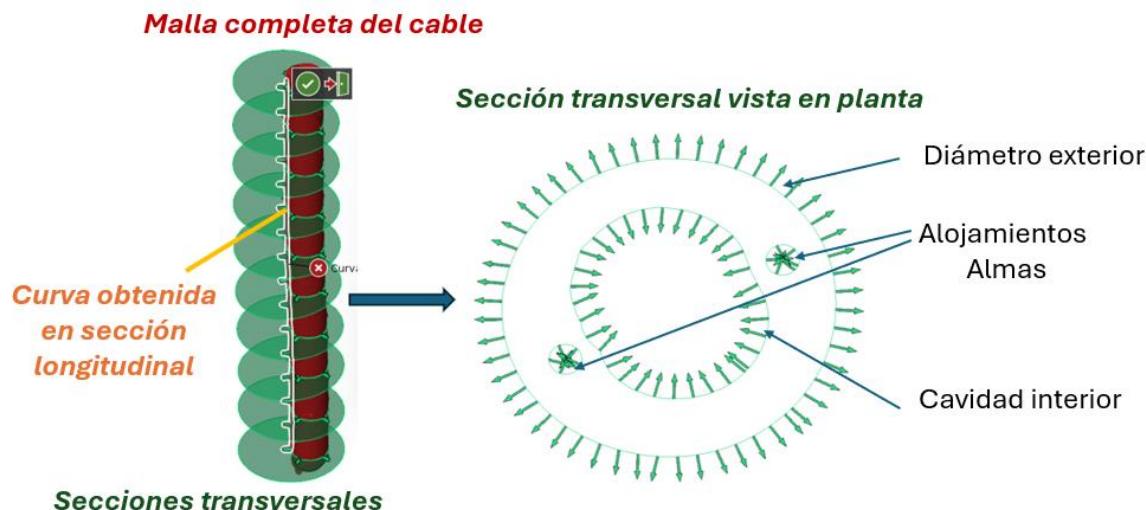


Figura 24: Secciones perpendiculares a la curva sección

Vemos que las secciones formadas son un conjunto de puntos producto de la intersección de los planos curvos con la malla. Por eso vemos que cada punto tiene su normal.

A partir de esos puntos de intersección construimos los elementos geométricos de ajuste ya sean círculos de ajuste para las almas y el exterior del cable, o bien, una elipse de ajuste para el interior del cable.

Seleccionaremos el método Best-Fit-Gaussiano para crear los círculos de ajuste y elipse de ajuste por la técnica de ajuste por mínimos cuadrados.

3.5 Parámetros de medición

Los parámetros que mediremos serán los siguientes, así como el procedimiento para lograr medirlos. Todos estos parámetros los mediremos en cada una de las secciones generadas. (Ver Figura 25)

- 1) **Diámetro de las almas** (Alma 1 y Alma 2).
- 2) **Diámetro de la cubierta del cable** (parte exterior del cable).
- 3) **Concentricidad:** Distancia entre centro exterior del cable y centro elipse (parte interior cable).
- 4) $L_{Alma\ 1-int\ cable}$ = distancia entre alma 1 al interior del cable.
- 5) $L_{Alma\ 2-int\ cable}$ = distancia entre el alma 2 al interior del cable.
- 6) **Ángulo entre almas:** Angularidad entre dos direcciones.
 - a. Distancia entre centro Alma 1 y centro de la elipse.
 - b. Distancia entre centro Alma 2 y centro de la elipse.
- 7) **GAP:** Distancia entre extremo del alma y el extremo de la elipse.
 - a. GAP 1 (Distancia entre extremo Alma 1 – extremo de la elipse).
 - b. GAP 2 (Distancia entre extremo Alma 2 – extremo de la elipse).

Para conseguir el **GAP** deberemos realizar el siguiente procedimiento:

Paso 1: Construir las líneas. Aunque tengamos las distancias entre centro de las almas con el centro de las elipses, las distancias no son elementos geométricos construidos.

- Línea Alma 1- Int Cable.
- Línea Alma 2 – Int Cable.

Paso 2: Construir punto de intersección entre la línea que hemos creado con la sección curva. Para cada sección, a la hora de construir los puntos de intersección elegiremos la sección curva correspondiente a la sección que estemos midiendo los parámetros, es decir, si estamos analizando la sección 1, la intersección será entre:

- Línea Alma 1- Int Cable con Sección 1
- Línea Alma 2 – Int Cable con Sección 1

Así sucesivamente se efectuará en cada sección en la que estemos.

A lo largo de la línea generada hay varios posibles puntos de intersección con la sección por lo que iremos recorriendo las líneas citadas antes hasta que consigamos los puntos de intersección deseados.

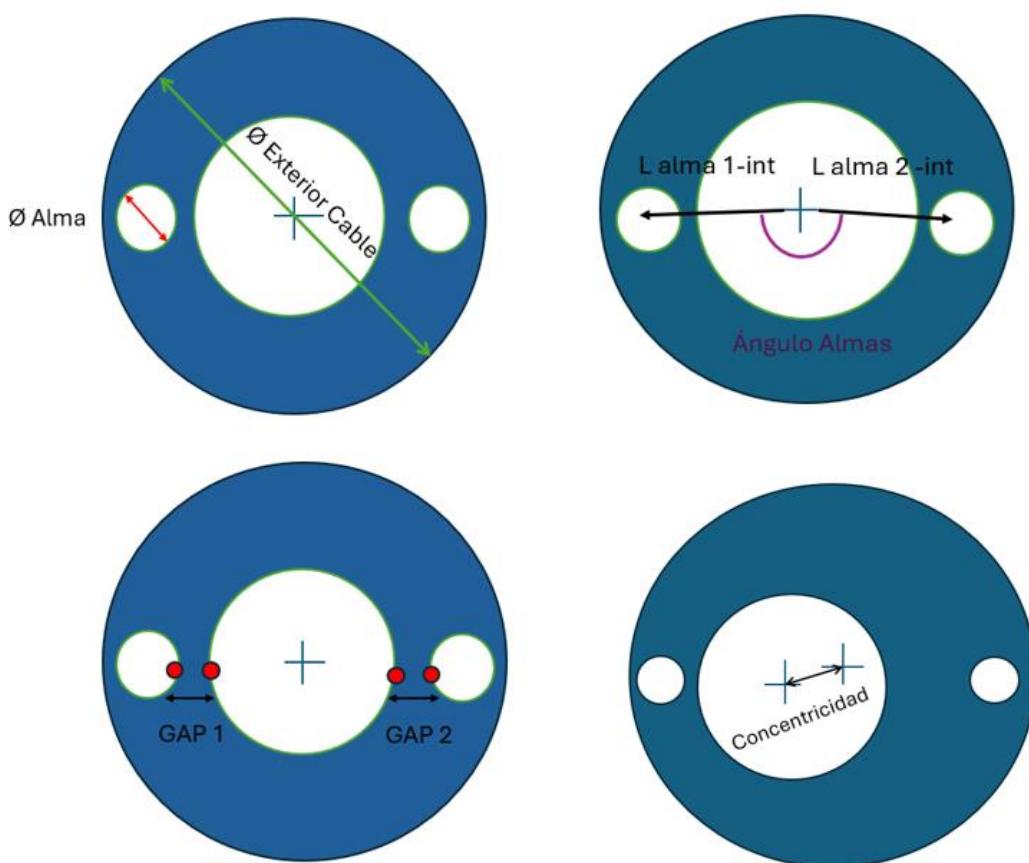


Figura 25: Parámetros de medición

Nuestro proceso de medición que hemos creado para evaluar los cables lo hemos llevado a cabo en la fase 1 y fase 2 del proyecto siguiendo el método que hemos descrito anteriormente.

