

## Presentación del Proyecto Europeo EMPIR 20IND07 TracOptic

L. Carcedo<sup>(1)</sup>, M. Ozaita y E. Prieto

Centro Español de Metrología, Calle alfar 2, Tres Cantos (Madrid).

<sup>(1)</sup> +34918074795, lcarcedo@cem.es.

**RESUMEN:** El Proyecto EMPIR TracOptic “*Traceable industrial 3D roughness and dimensional measurement using optical 3D microscopy and optical distance sensors*”, surge como apoyo a los sectores industriales que necesitan en sus productos un adecuado control del acabado de superficies mediante medidas 3D realizadas con técnicas ópticas. Los resultados obtenidos con este tipo de medidas presentan una gran dependencia con la técnica óptica utilizada, las características intrínsecas del mensurando y la estrategia usada para el análisis de los datos. El consorcio del proyecto está integrado por nueve institutos metroológicos nacionales (entre los que se encuentra el CEM), y catorce entidades entre las que hay universidades, centros de investigación, empresas y proveedores de soluciones metroológicas. Su objetivo es mejorar la trazabilidad y compatibilidades de las medidas dimensionales y de rugosidad 3D, realizadas mediante técnicas ópticas.

### 1. INTRODUCCIÓN

La funcionalidad de muchos componentes industriales está ligada a su acabado superficial. La necesidad de un adecuado control del acabado de las superficies afecta a una gran variedad de sectores de la industria como el aeroespacial o los de óptica, tribología, biología o medicina y resulta clave para mejorar y diseñar nuevos productos.

Tradicionalmente el control de las superficies se realizaba mediante el registro de perfiles y la evaluación de parámetros de rugosidad 2D utilizando instrumentos de medida por contacto. Sin embargo, la complejidad de las superficies y la necesidad de que la caracterización tenga en cuenta su carácter tridimensional ha llevado al desarrollo, en la colección de normas ISO 25178, de un nuevo conjunto de parámetros de medida de calidad superficial que se engloban en lo que se denomina “areal texture”.

Las técnicas ópticas se consideran la mejor opción para abordar este tipo de medidas dado que se realizan sin contacto con la superficie y los tiempos de adquisición de las imágenes son muy bajos. Esto disminuye los efectos de deriva asociados a las medidas de larga duración y simplifica el tipo de procesamiento que requieren (corrección de efectos térmicos, consideraciones de ruido, etc.). Además, al no haber contacto, se consigue que las medidas no sean en ningún caso destructivas. Estas son características fundamentales que las hacen más adecuadas para su incorporación en la industria 4.0, por su capacidad para ser integradas en las líneas de producción.

Por otra parte, en el uso de las técnicas ópticas se ha visto que los resultados de medición presentan fuerte dependencia de [1]:

- el fenómeno físico al que es sensible la técnica óptica que se utilice,
- la configuración concreta de las condiciones de medida del instrumento para una técnica dada
- las características intrínsecas del mensurando, en cuanto a propiedades físicas, y en cuanto a su geometría. Localmente por su acabado superficial (amplitudes, distribución de pendientes, frecuencias espaciales, pendientes de los motivos, reflectividad) y a nivel global por sus dimensiones y forma.

- la estrategia de análisis que se aplique a los datos de medición, puesto que son un tipo de medidas que requieren de complejos tratamientos matemáticos.

Así, desde el proyecto se pretende mejorar la trazabilidad de las técnicas ópticas para apoyar a las industrias que requieran la caracterización metrológica de sus productos mediante este tipo de métodos de medida.

Dada la gran variedad de sectores industriales interesados, los mensurandos que requieren de dicha trazabilidad presentan combinaciones de propiedades que los diferencian unos de otros: recubrimientos variados con diferentes reflectividades, distintas rugosidades en la superficie, pendientes en los motivos de la topografía más o menos pronunciadas, interés preferente en los motivos en Z o en los motivos XY, dimensiones del mensurando de los ámbitos nanométrico, micrométrico y, en algunos casos milimétrico. Así, en cada caso, se da una combinación propia de estas características, que hace que sea más adecuada para su medición una técnica óptica de medida u otra.

En el proyecto [2], que comenzó en 2021 y finaliza en 2024, participan los institutos metrológicos nacionales de nueve países: PTB Alemania (*PTB coordinador*), España (CEM), Dinamarca (DFM), Polonia (GUM), Italia (INRIM), Francia (LNE), Suecia (RISE), Países Bajos (VSL) y Finlandia (VTT). También son participantes en el proyecto otras catorce entidades: universidades, centros de investigación, empresas y proveedores de soluciones metrológicas (entre ellas la Fundación Tekniker).