4 CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES

4.1 Fase 1: Estudio de la repetibilidad de las mediciones

La fase 1 del proyecto consiste en un análisis de repetibilidad en el que de forma ininterrumpida realizamos 10 CT (tomografías computarizadas industriales) del cable 1, es decir, realizaremos 10 tomografías seguidas sin retirar en ningún momento el cable del Zeiss Metrotom para comprobar la variabilidad de la medición en los resultados ya que debería ser la misma en las 10 CT.

Una vez realizadas las 10 tomografías, reduciremos el volumen, identificaremos materiales, poligonizaremos el volumen obteniendo la malla, la cual alinearemos.

A continuación, realizaremos 3 secciones del cable 1 en las cuales mediremos todos los siguientes parámetros:

- Diámetro Exterior de la cubierta del cable.
- Diámetro de las 2 almas.
- Concentricidad entre parte exterior e interior de la cubierta del cable.
- Ángulo entre las almas.
- $L_{Alma\ 1-int\ cable}$ = distancia entre alma 1 al interior del cable.
- $L_{Alma\ 2-int\ cable}$ = distancia entre el alma 2 al interior del cable.

Obtenemos los siguientes resultados en el ZEISS INSPECT X-RAY que los hemos plasmado como tablas dinámicas en Excel y los vamos a ilustrar en varias tablas (*Tabla 1 y ;Error! No se encuentra el origen de la referencia.*) para explicarlo con mayor legibilidad:

En esta fase hemos calculado el **promedio, varianza, recorrido, desviación típica** e **incertidumbre de calibración** para cada parámetro de medición a lo largo de las 3 secciones que hemos realizado en el ZEISS INSPECT X-RAY del cable 1. Los cálculos de las incertidumbres de calibración e incertidumbres de medición los analizaremos y explicaremos más adelante en el proyecto.

Finalmente hemos decidido quedarnos con desviación típica e incertidumbre de calibración máximas para cada cota que serán nuestro punto de partida a la hora de calcular las incertidumbres de medición y tolerancias mínimas admisibles en la fase 2 del proyecto.

En la Tabla 1 ilustrativa se muestran los resultados de las mediciones de esta primera fase de los cuales podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Vemos que en el ángulo entre almas aquella que más se aleja de la situación ideal de 180º es en la sección 2 con un ángulo de 172.38º. Sin embargo, es en la sección 1 donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración que serán nuestros resultados máximos finales de la tabla.
- En referencia a los diámetros del alma 1 vemos que es en la sección 3 donde obtenemos el valor máximo promedio mientras que de nuevo en la sección 1 es donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.

- Respecto a los diámetros del alma 2 es en la sección 2 donde obtenemos mayor valor de promedio, así como mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.
- En referencia a los diámetros del exterior del cable (cubierta), vemos que es en la sección 3 donde obtenemos el valor máximo promedio mientras que en la sección 2 es donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.

Tabla 1: Resultados del análisis de repetibilidad del proceso de medición

MEDIDA	CT_0	CT_1	CT_2	CT_3	CT_4	CT_5	CT_6	CT_7	CT_8	CT_9	\bar{x}	σ_c	Rc	Sc	Ic	n 10 kc 2	
																Sc Max	Ic max
FASE 1 ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD DEL PROCESO DE MEDICIÓN																	
Ángulo (°)																Ángulo (°)	
Ángulo Almas																	
Sección 1	176,08	175,89	175,48	176,07	176,02	175,43	175,29	175,44	175,57	175,80	175,71	0,08	0,79	0,28	0,18		
Sección 2	172,25	172,35	172,36	172,44	172,28	172,26	172,70	172,38	172,55	172,21	172,38	0,02	0,49	0,14	0,09		
Sección 3	173,50	173,82	173,65	173,83	173,72	173,64	173,80	173,50	173,70	173,27	173,64	0,03	0,56	0,17	0,11		
Diámetros (mm)																Diámetros (mm)	
Alma 1																	
Sección 1	1,2337	1,2097	1,1901	1,2200	1,2155	1,2070	1,1862	1,2042	1,2047	1,2024	1,2074	0,0002	0,0475	0,0131	0,0083		
Sección 2	1,1841	1,1823	1,1778	1,1837	1,1725	1,1769	1,1906	1,1858	1,1828	1,1887	1,1825	0,0000	0,0182	0,0052	0,0033		
Sección 3	1,2378	1,2337	1,2217	1,2427	1,2368	1,2452	1,2233	1,2258	1,2159	1,2001	1,2283	0,0002	0,0450	0,0131	0,0083		
Alma 2																	
Sección 1	1,1951	1,2003	1,1935	1,1966	1,1791	1,1992	1,1983	1,1902	1,1874	1,1950	1,1935	0,0000	0,0212	0,0061	0,0039		
Sección 2	1,1953	1,2003	1,2198	1,2099	1,2136	1,2025	1,2127	1,2275	1,2287	1,1952	1,2105	0,0001	0,0335	0,0116	0,0074		
Sección 3	1,2258	1,2070	1,2005	1,2083	1,2015	1,2107	1,2215	1,2107	1,2101	1,2002	1,2096	0,0001	0,0257	0,0081	0,0051		
Exterior																	
Sección 1	11,8546	11,8585	11,8670	11,8806	11,8802	11,8599	11,8621	11,8633	11,8663	11,8548	11,8647	0,0001	0,0260	0,0088	0,0055		
Sección 2	11,8287	11,8250	11,8511	11,8329	11,8555	11,8342	11,8739	11,8482	11,8392	11,8286	11,8417	0,0002	0,0489	0,0146	0,0092		
Sección 3	11,8772	11,8883	11,8848	11,9078	11,8874	11,8883	11,8964	11,8880	11,8981	11,8770	11,8893	0,0001	0,0309	0,0089	0,0056		
Distancias (mm)																Distancias (mm)	
Gap 1																	
Sección 1	0,6281	0,6318	0,6277	0,6417	0,6359	0,6283	0,6300	0,6317	0,6278	0,6270	0,6310	0,0000	0,0147	0,0044	0,0028		
Sección 2	0,5275	0,5251	0,5297	0,5223	0,5340	0,5264	0,5300	0,5240	0,5239	0,5279	0,5271	0,0000	0,0118	0,0033	0,0021		
Sección 3	0,4563	0,5188	0,5337	0,5267	0,5202	0,4770	0,5092	0,5246	0,4586	0,4586	0,4984	0,0009	0,0774	0,0302	0,0191		
Gap 2																	
Sección 1	0,6333	0,6279	0,6345	0,6368	0,6390	0,6355	0,6365	0,6331	0,6315	0,6336	0,6342	0,0000	0,0111	0,0029	0,0019		
Sección 2	0,6112	0,6084	0,6076	0,6020	0,6068	0,6077	0,6093	0,6111	0,6016	0,6112	0,6077	0,0000	0,0096	0,0033	0,0021		
Sección 3	0,6522	0,6500	0,6601	0,6523	0,6512	0,6504	0,6523	0,6505	0,6548	0,6511	0,6525	0,0000	0,0101	0,0029	0,0018		
Alma 1 - Int cable																	
Sección 1	4,3605	4,3655	4,3686	4,3653	4,3548	4,3606	4,3630	4,3549	4,3698	4,3602	4,3623	0,0000	0,0150	0,0049	0,0031		
Sección 2	4,2984	4,2960	4,3141	4,2957	4,3091	4,3005	4,3223	4,3061	4,3020	4,3032	4,3047	0,0001	0,0265	0,0080	0,0051		
Sección 3	4,2875	4,2816	4,2911	4,2830	4,2944	4,2918	4,2886	4,2919	4,3081	4,2989	4,2917	0,0001	0,0265	0,0073	0,0046		
Alma 2 - Int cable																	
Sección 1	4,2447	4,2565	4,2605	4,2972	4,2901	4,2642	4,2671	4,2672	4,2678	4,2496	4,2665	0,0002	0,0525	0,0155	0,0098		
Sección 2	4,3443	4,3388	4,3497	4,3413	4,3598	4,3402	4,3729	4,3550	4,3305	4,3449	4,3477	0,0001	0,0423	0,0115	0,0073		
Sección 3	4,3794	4,4031	4,3767	4,4215	4,3835	4,3796	4,3957	4,3780	4,3805	4,3750	4,3873	0,0002	0,0466	0,0142	0,0090		
Concentricidad																	
Sección 1	0,0907	0,0872	0,0964	0,0980	0,0959	0,0986	0,0978	0,1009	0,0953	0,0933	0,0954	0,0000	0,0138	0,0039	0,0024		
Sección 2	0,1771	0,1778	0,1755	0,1754	0,1688	0,1774	0,1611	0,1762	0,1755	0,1767	0,1741	0,0000	0,0167	0,0050	0,0032		
Sección 3	0,1433	0,1332	0,1416	0,1268	0,1413	0,1417	0,1339	0,1403	0,1425	0,1433	0,1388	0,0000	0,0166	0,0053	0,0033		