Además, el proyecto ha recibido el apoyo de un grupo de más de 20 empresas y entidades interesadas en los resultados, que exponen sus necesidades al consorcio y son informadas periódicamente del desarrollo del proyecto, dentro del cual se ha elegido un comité de expertos del que forma parte la empresa española Sensofar (Fig. 1).



Fig. 1: Socios y entidades interesadas, implicados en el proyecto EMPIR TracOptic

## 2. DESCRIPCIÓN

## 2.1 Técnicas de microscopía óptica

Las técnicas de microscopía óptica cuya mejora de trazabilidad se va a abordar en el proyecto son: microscopía confocal (CF), microscopía interferencial de luz blanca (CSI) y microscopía de variación de foco.

### 2.1.1 Microscopía confocal (CF, Confocal Microscopy)[3]

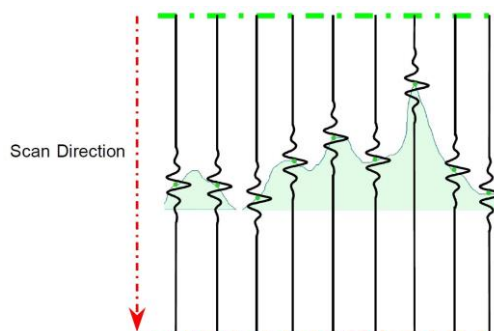
La microscopía confocal genera imágenes 3D a partir del barrido por planos en el eje z de la topografía de la superficie. Usando esta técnica, para cada uno de los planos del barrido, el microscopio sólo recoge luz de la parte de la topografía de la superficie que se encuentra en foco y utiliza un “pinhole” espacial para bloquear la luz fuera de foco. Como la técnica consigue que todo lo que no se encuentra en foco no se registre en ese plano de medida, se obtienen imágenes con gran contraste. A partir de todos los planos registrados durante el barrido, se realiza la reconstrucción tridimensional de la topografía de la superficie. Por el principio físico de la técnica, la resolución vertical depende principalmente de la apertura numérica (NA) del objetivo y presenta la mejor resolución axial de las técnicas ópticas puesto que permite usar objetivos con NA muy altos.

Es la técnica óptima para la medición de superficies en las que la característica principal sean motivos en el plano XY que demanden una excelente resolución lateral. También es capaz de medir muestras que presentan superficies con baja reflectividad y/o acabado rugoso.

### 2.1.2 Microscopía interferencial de luz blanca (CSI, Coherence Scanning Microscopy)[4]

Un microscopio interferencial es un microscopio óptico al que se ha incorporado un interferómetro de luz blanca, en el que en uno de los brazos refleja la superficie a medir y en el otro un espejo de referencia.

En la técnica se realiza un barrido vertical por planos de la topografía de la superficie a medir. Por el principio de interferometría se producen franjas de interferencia entre la luz que refleja el espejo de referencia y la luz que refleja la superficie. Se van registrando los patrones de franjas que se producen en distintos planos durante el barrido. Debido a que la iluminación utilizada es de baja coherencia, se utilizan para la reconstrucción de la topografía de la superficie la envolvente de coherencia y la fase de las franjas para inferir a partir de los datos de intensidad -obtenidos para cada uno de los puntos de la superficie en todos los planos de barrido- la topografía de la superficie, Fig 2.



**Fig. 2: Esquema de reconstrucción de imagen 3D usando CSI.**

Las líneas verticales son los perfiles de intensidad registrados en el sensor de imagen. Figura tomada de [4]

Se utiliza en aplicaciones que requieren excelente resolución vertical (coordenada Z) en superficies de un único material con baja rugosidad, alta reflectividad y pendientes bajas.

### 2.1.3 Microscopía de variación de foco (FV, Focus Variation Microscopy) [3]

La técnica de variación de foco permite medir la topografía 3D de superficies proyectando un haz de luz blanca sobre la superficie, usando un sistema óptico con profundidad de campo limitada –para detectar el mejor foco- y realizando un barrido vertical de la superficie a medir.

Mediante el análisis de las intensidades registradas en una región dada para todos los planos del barrido, se genera la curva de contraste para esa región. A partir de las curvas de contraste se infiere la posición de foco de los puntos de la superficie y se realiza la reconstrucción de la topografía 3D de la superficie medida.

En esta técnica, para la obtención de la coordenada z de cada punto de la superficie medida se tiene en cuenta información registrada en los puntos adyacentes, lo que hace posible que se puedan medir motivos con grandes pendientes. Así, aunque las resoluciones y exactitudes de la técnica se mueven en el ámbito micrométrico, tiene la ventaja con respecto a otras técnicas de ser capaz de medir muestras muy rugosas y de registrar el color real de la superficie.