- Respecto al Gap 1, vemos que es en la sección 1 donde obtenemos el valor máximo promedio mientras que en la sección 3 es donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración que serán nuestros resultados máximos finales de la tabla.
- En referente al Gap 2, vemos que es en la sección 1 donde obtenemos el valor máximo promedio, mientras que en la sección 2 es donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.
- Respecto a las distancias entre alma 1 – interior cable, es la sección 1 el que mayor valor promedio tiene, mientras que es en la sección 2 donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.



- En referente a las distancias entre alma 2 – interior cable, es la sección 3 el que mayor valor promedio tiene, mientras que es en la sección 1 donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.
- Por último, en el parámetro de la concentricidad, es en la sección 2 donde se encuentra el mayor valor promedio, sin embargo, es en la sección 3 donde obtenemos mayor valor de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.
- Cabe resaltar que únicamente en el parámetro del diámetro del alma 2 coinciden en la misma sección el mayor valor promedio y mayores valores de desviación típica de calibración y de incertidumbre de calibración.

4.2 Fase 2: Análisis del proceso de medición del producto

En esta fase del proyecto realizaremos 4 tomografías (CT), una para cada uno de los cuatro cables del lote de fabricación.

Una vez realizada la tomografía de cada cable por separado, reduciremos el volumen, identificaremos materiales, poligonizaremos el volumen obteniendo la malla, la cual alinearemos finalmente.

Realizaremos 10 secciones transversales en cada cable y mediremos los siguientes parámetros:

- Diámetro Exterior de la cubierta del cable.
- Diámetro de las 2 almas (Alma 1 y Alma 2).
- Concentricidad entre parte exterior e interior de la cubierta del cable.
- Ángulo entre las almas.
- $L_{Alma\ 1-int\ cable}$ = distancia entre alma 1 al interior del cable.
- $L_{Alma\ 2-int\ cable}$ = distancia entre el alma 2 al interior del cable.

Esta ha sido la fase más larga de nuestro proyecto en el cual hemos tenido que analizar con detalle cada uno de los cuatro cables ya que al haber tantas secciones que evaluar había también una mayor probabilidad de error en las mediciones.

Tabla 2: Resultados del análisis de medición del producto y comparación entre cables

MEDIDA	FASES 2 Y 3 ANÁLISIS DE MEDICIÓN DEL PRODUCTO Y COMPARACIÓN ENTRE CABLES										km 2	kc 2	n 1	m 1			
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10							
Ángulo (º)																	
Ángulo Almas	Cable 1	173,46	174,13	173,57	172,78	171,93	173,23	174,69	174,98	175,34	175,41	173,95	3,48	1,10			
	Cable 2	178,65	179,65	179,93	179,41	179,91	179,95	179,88	179,72	179,85	179,87	179,68	1,30	0,38	0,28	0,18	1,00 $\pm 3,01$
	Cable 3	175,10	176,84	176,83	178,10	177,90	179,28	178,79	179,51	179,03	179,22	178,06	4,41	1,35			
	Cable 4	179,80	178,66	179,48	179,57	179,50	179,24	178,22	178,76	178,84	178,85	179,09	1,58	0,47			
Diámetro (mm)																	
Alma 1	Cable 1	1,2422	1,1956	1,1969	1,1956	1,1963	1,1977	1,1955	1,2006	1,1961	1,1936	1,2010	0,0486	0,0138			
	Cable 2	1,5311	1,4704	1,4708	1,3845	1,3822	1,4600	1,4317	1,4336	1,4261	1,3880	1,4378	0,1489	0,0447			
	Cable 3	1,4239	1,3497	1,3664	1,2958	1,3330	1,2912	1,3766	1,3653	1,3637	1,3415	1,3507	0,1327	0,0369			
	Cable 4	1,4500	1,4600	1,4700	1,4800	1,4600	1,4700	1,5000	1,4400	1,4300	1,4600	1,4620	0,0700	0,0189			
Alma 2	Cable 1	1,2112	1,1792	1,2042	1,1804	1,1819	1,1868	1,1821	1,2183	1,1791	1,2407	1,1964	0,0616	0,0202			
	Cable 2	1,2416	1,2364	1,2330	1,2195	1,2370	1,2367	1,2397	1,2226	1,2226	1,2310	1,2320	0,0221	0,0074			
	Cable 3	1,3027	1,2149	1,2307	1,2090	1,2144	1,2635	1,3075	1,2366	1,2620	1,2501	1,2491	0,0985	0,0334			
	Cable 4	1,4400	1,4400	1,3500	1,3300	1,3300	1,4000	1,3800	1,3800	1,4000	1,3890	1,1100	0,0409				
Exterior	Cable 1	11,8671	11,8512	11,8263	11,8181	11,8373	11,8291	11,8342	11,8439	11,8596	11,8679	11,8435	0,0498	0,0166			
	Cable 2	11,4401	11,4437	11,4314	11,3973	11,3838	11,3988	11,3331	11,4179	11,4055	11,4194	11,4071	0,1106	0,0308			
	Cable 3	11,8600	11,8447	11,8513	11,8410	11,8555	11,8667	11,8817	11,8906	11,8717	11,8694	11,8633	0,0495	0,0150			
	Cable 4	11,4200	11,4400	11,3900	11,3900	11,4100	11,3800	11,3800	11,3800	11,3700	11,3940	0,0700	0,0211				
Distancia (mm)																	
Alma 1 - Int cable	Cable 1	4,4022	4,3465	4,3269	4,3285	4,3459	4,3351	4,3560	4,3804	4,3645	4,3463	4,3532	0,0753	0,0225			
	Cable 2	3,6298	3,7058	3,6452	3,6760	3,6373	3,6151	3,7384	3,7406	3,7106	3,7359	3,6840	0,1256	0,0467			
	Cable 3	4,3408	4,3058	4,3037	4,3136	4,3187	4,2803	4,3455	4,3377	4,3450	4,3198	4,3211	0,0652	0,0202			
	Cable 4	3,6500	3,5800	3,6300	3,6300	3,6900	3,7000	3,6400	3,7400	3,6900	3,6900	3,6640	0,1600	0,0439			
Concentricidad																	
	Cable 1	0,1385	0,1122	0,1387	0,1603	0,1866	0,1577	0,1187	0,0802	0,1008	0,1112	0,1303	0,1064	0,0304			
	Cable 2	0,1778	0,1732	0,1680	0,1708	0,1584	0,1473	0,0707	0,1112	0,1715	0,1608	0,1510	0,1070	0,0324			
	Cable 3	0,1023	0,1019	0,1164	0,1265	0,1258	0,1343	0,1392	0,1408	0,1391	0,1422	0,1268	0,0402	0,0146			
	Cable 4	0,1700	0,1700	0,1500	0,1600	0,1500	0,1500	0,1200	0,1100	0,1500	0,1300	0,1460	0,0600	0,0191			
Gap 1																	
	Cable 1	0,6686	0,6352	0,6069	0,5972	0,6048	0,6071	0,6518	0,6689	0,6522	0,6302	0,6223	0,0718	0,0259			
	Cable 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0302	0,0191	0,21 $\pm 0,6403$			
	Cable 3	0,6392	0,6527	0,5812	0,5985	0,5840	0,6635	0,4539	0,6675	0,5600	0,6323	0,6033	0,2137	0,0612			
	Cable 4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
Gap 2																	
	Cable 1	0,5500	0,5813	0,5974	0,5996	0,5779	0,5289	0,6625	0,6496	0,6514	0,6326	0,6031	0,1337	0,0429			
	Cable 2	0,3688	0,3859	0,3827	0,3906	0,3049	0,3076	0,3319	0,2661	0,3004	0,3019	0,3341	0,1245	0,0422			
	Cable 3	0,6137	0,5668	0,4772	0,6213	0,6990	0,7046	0,7078	0,6905	0,7627	0,4929	0,6337	0,2855	0,0916			
	Cable 4	0,3400	0,3500	0,3800	0,3000	0,3600	0,3100	0,3100	0,3400	0,3000	0,3300	0,3320	0,0800	0,0256			
Alma 2 - Int cable																	
	Cable 1	4,3038	4,2368	4,2813	4,2843	4,3086	4,3123	4,2771	4,2365	4,2514	4,2586	4,2751	0,0758	0,0269			
	Cable 2	4,0732	4,0969	4,1183	4,1093	4,1564	4,1739	4,1739	4,1706	4,1762	4,1669	4,1415	0,1031	0,0364			
	Cable 3	4,3562	4,3572	4,3489	4,3258	4,3194	4,3373	4,3721	4,3350	4,3503	4,3448	4,3447	0,0526	0,0149			
	Cable 4	4,2300	4,1900	4,1700	4,1900	4,1600	4,1800	4,1500	4,1700	4,2100	4,2100	4,1860	0,0800	0,0237			