El proyecto incluye algunas actividades en las que pueden participar sensores ópticos de distancia (ODS) aunque el CEM no participa en ninguna de ellas.

## 2.2 Objetivos del proyecto

El objetivo global del proyecto TracOptic, es mejorar la forma de dar trazabilidad a las medidas dimensionales y de rugosidad 3D “areal texture” realizadas mediante técnicas ópticas y proporcionar métodos de tratamiento de datos de medida y de cálculo de incertidumbre razonablemente simples que sean integrables en la industria. Para su consecución, el proyecto plantea los siguientes objetivos específicos [2]:

1. Determinar sobre distintos tipos de muestras una selección de parámetros de calidad superficial 3D y en algunos casos dimensiones que se van a caracterizar en el Proyecto, dotándoles de trazabilidad mediante instrumentos primarios y de contacto.
2. Caracterizar las capacidades de medición de distintas técnicas de microscopía óptica 3D y de los sensores ópticos de distancia, a la vez que se investiga la influencia de la técnica de medición y la configuración del instrumento utilizada, junto con la influencia de las características propias de la muestra.
3. Desarrollar modelos numéricos para predecir la respuesta de los microscopios/sensores ópticos para cualquier geometría de superficie compleja y utilizar estos modelos para el análisis sistemático de errores y su corrección.
4. Desarrollar y validar procedimientos para la selección de la instrumentación más adecuada para un mensurando dado, así como desarrollar métodos para la evaluación de los datos de medida y la estimación simplificada de la incertidumbre.

5. Facilitar la adopción de las tecnologías estudiadas y las guías de buenas prácticas desarrolladas en el proyecto, por parte de la industria, las organizaciones de normalización y los usuarios finales.

### 2.3 Planificación del proyecto según paquetes de trabajo (WPs)

Los paquetes de trabajo del proyecto abordan el hecho de que se han observado incompatibilidades entre las medidas realizadas con instrumentos ópticos y los resultados de medición obtenidos con técnicas de contacto y también incompatibilidad de resultados entre las propias técnicas ópticas de medida de superficies 3D [2]. El estudio sistemático de las características metroológicas de los instrumentos ópticos 3D y de la trazabilidad de las medidas que se realizan con dichos instrumentos ayudará a resolver estas incompatibilidades.

El origen de estas incompatibilidades se encuentra en:

- La complejidad de la interacción entre las superficies a medir y los instrumentos ópticos de medida. En este sentido, en los paquetes de trabajo 2 y 3 (WP2 y WP3) se van a realizar investigaciones que supondrán un progreso con respecto al nivel de conocimiento más alto conseguido hasta la fecha de dicha interacción.
- La falta de madurez en la industria y otros usuarios para el tratamiento con perspectiva metroológica del uso del instrumento y de la estimación de la incertidumbre de las medidas que realizan. Este aspecto se aborda en los paquetes de trabajo 4 y 5 (WP4 y WP5), que tienen por objeto proporcionar a los usuarios finales de las técnicas ópticas, tratamientos de datos probados (p. ej. en el caso de stitching de datos de medida), participación en normalización (generando aportaciones a las series ISO 25178-600s [6] e ISO 25178-700s [7]), y generar guías de buenas prácticas de uso de instrumentos ópticos 3D que se estudian en el proyecto y de la estimación de la incertidumbre de las medidas realizadas con ellos.

## 3. RESULTADOS [5]

### 3.1 Selección de muestras y determinación y caracterización de parámetros de medida de superficies y, en algunos casos, propiedades dimensionales. (WP1)

En los primeros meses del proyecto se han establecido las muestras y patrones que se consideran más apropiadas para estudiar las capacidades de medida de los instrumentos ópticos 3D objeto del proyecto y los parámetros de medida de superficies que se van a estudiar en cada muestra y patrón. Esta información se encuentra resumida en la Tabla 1.

La selección de muestras/patrones y parámetros consensuada por los participantes está orientada a estudiar las características metroológicas que influyen en las medidas, tanto las propias de cada instrumento como las que dependen del tipo de superficie que se esté midiendo.

Esta selección, incluye: patrones clásicos y nuevas propuestas de patrones diseñados para realizar medidas “areal texture”, muestras relevantes de la industria generadas con tecnologías

clásicas y nuevas tecnologías y muestras sólidas provenientes de los ámbitos de la medicina y la biología.

En este paquete de trabajo los institutos metroológicos nacionales proporcionan trazabilidad a las muestras y patrones seleccionados, usando principalmente microscopios de fuerza atómica (AFMs) e instrumentos de contacto adecuadamente trazados. Los resultados obtenidos para los parámetros seleccionados, se adoptarán como valores de referencia para la investigación de las características metroológicas de las técnicas ópticas que se estudian en el proyecto.

	Surface texture parameters					Dimensional parameters			
	Height	Spatial	Hybrid	Function s	BRDF	Height	Length	Radius	Form
<b>Roughness standards</b>									
Halle standard	x	x	x						
Rubert AIR-B40, AIR-B70	x	x	x						
Simetrics	x	x	x						
<b>Technical surfaces</b>									
INRIM1	x	x	x	x		x	x	X	x
INRIM2	x			x		x	x	X	X
TEKNIKER	x			x		x	x	X	X
INRIM Grinding	x	x	x	x					
LNE Polishing	x			x					X
Bearing segment, gear	x	x	x	x		x		X	X
CRF	x	x	x	x					
<b>Plastic surfaces</b>									
RISE: LBM / EBM	x	x	x	x					
PTB FIB	x	x	x	x					X
CRF					X				
BRDF Samples									
Workpiece-like samples						x	x	X	X
<b>Spheres</b>									
Spheres	x	x	x	x	X		x	X	X
Ball bar							x	X	X
<b>Biology</b>									
ULEI samples	x	x	x	x	X				

**Tabla 1: Listado de muestras seleccionadas y de parámetros que se estudiarán en cada una de ellas.** En la tabla se usan las siguientes abreviaturas: Height parameters:  $Sa/Ra, Sq/Rq, Ssk/Rsk, Sku/Rku$ ; Spatial parameters:  $Sa_l, Std, spatial\ wavelength$ ; Hybrid parameters:  $Sdq/Rdq, Sdr/Rdr$ , slope distribution ; Functions:  $Sk/Rk$ .

### 3.2 Caracterización de las capacidades de medida de instrumentos ópticos 3D (WP2)

En este paquete de trabajo se estudian las características metroológicas implicadas en los sistemas de medida ópticos y los participantes deberán contar con una adecuada trazabilidad en las medidas que van a realizar en la investigación de las capacidades de sus instrumentos.

Algunas de las características metroológicas que se estudian residen principalmente en el instrumento de medida y el entorno en el que se realizan las mediciones. Pertenecen a este grupo: el factor de amplificación, la linealidad del equipo, el error de planitud, el ruido del instrumento, la resolución espacial topográfica y las desviaciones de perpendicularidad XY. Sin embargo, hay otras características metroológicas, como el ruido de medida y la fidelidad topográfica, que dependen drásticamente de la superficie objeto de medición [1].

Para la realización de las tareas de este paquete de trabajo, se han puesto en marcha comparaciones de medida organizadas en cuatro grupos diferentes por instrumento de medida.

En los primeros nueve meses del proyecto, se han establecido y revisado los protocolos de dichas comparaciones, también se han adquirido o fabricado los mensurandos que se van a medir en las comparaciones. Además, el instituto metrológico nacional que actúa como piloto en cada comparación les ha proporcionado trazabilidad a los patrones y muestras que circulan mediante métodos de contacto de alto nivel como microscopía de fuerza atómica u otro método de contacto, antes de iniciar la comparación.

### **3.3 Desarrollo de modelos numéricos y análisis de errores sistemáticos (WP3)**

Estos modelos se desarrollan con la finalidad de detectar errores sistemáticos y ayudar en el proceso de cálculo de incertidumbres de las medidas.

En una primera fase las actividades planificadas en este paquete de trabajo están orientadas a desarrollar, por una parte, modelos numéricos que permitan predecir la respuesta de cualquier superficie ante la luz y, por otra parte, desarrollar instrumentos de medida virtuales, que tengan en cuenta los factores de influencia propios de cada técnica y simulen la medición imitando al proceso de medida real. Ambas partes se realizarán partiendo de distintos enfoques matemáticos para estudiar cuales arrojan mejores resultados.

En una segunda parte se comprobará el funcionamiento de los instrumentos virtuales, comparándolos entre ellos y con medidas de instrumentos reales. Se estudiará así mismo el efecto de las variaciones de ciertos factores de influencia (índice de refracción del material, condiciones ambientales de temperatura y humedad, longitud de onda y espectro de la fuente de luz) y se realizarán un gran número de simulaciones para estimar incertidumbres de medida utilizando métodos estadísticos como por ejemplo el Método de Montecarlo.