- En primer lugar, observamos que en todos los parámetros de medición: $I_m \geq I_c$ calculada en la fase 1.
- Vemos que en el ángulo entre almas aquella que más se aleja de la situación ideal de 180° es el cable 1 (173.95°). Sin embargo, el que tiene más recorrido y mayor desviación estándar de medición es el cable 3. Hemos obtenido que para una incertidumbre de medición de 1° , la tolerancia mínima admisible es de $\pm 3.01^\circ$.
- En los diámetros del alma 1, es el cable 4 el que tiene mayor valor de promedio, recorrido y desviación estándar de medición siendo su incertidumbre de medición 0.13 y su tolerancia mínima admisible de ± 0.408 mm.
- En los diámetros del alma 2, es el cable 4 el que tiene mayor valor de promedio, recorrido y desviación estándar de medición siendo su incertidumbre de medición 0.13 mm y su tolerancia mínima admisible de ± 3.772 mm.
- En referencia a los diámetros del exterior del cable (cubierta), es el cable 3 el que tiene mayor valor de promedio, recorrido y desviación estándar de medición siendo

su incertidumbre de medición 0.14 mm y su tolerancia mínima admisible de ± 0.4256 mm.

- Respecto a las distancias entre Alma 1 – interior cable, es el cable 1 el que mayor promedio tiene, mientras que el cable 4 tiene mayor recorrido y el cable 2 es el que tiene mayor desviación estándar de medición. Obtenemos una incertidumbre de medición de 0.10mm y una tolerancia mínima admisible de ± 0.3095 mm.
- En referencia a las distancias entre Alma 2 – interior cable, es el cable 3 el que mayor promedio tiene, mientras que el cable 2 tiene mayor recorrido y el cable 2 es el que tiene mayor desviación estándar de medición. Obtenemos una incertidumbre de medición de 0.15 mm y una tolerancia mínima admisible de ± 0.4402 mm.
- Observamos que en las concentricidades es el cable 2 el que tiene mayor promedio, mayor recorrido y mayor desviación estándar de medición. Obtenemos una incertidumbre de medición de 0,08 mm y una tolerancia mínima admisible de ± 0.2493 mm.
- En los Gap 1 es el cable 1 el que tiene mayores valores de promedio, mientras que es el cable 3 es el que tiene mayor recorrido y desviación estándar de medición. Vemos que en el cable 2 y el cable 4 el valor del Gap 1 es cero ya que el alma 1 está salida y desplazada del lugar donde estaba embutida y se encuentra en el interior del cable. Hallamos una incertidumbre de medición de 0.21 mm y una tolerancia mínima admisible de ± 0.6403 mm.
- En los Gap 2 es el cable 3 el que tiene mayor valor de promedio, de recorrido y de desviación estándar de medición. Obtenemos una incertidumbre de medición de 0,0654 mm y una tolerancia mínima admisible para esa incertidumbre de medición de ± 0.4402 mm.

4.3 Explicación de los cálculos y análisis de resultados

En la fase 1 del proyecto se han calculado los siguientes parámetros estadísticos de los resultados:

- Media Aritmética.
- Desviación Típica.
- Recorrido: $R = \text{Max} - \text{min}$.
- Incertidumbre de calibración.
- Incertidumbre de medición.

Se ha trabajado con las siguientes expresiones para la incertidumbre de medición y calibración:

$$I_m = K \sqrt{\left(\frac{I_0}{K_0}\right)^2 + S_c^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m}\right)}$$

$$I_c = K_c \sqrt{\left(\frac{I_0}{K_0}\right)^2 + \frac{S_c^2}{n}}$$

Se ha considerado:

- $K_c=2$
- $\left(\frac{I_0}{K_0}\right)^2 = 0$ ya que el cable master utilizado tiene una precisión bastante mayor que el sistema de medida y por lo tanto se desprecia este término.
- $n=10$ ya que n representa el número de tomografías realizada en el cable.

Por tanto:

$$I_c = 2 \sqrt{\frac{S_c^2}{10}} = 2 \frac{S_c}{\sqrt{10}}$$

En la fase 2 del proyecto no se ha trabajado con la siguiente expresión ya que se ha calculado la incertidumbre de calibración en la fase 1.

$$I_m = K \sqrt{\left(\frac{I_0}{K_0}\right)^2 + S_c^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m}\right)}$$

Se ha utilizado directamente la siguiente expresión:

$$I_m = K \sqrt{\left(\frac{I_c}{K_c}\right)^2 + \frac{S_m^2}{m}}$$

Se ha considerado:

- $K=2$
- $K_c=2$
- $m=1$ ya que m representa el número de reiteraciones en medición.

Por lo tanto:

$$I_m = 2 \sqrt{\left(\frac{I_c}{2}\right)^2 + S_m^2}$$

Se ha calculado la tolerancia mínima que podrían tener las características medidas para que este método de medición fuera capaz desde el punto de vista metrológico:

$$\frac{2I_m}{T} \leq \frac{1}{3}$$

$$T_{min} = 6I_m \quad T_{min} = \pm 3I_m$$

Tabla 3: Resumen de resultados

MEDIDA	X	R	Sm	Sc	Ic	Im	Tmin
• Ángulo (º)	SECCIONES			FASE 1		Ángulo (º)	
• Ángulo Almas							
Cable 1	173,95	3,48	1,10				
Cable 2	179,68	1,30	0,38	0,28	0,18	1,00	±3,01
Cable 3	178,06	4,41	1,35				
Cable 4	179,09	1,58	0,47				
• Diámetro (mm)	SECCIONES			FASE 1		Diámetro (mm)	
• Alma 1							
Cable 1	1,2010	0,0486	0,0138				
Cable 2	1,4378	0,1489	0,0447	0,0131	0,0083	0,13	±0,4018
Cable 3	1,3507	0,1327	0,0369				
Cable 4	1,4620	0,0700	0,0189				
• Alma 2							
Cable 1	1,1964	0,0616	0,0202				
Cable 2	1,2320	0,0221	0,0074	0,0116	0,0074	0,13	±0,3772
Cable 3	1,2491	0,0985	0,0334				
Cable 4	1,3890	0,1100	0,0409				
• Exterior							
Cable 1	11,8435	0,0498	0,0166				
Cable 2	11,4071	0,1106	0,0308	0,0146	0,0092	0,14	±0,4256
Cable 3	11,8633	0,0495	0,0150				
Cable 4	11,3940	0,0700	0,0211				
• Distancia (mm)	SECCIONES			FASE 1		Distancia (mm)	
• Alma 1 - Int cable							
Cable 1	4,3532	0,0753	0,0225				
Cable 2	3,6840	0,1256	0,0467	0,0080	0,0051	0,10	±0,3095
Cable 3	4,3211	0,0652	0,0202				
Cable 4	3,6640	0,1600	0,0439				
• Concentricidad							
Cable 1	0,1303	0,1064	0,0304				
Cable 2	0,1510	0,1070	0,0324	0,0053	0,0033	0,08	±0,2493
Cable 3	0,1268	0,0402	0,0146				
Cable 4	0,1460	0,0600	0,0191				
• Gap 1							
Cable 1	0,6323	0,0718	0,0259				
Cable 2	0,0000		0,0000	0,0302	0,0191	0,21	±0,6403
Cable 3	0,6033	0,2137	0,0612				
Cable 4	0,0000		0,0000				
• Gap 2							
Cable 1	0,6031	0,1337	0,0429				
Cable 2	0,3341	0,1245	0,0422	0,0033	0,0021	0,07	±0,1962
Cable 3	0,6337	0,2855	0,0916				
Cable 4	0,3320	0,0800	0,0256				
• Alma 2 - Int cable							
Cable 1	4,2751	0,0758	0,0269				
Cable 2	4,1415	0,1031	0,0364	0,0155	0,0098	0,15	±0,4402
Cable 3	4,3447	0,0526	0,0149				
Cable 4	4,1860	0,0800	0,0237				

Hemos plasmado aquí el resumen de los resultados finales los cuales hemos ido analizando pormenorizadamente en cada una de las fases.

Los resultados finales son los de la fase 2 ya que a través de los resultados de la fase 1 de incertidumbre de calibración máxima y desviación típica de calibración máxima han sido los inputs de nuestra tabla de la fase 2.

5 Conclusiones

Este proyecto realizado consiste en la evaluación y creación de un método de medición de cables de cualquier lote de fabricación.

Se ha desarrollado un proceso de medición de un lote de cables de micromódulos los cuales en primer lugar hemos escaneado con el programa METROTOM OS para obtener el volumen 3D y en segundo lugar a través del programa ZEISS INSPECT X-RAY hemos poligonizado el volumen 3D generando una malla sobre la cual hemos realizado la caracterización metrológica.

La fase más crítica y de mayor duración del proyecto fue realizar las mediciones del lote de 4 cables en el programa ZEISS INSPECT X-RAY.

Se han obtenido resultados de promedios, recorridos, desviaciones estándar, incertidumbres de medición, pudiendo comparar simultáneamente los 4 cables.

Se ha hecho un estudio de la capacidad del sistema de medida obteniendo las tolerancias que este método de medida sería capaz de controlar.

Vemos también que con esta técnica de inspección se puede estudiar la variabilidad del proceso de fabricación del cable. Se observa variabilidad en las mediciones tanto en la fase 1 como en la fase 2. El orden de variabilidad en la gran mayoría de casos hemos observado que es de décimas de mm o de centésimas de mm.

Para que este método de medida se pudiese utilizar en un control en proceso en tiempo real sería necesario utilizar tomografía o rayos X integrada en la línea de producción, lo que sería muy interesante como desarrollo futuro.

6 Referencias

Todas aquellas imágenes en las que no se ha citado la fuente son de elaboración propia.

Figura 1,3,4,5,26: CABLESCOM.COM

Figura 2: Fuente <https://www.opticomfiber.com/info/single-mode-fiber-multi-mode-fiber-31911681.html>

Figura 6: Montero Villacampa, Fernando. Optimización del proceso de medición y comparación de métodos de extracción de superficies con sistemas de tomografía computarizada. Trabajo fin de grado.

Figura 27 Extrusora: Máquinas y materiales para los sectores de plástico, espumas, papel y cartón. Blog Danzé Trade.

[1]. M^a Dolores Del Campo Maldonado, José Ángel Robles Carbonell. La Metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial.

[2]. Arturo Sinué Ontiveros Zepeda. Análisis y mejora de la precisión de sistemas de tomografía computarizada en aplicaciones metrológicas. Tesis doctoral.

[3] Ileana Fleitas Estévez. X congreso regional latinoamericano IRPA de protección y seguridad radiológica. Principios generales de tomografía computarizada (CT). Abril 2015, Buenos Aires, Argentina

[4] Arturo Armiñana. Tomografía computarizada espectral y unidades Hounsfield: Bases para una correcta interpretación. Revista Anales Ranm (2023). Hospital universitario y politécnico La Fe.

[5] Revista Ingeniería Biomédica ISSN 1909-9762, volumen 4, número 7, enero-junio 2010, págs. 55-62 Escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES, Medellín, Colombia

[6] Revista Ingeniería Biomédica ISSN 1909-9762, volumen 4, número 7, enero-junio 2010, págs. 55-62 Escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES, Medellín, Colombia

[7] Marcado por inyección de tinta. Empresa Schleuniger.
<https://www.schleuniger.com/es/productos/perifericos/marcado-inyeccion-etiquetado/marcado-por-inyeccion-de-tinta/>

[8] Software Q-PLANT. <https://www.taionline.net/documents/35.html>



ANEXO I

TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

Existen dos tipos de fibra óptica: Monomodo y Multimodo. Nosotros en el proyecto nos estamos centrándole en la fibra monomodo. (Ver Figura 26; *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*)

Tabla 4: Comparativa entre monomodo y multimodo

MONOMODO	MULTIMODO
Núcleo pequeño	Núcleo más grande
Poca dispersión del pulso	Dispersión mayor
Altísima transmisión de datos: > 40 -100 Gb/s	Alta transmisión de datos (según tipo OMx)
Idónea para largas distancias: 20-40 Km	Idónea para medias-cortas distancias: 2Km
Utiliza fuentes láser	Permite fuentes LED



Figura 26: Especificaciones de monomodo

Consideraciones sobre el Uso de Fibra Monomodo:

- Aunque la fibra monomodo puede transmitir distancias más largas, es más costosa debido al uso de diodos láser de estado sólido como fuente de luz, en comparación con los LED utilizados en la fibra multimodo.
- La fibra multimodo, con su mayor diámetro de núcleo, soporta múltiples modos de transmisión y es más económica.
- Para transmisiones ópticas de corta distancia y cableado LAN, la fibra multimodo es más adecuada por su coste y eficiencia.

1. Diferencias Básicas entre Fibra Monomodo y Multimodo:

- **Fibra Monomodo:**

- Núcleo de 9 μm .
- Velocidades de 100 M/s o 1 G/s.
- Distancias de transmisión > 5 km.
- Fuente de luz: láser.
- Color del cable: amarillo.
- Conector: azul o verde.

- Longitud de onda: 1310nm ~ 1550nm.

- **Fibra Multimodo:**

- Núcleo de 50 μm o 62.5 μm .
- Velocidades típicas de 100 M/s hasta 2 km, 1 G/s hasta 1000 m, 10 G/s hasta 550 m.
- Fuente de luz: LED.
- Color del cable: naranja para gigabit, azul agua para multigigabit.
- Conector: blanco grisáceo.
- Longitud de onda: 850nm ~ 1310nm.

2. Clasificación de Fibra Monomodo y Multimodo:

- **Fibra Monomodo:**

- Tipos: G-652, G-655, G-657.
- Dentro de G-657 tenemos 2 categorías: G-657-A1 y G-657-A2 (esta es la fibra monomodo de mejor calidad).
- Dentro de G-652 tenemos 3 categorías: G-652-Intermedia, G-652-Normal y G-652-D.
- De mayor a menor calidad: G-657-A2 > G-657-A1 > G-652.

- **Fibra Multimodo:**

- Tipos: OM1, OM2, OM3, OM4, OM5.
- OM5 soporta 4 longitudes de onda simultáneamente y es ideal para centros de datos 40G/100G.
- OM1/OM2: Usado en interiores, color naranja.
- OM3/OM4: Usado en centros de datos 10G-40G/100G, colores azul agua, violeta, magenta.



ANEXO II

PROCESO PRODUCTIVO DE CABLES DE MICROMODULO

Fase I: Proceso de pintado de las fibras ópticas

Los micromódulos están compuestos por 6 FO, 12 FO y 24 FO.

Los proveedores traen bobinas de fibra óptica natural, es decir, sin colorear. Hay 12 colores lisos (1 fibra por cada color liso): Blanco, amarillo, verde, azul, rojo, naranja, marrón, turquesa, rosa, violeta, verde claro y negro

Antes del pintado, se va a la zona de batido de pintura. La pintura llega siempre líquida. El batido de pintura se produce en las máquinas volteadoras las cuales remueven bien los botes de pintura líquida que traen los proveedores para que no queden posos abajo del bote y así remover bien la pintura mezclándose y quedándose uniforme en todo el bote.

La capacidad de los botes de pintura líquida suele ser de 1 litro. Aproximadamente con un bote de pintura dará para pintar 2 bobinas de FO de 50 Km/bobina.

En la zona de pintado suelen producirse cuellos de botella ya que hay muchas más bobinas de FO que hay que pintar para la línea de producción de micromódulos, que máquinas pintadoras.

Las etapas del pintado y los elementos que intervienen son las siguientes:

- Desbobinador/Desencarretador donde se colocará la bobina de fibra óptica neutra. Es el punto de partida del proceso el cual irá desenrollando la fibra natural.
- Pintadora (sin anillos)
 - Inyección de Pintura (entra aire a presión en un tubo y por una varilla metálica sale la pintura).
 - Horno de Curado por radiación (se colocan dos hornos en serie para aumentar la velocidad del curado de la pintura).
- Bobinador/Encarretador donde recogeremos la bobina de FO pintada

Si la pintadora fuera con anillos es importante saber que primero se pintan los anillos y después la FO. Es crucial este orden.

Hay pintadoras que adicionalmente pintan anillos sobre las fibras a través de máquinas de marcado por inyección de tinta como **alphaJET** [7], y luego a través de un software especializado se comprueba la correcta visibilidad de los anillos pintados. Solo se pintan anillos si se quieren fabricar micromódulos de más de 12 FO, es decir, los de 24 FO que se mencionaron antes. Como dato significativo los micromódulos en el 95% de los casos están constituidos por 6 ó 12 FO. Únicamente se pintarán anillos en las FO cuando se vayan a producir micromódulos de 24 FO.

Tabla 5: Pintadoras

Pintadoras de anillos	Pintadoras (sin anillos)
Más antiguas	Más potentes
Peor curación de pintura en horno	Mejor curación de pintura (secado) al añadir un segundo horno en serie
$V_{max} = 1000\sim1200\text{ m/min}$	$V_{max} = 2100\sim2500\text{ m/min}$
Menor velocidad de pintado al tener que pintar anillos	Mayor Velocidad de línea de pintado al no tener que pintar anillos
Se estropean con mayor frecuencia	Se estropean con menor frecuencia

Fase II: Líneas de producción de micromódulos

Tras la fase 1 de pintado, se llevarán todas las bobinas de FO coloreadas a la sección de líneas de producción de micromódulos.

A continuación, se hará una breve descripción de las etapas y elementos que intervienen en el proceso de fabricación de los micromódulos:

1. Colocación de las bobinas de FO en los suplidores

En cada suplidor se colocará una bobina de FO. La capacidad máxima de suplidores por línea vendrá determinada por el tipo de micromódulo que se quiera fabricar. Si se desea un micromódulo de 6 FO se necesitarán 6 suplidores en los que se colocarán cada bobina en cada suplidor. De la misma forma se procederá para conseguir un micromódulo de 12 FO. Habitualmente, se tienen armarios con hasta 12 suplidores. El ingeniero técnico de procesos se encarga de informar al operario cuántos suplidores utilizar si 6 ó 12. Sin embargo, para los micromódulos formados por 24 FO se necesitará un armario complementario con 6 suplidores adicionales. La demanda de 24 FO es muchísimo menor que las habituales de 6 y 12 FO.

2. Arranque de las líneas de producción

Tabla 6: Arranque líneas de producción

ARRANQUE	Nominal	Tolerancias
Velocidad línea (m/min)	20	-5
Extrusora (rpm)	3.3	+2
Gel (rpm)	6.2	+2

3. Sistema de gel

Se vierte un gel que es un líquido viscoso sobre las FO. El objetivo es que el gel deje bien impregnadas las fibras (las cuales se agrupan) y además este gel hará de aislante del agua y así no entre agua a las FO. Se tienen que controlar dos parámetros claves:

- Temperatura gel manguera (°C).
- Velocidad Bomba de gel (rpm).

4. Extrusora

Recubrimiento de las fibras añadiéndole el colorante que se desea que tenga el cable de micromódulo.

- Tolva del aislante (Polyone)
- Tolva auxiliar - Dosificador del colorante

Durante el proceso de extrusión (*Ver ;Error! No se encuentra el origen de la referencia.7*) se recubren las FO con el aislante el cual se ha mezclado con el colorante obteniendo un cable micromódulo de color.

El aislante empleado en el recubrimiento de los micromódulos es de material termo-ignífugo. Se emplea este aislante y no el PBT que se emplea como aislante en los Loose Tube porque el diámetro de los micromódulos es menor.

La extrusora en las líneas de micromódulos son más pequeñas que en las de Loose Tube ya que el calibre de los cables es menor. El material con el que trabajaremos será de tipo termo-ignífugo llamado Polyone debido a sus propiedades mecánicas.

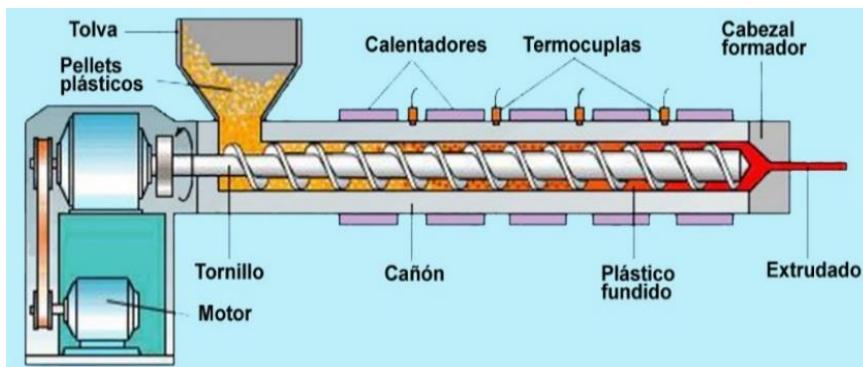


Figura 27: Extrusora

La extrusora con la que se trabajará será monohusillo, la cual se divide en 3 etapas:

- Transporte del material desde la tolva a la boquilla a una velocidad uniforme, para que el flujo en dicha boquilla sea constante.
- Plastificación del material, transformando el termoplástico bajo presión y temperatura del estado sólido al fundido.
- Mezcla y homogeneización del material, realizando un mezclado externo e interno del material con el fin de conseguir una fase continua.

La tolva que se empleará será una tolva dosificadora o mezcladora las cuales se utilizan al alimentar varios materiales (polímero aislante + aditivos) para homogeneizar la mezcla. Estas tolvas son volumétricas/gravimétricas.

La función del husillo es transportar el material desde la tolva, plastificarlo y dosificarlo con presión suficiente para llenar la boquilla.

A continuación, se describirán las zonas del husillo:

- Zona de alimentación: Transporte y compactación del granulado (Pellets).
- Zona de compresión: Fusión o plastificación del material.
- Zona de dosificación: Homogeneización del material fundido.

Tabla 7: Zonas extrusora

TEMPERATURA EXTRUSORA	NOMINAL (°C)	TOLERANCIAS (°C)
Tolva	100	±5
Zona 1	245	±5
Zona 2	245	±5
Zona 3	250	±5
Zona 4	250	±5
Zona 5	255	±5
Zona 6	255	±5
Zona 7	260	±5

Zona 8	260	± 5
Zona 9	245	± 5

5. Enfriamiento a través de las bañeras

El micromódulo recorre una gran longitud a través de bañeras de agua fría ya que sale a una temperatura elevadísima al pasar por la extrusora. Lo que buscamos con el enfriamiento es mantener las propiedades del micromódulo y que no varíe el diámetro \varnothing .

Tabla 8: Zonas enfriamiento bañera

TEMPERATURA BAÑERA	NOMINAL (°C)	TOLERANCIAS (°C)
Zona 1	40	± 5
Zona 2	20	± 5

6. Secado de agua de los micromódulos

7. Detectores del diámetro de los micromódulos

8. Detectores de bultos y valles

Los bultos son el exceso de material y los valles son la falta de material en el micromódulo.

Ambos detectores tanto el del diámetro como el de bultos y valles son los únicos controles de calidad en línea durante la línea de producción.

9. Danzarín – Bailarín seguido del Capstan

Para comprobar la tensión del micromódulo.

10. Capstan

En estas líneas de micromódulos se coloca un Capstan que es un dispositivo que marca la velocidad de la línea y del resto de elementos que la constituyen tales como medidor de diámetro y medidor de bultos y valles del micromódulo que se obtienen al final de la línea.

Tabla 9: Velocidades en línea de producción

Velocidad de la línea	Nominal (m/min)	Tolerancias (m/min)
Arranque	20	± 5
Durante la producción	200	± 5

11. Detector mecánico de bultos y valles

12. Control de exceso de fibras

El material produce pequeñas curvaturas dentro, esto da lugar al fenómeno llamado atenuación que es la pérdida de señal (ruido) a lo largo de la longitud de las FO del micromódulo fabricado. Se mide en dB/Km.

13. Encarretador / Bobinador

Donde se enrollará el micromódulo que se ha fabricado.

14. Extrusora de cubiertas

Una vez enrollados en bobinas los micromódulos fabricados, se llevan a otra sección para realizarles la cubierta final donde se juntarán con otros micromódulos los cuales se atarán a través de hilatura de aramida y protectores antibloqueo de agua y se embutirán los 2 FRP en la periferia de la cubierta.



ANEXO III:

CONTROLES DE

CALIDAD

Pintadoras – Proceso de pintado

Los principales defectos y decisiones técnicas para solventar los fallos en el proceso de pintado se citan a continuación:

- **Rotura de fibra:** es el defecto más común en el proceso de pintado. Por lo general se pondrá un adhesivo sobre la bobina de FO que ponga rotura de fibra, los metros que se han saneado y si la comprobación de la atenuación está correcta. Sin embargo, hay veces que, tras el saneado, no se notificará bien la longitud de la fibra de la bobina. Para asegurarse, se revisará la medida en la máquina Photon Kinetics (PK) o en el seguimiento de la orden de fabricación (OF) para ver que la longitud coincide con la de la etiqueta STOP. En caso de no coincidir, se tomará la decisión de notificar los metros correctos hasta la rotura de fibra (así es como se identificarán los fallos colocando un adhesivo con la palabra STOP y la descripción del problema sobre la bobina).
- **Longitud corta:** Este defecto se puede poner por rotura de fibra o porque la bobina ha venido con menos metros de los que debería de haber venido. La decisión que se tomará será la de incorporar la bobina pintada al proceso siguiente.
- **Fibra óptica mal curada:** Se identificará que está mal curada si al hacer la prueba del curado sale errónea. La decisión que se implementará será volver a pasar por la pintadora con el horno encendido. Durante el proceso de curado se pasará papel por la fibra y al finalizar se revisará detenidamente el curado tanto en los extremos como por el medio de la bobina
- **Encarretado defectuoso:** La decisión que se tomará será la de rebobinar la bobina de fibra óptica.
- **Fibra óptica con atenuación:** Este defecto es uno de los más problemáticos y que más aparecen durante esta etapa de pintado. Generalmente se comprueba la medida de la atenuación con la Máquina PK aquellas fibras de 200 μm que son las que dan muchísimos más problemas que las fibras de 250 μm

La máquina Photon Kinetics (PK) nos mide los siguientes parámetros:

- Longitud total de FO
- Atenuación: Pérdida de la señal a lo largo de la FO

Tabla 10: Comprobación de las Atenuaciones en Fibras de 200 μm

Longitudes de onda medidas con el PK	Límites de Atenuación
$\lambda = 1310 \text{ nm}$	0.35 dB/Km
$\lambda = 1550 \text{ nm}$	0.21 dB/Km
$\lambda = 1625 \text{ nm}$	0.24 dB/Km

- Si al medir se observa que hay atenuación, es decir, con que en una de las 3 longitudes de onda que se miden con el PK la fibra óptica supere los



límites de atenuación, se tomará la decisión técnica de esperar 24 horas desde el pintado de la bobina hasta repetir la medición.

- Si al medir de nuevo sigue saliendo que hay atenuación, la siguiente decisión será rebobinar y volver a medir.
- Si una vez rebobinada vuelve a salir mal la medida de atenuación, se tomará la decisión de cortar la bobina en dos longitudes iguales y medir.
- Si sigue dando mal la atenuación, se deberá ir cortando en mitades y midiendo atenuaciones hasta llegar a trozos con longitudes aproximadas a 5000 - 6000 metros.
- Finalmente, si sigue saliendo mal la atenuación, se decidirá desperdiciar toda la bobina.

Conclusión:

- En función del valor medido de atenuación se dejará en reposo (sin manipular) 1 ó 2 días la bobina de fibra óptica que diese mayores problemas de atenuación. **El nivel de atenuación es inversamente proporcional al tiempo de reposo al que hay que dejar la fibra óptica.**

➤ **Fibra óptica mal pintada:** En función del calibre de las fibras (250 µm o 200 µm) se realizarán diferentes decisiones técnicas.

- Para fibras de 250 µm: Se volverá a repintar con una hilera de salida de 270 micras.
- Para fibras de 200 µm: Se llevará a cabo el saneamiento del tramo sin pintura y se notificará el tramo de pintura bien pintado.

➤ **Fibra óptica sin anillos:**

- Si los anillos no van pintados se solucionará saneando el tramo con defecto y notificar el tramo bien pintado de los anillos.
- Si los anillos fallan intermitentemente o son poco legibles, se tomará la decisión de repintar toda la bobina de color negro.

Todas estas decisiones técnicas las decide el ingeniero técnico de procesos, el cual se encargará de trasladarlas a la línea de reparación de las pintadoras.

Arranque de las líneas de micromódulos

En el arranque se buscará optimizar el ahorro de material y de fibra óptica mediante unas pautas genéricas que siguen las principales empresas de fabricación de cables de fibra óptica de micromódulos:

1. Activar el sistema de gel y quitar la bañera de todas las tajaderas.
2. Poner la extrusora en torno a 1.8 rpm y el dosificador de gel a 1.5 rpm.
3. Enhebrar la fibra óptica a través del cabezal y bañeras.
4. Enganchar el micromódulo en la bobina y cerrar puerta del bobinador.
5. Colocar bien sopladores, pasar bien el micromódulo por los detectores de bulto/valle y colocar detector de anillos (si llevara la fibra).



6. Hacer cambio de bobina manual desde el bobinador/suplidor. Una vez hecho el cambio, subir a la pantalla de la línea y subir la velocidad de la línea. Ajustar de nuevo la velocidad en rpm de la extrusora y el dosificador de gel.

Pauta de autocontrol en el final de las líneas

La finalidad de estos controles de calidad que se diseñan es indicar al operario de las líneas de micromódulos las pruebas que debe de realizar durante el proceso y sobre el producto terminado.

El tipo de prueba que realizará el operario, así como la frecuencia de medida, son la establecidas por el software **Q-PLANT** [8] en el cual se notificarán los resultados obtenidos de estas pruebas.

Q-PLANT es un sistema de captura y gestión de datos en planta que permite coordinar, distribuir, arbitrar, integrar y representar la información del sistema principal y los elementos de la planta en tiempo real.

En caso de que alguno de los resultados de las pruebas esté fuera de lo indicado en la hoja de especificación de producto intermedio, se identificará esa fibra con una etiqueta de STOP para decidir las medidas a aplicar en las líneas de reparación.

1. Aspecto físico del micromódulo.
2. Diámetro exterior del micromódulo.

Nota: El diámetro máximo de un micromódulo de 24 FO es de 1.9 mm.

3. Diámetro Interior del micromódulo.
4. Espesor de la pared del aislante.
5. Excentricidad del micromódulo:

$$\text{Excentricidad micromodulo} = \frac{\text{Espesor Max} - \text{Espesor mín}}{2}$$

6. Ovalidad del micromódulo:

$$\text{Ovalidad micromodulo}(\%) = \left(\frac{\text{Diametro Max} - \text{Diametro mín}}{2} \right) \times 100$$

7. Atenuación y longitud de la fibra.
8. Alargamiento del micromódulo.
9. Penetrabilidad de agua en el micromódulo.
10. Borrado de anillos.
11. Dimensiones y separación entre anillos:
 - a. Anchura de los anillos del micromódulo.
 - b. Separación entre anillos del mismo grupo.
 - c. Separación entre grupo de anillos.



ANEXO IV

PRINCIPALES FALLOS EN PROCESO PRODUCTIVO DE MICROMODULOS

1. Longitud corta / Rotura de fibra

Se tendrá que reponer la longitud de fibra que falte hasta completar la longitud total del micromódulo. La longitud que se mande reponer tendrá que ser múltiplo de la longitud de corte en cable final.

2. Fibra abierta:

Se revisará a través de la máquina Photon Kinetics (PK) de que existe una fibra abierta. Si existe, se rebobinará la bobina de fibra y se cortará por defecto de fibra abierta. La mayoría de las veces sucederá esto porque hay caídas en la traza justo al final y el PK no mide la longitud completa, no porque la fibra esté abierta.

3. Dimensiones de anillos:

Los anillos se pintan en la fibra óptica para distinguir una fibra óptica de otra.

Generalmente en España, hay dos grandes grupos de distribuidores a los que se les mandan cables de micromódulos.

Para unos distribuidores, pintaremos los anillos bien definidos y con la separación de mm entre anillos que demandan ellos.

Para los otros distribuidores, si el defecto producido es la distancia entre anillos o el tamaño del anillo, siempre que queden diferenciados los anillos, se dará por válido.

Si saliera un micromódulo con anillos intermitentes, mal marcados o con fallo de marcador durante el proceso se decidirá reponer la longitud completa.

4. Encarretado defectuoso

Se tomará la decisión de rebobinar el carrete/bobina.

5. Bulto / Valle

Se tomará la decisión de rebobinar la bobina y reparar bultos/valles. Si se viese que lleva muchos bultos/valles o que no ha sonado la alarma del detector automático de bultos/valles se mandará la bobina a una línea de reparación específica ya que llevará detector y será más rápido de reparar.

6. Fibra con atenuación

- Si es fibra G-652-D se incorporará al proceso, incluso con caídas en la traza.
- Si es fibra G-652-A1 o G-652-A2, se tomará la decisión de rebobinar y volver a medir.

7. Se borran anillos / Sin anillos

Se abordará de la misma forma que cuando hay fallos en las dimensiones de los anillos.

8. Longitud de fibra diferente / Fibra corta

Se comprobará con la máquina PK cuánto miden las fibras en realidad. Si la fibra más corta cumple y entra en el rango de la orden de fabricación se incorporará la fibra, sin embargo, si no entrara en ese rango, se dejará la bobina en la zona de retajos (bobinas incompletas) y se tendrá que reponer la longitud completa.

Generalmente ocurre esto por caídas al final de la traza que hacen que la máquina PK no mida bien la longitud. Si esto ocurriera, se incorporaría.

9. Prueba de agua en tubo

Se decidirá ir saneando hasta que el micromódulo salga con gel y al hacer la prueba de agua, no pierda agua.

Los tramos de micromódulo sin gel no valen puesto que darán atenuaciones altas y perderán agua. Se tirarán en zona de desperdicios.

Es posible que el micromódulo lleve gel, pero que pierda agua por algún fallo en la prueba. Si se está seguro de que va bien impregnado de gel, se tomará la decisión de repetir la prueba.

10. Longitud larga

Si se tiene más fibra óptica de la necesaria, se incorporará al proceso siguiente.