### **3.4 Generación de procedimientos y guías de buenas prácticas y transferencia de conocimiento (WP4 y WP5).**

Estos paquetes de trabajo tienen la finalidad de realizar una transferencia fluida del conocimiento generado en el proyecto a los distintos sectores de la industria y usuarios que necesitan en sus productos/estudios un adecuado control del acabado de sus superficies mediante medidas 3D realizadas con técnicas ópticas. Para ello se generarán:

- Procedimientos probados de tratamiento de los datos de medida.
- Guías de buenas prácticas de uso y selección de técnicas de medida ópticas 3D, procedimientos de cálculo de incertidumbre simplificados.
- Aportaciones a la normalización ISO.
- Resultados en casos de estudio de usuarios finales, abordados por el consorcio.
- Cursos de formación.
- Publicación de artículos científicos y de divulgación.

## **4. CONCLUSIONES**

En los apartados anteriores se han descrito las motivaciones, metodología a seguir y planificación del proyecto de la iniciativa EMPIR 20IND07 TracOptic, que surge como apoyo a las industrias de sectores como el aeroespacial o los de óptica, tribología, biología o medicina

en los que resulta clave para mejorar y generar nuevos productos, el control mediante técnicas ópticas de medida 3D de su acabado superficial.

En la primera parte del proyecto se han consensuado de entre la gran variedad de muestras y patrones posibles de estudio, los que el consorcio ha considerado más adecuados para la consecución de los objetivos del proyecto. La selección incluye patrones comerciales, patrones de nuevo diseño que se han ideado para el proyecto y muestras particulares de algunos de los casos que se dan en los sectores de la industria interesados en el proyecto. Además, ya se ha materializado la fabricación de los patrones de nuevo diseño y se ha provisto de un número de muestras y patrones suficientes al consorcio para abordar los siguientes pasos de la investigación.

En paralelo, se han establecido, revisado y consensuado los protocolos de medida que se van a llevar a cabo en las cuatro comparaciones organizadas por instrumento de medida que se van a llevar a cabo en las primeras fases del proyecto. Los institutos metroológicos nacionales pilotos de cada comparación han trabajado en la medición, mediante microscopía de fuerza atómica y técnicas de contacto, de las muestras que van a circular en las distintas comparaciones, para que constituyan los valores de referencia que se apliquen en el análisis de resultados. Actualmente estas cuatro comparaciones, están ya en fase de circulación.

En las tareas del proyecto relativas a desarrollos de modelos numéricos, varios participantes han desarrollado modelos basados en aproximaciones de Kirchoff para fenómenos de difusión -scattering- y ya se están comparando entre sí. También está muy avanzado el desarrollo de un instrumento virtual de simulación de microscopio interferométrico (CSI) que combina modelos de scattering 3D y modelos basados en óptica de Fourier.

Además, en cuanto a procedimientos de tratamiento de datos de medida, se están comparado varios métodos y modos de operación en la realización del cosido de imágenes adyacentes (stitching), de datos de medición.

Así, aunque el proyecto se encuentra en su fase inicial ya son numerosos los resultados obtenidos que actuarán como base para la consecución de los objetivos finales del proyecto.

## 5. REFERENCIAS

- [1] R. Leach, H. Haitjema, R. Su and A. Thompson “*Metrological characteristics for the calibration of surface topography measuring instruments: a review*”. Meas. Sci. Technol. 32 (2021) 032001 (16pp).
- [2] JRP protocol “*Traceable industrial 3D roughness and dimensional measurement using optical 3D microscopy and optical distance sensors*” Short Name: TracOptic, Project Number: 20IND07. Coordinator U. Brand (PTB)
- [3] R. Leach “*Optical Measurement of Surface Topography*”, Springer Berlin, Heidelberg 2011.
- [4] R. Leach, L. Brown, X. Jiang, R. Blunt, M. Conroy and D. Mauger. NPL. A National Measurement Good Practice Guide. No. 108 “*Guide for the Measurement of Smooth Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry*”.
- [5] EURAMET, Publishable Summary for 20IND07 TracOptic, “*Traceable industrial 3D roughness and dimensional measurement using optical 3D microscopy and optical distance sensors*”
- [6] ISO standard 25178-600, “*Geometrical product specifications (GPS) – surface texture: Areal – Part 600: Metrological characteristics for areal-topography measuring methods*”, (2016)

[7] ISO standard 25178-700/DIS, “*Geometrical product specifications (GPS) – surface texture: Areal – Part 700: Calibration, adjustment and verification of topography measuring instruments*”, (2020)

## **6. AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto (20IND07 TracOptic) ha recibido financiación del programa EMPIR cofinanciado por los Estados Participantes y del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea.