



PT2. Diseño y desarrollo de prototipos y demostradores

Entregable 2.1

Prototipos y demostradores funcionales diseñados y desarrollados

Financiado por:



1 Demostrador para la determinación de la sensación térmica por contacto de materiales

1.1 Pruebas preliminares

Se inició el diseño del demostrador de sensación térmica seleccionando un sensor de flujo de calor de lámina fina con cierta flexibilidad de unas dimensiones y sensibilidad adecuadas. En concreto se seleccionó un sensor de la marca Hukseflux modelo FHF05 con dimensiones 15 x 30 mm y sensibilidad de 3×10^{-6} V/(W/m²). Se seleccionó este modelo debido a que la referencia de menores dimensiones (10 x 10 mm), presentaba una sensibilidad de tan solo 1×10^{-6} V/(W/m²), esta menor sensibilidad generaría una señal más débil que obligaría a utilizar un sistema de adquisición con más resolución, mayor relación señal/ruido y, por tanto, un coste más elevado. Por otra parte, el modelo por encima tenía unas dimensiones de 50 x 50 mm lo que obligaría a construir un equipo de grandes dimensiones y utilizar probetas para las pruebas de al menos 200 x 200 mm para evitar efectos de borde.

En la siguiente figura se muestran los ensayos preliminares con un sensor de flujo de calor Hukseflux FHF05 de 15 x 30 mm conectado a un sistema de adquisición de datos ProfiSignal Go de la marca Delphin propiedad de ITC. En estos ensayos preliminares el sensor de flujo de calor se adhería a la muestra a analizar mediante cinta de poliimida y se dejaba que la pieza se atemperara a la temperatura de la habitación ($\approx 20^\circ\text{C}$). Una vez estabilizada la temperatura se iniciaba la grabación a alta velocidad (10 ms) y el técnico encargado de realizar las pruebas presionaba su mano sobre el sensor y la muestra. En la pantalla del portátil en la imagen se muestra la grabación de un ensayo. La señal adquirida mediante este sistema es muy ruidosa ya que este equipo no permitía activar un filtro "hum reduction" a alta velocidad. Estas señales eran tratadas mediante la herramienta de filtrado descrita en el entregable E.1.1.

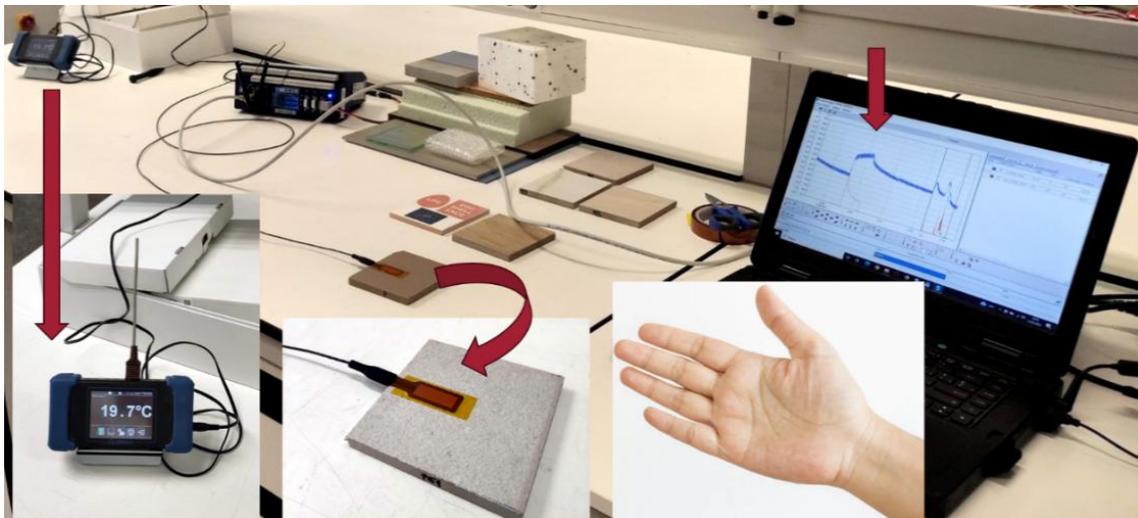


Figura 1. Vista general y detalles de los ensayos preliminares con sensores de flujo de calor.

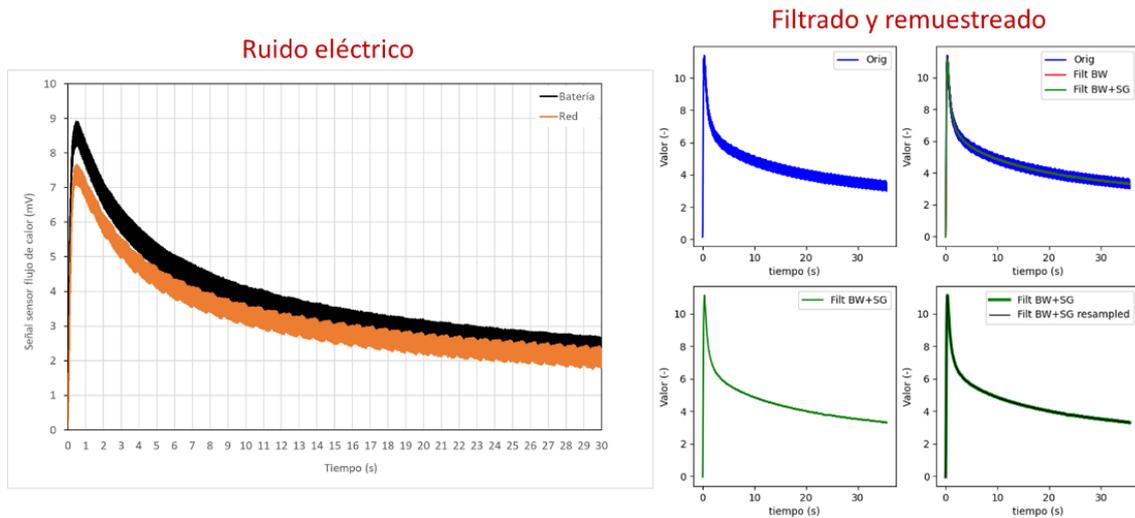


Figura 2. Ruido eléctrico en la señal captada y visualización del algoritmo de filtrado desarrollado.

Con este simple montaje se midieron distintas piezas cerámicas en las que se detectaban diferencias de sensación al contacto pero que las medidas de efusividad mediante un equipo al efecto no concordaban con la sensación percibida. La pieza PE1 se percibía más caliente que la pieza PE3, sin embargo, la efusividad medida para PE1 era superior a la de PE3 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 3. Piezas cerámicas utilizadas en los ensayos preliminares.



Figura 4. Equipo de medida de efusividad disponible en ITC.

Tabla 1. Medidas de efusividad térmica de las piezas cerámicas.

Muestra	Conductividad térmica (W / m·K)	Efusividad (W·s ^{1/2} / m ² ·K)
P	1,72 ± 0,03	1773 ± 25
PE1	1,61 ± 0,03	1713 ± 25
PE2	1,64 ± 0,03	1729 ± 25
PE3	1,46 ± 0,03	1627 ± 25
PE4	1,50 ± 0,03	1647 ± 25

En la figura 5 se muestran los resultados de las medidas realizadas a las piezas cerámicas con el sensor de flujo de calor. Se añadieron dos materiales a las medidas preliminares, una pieza de aluminio y una de aislante (poliestireno expandido). Se observa que la pieza que se percibe más caliente (PE1) presenta un valor máximo y curva de flujo de calor menor que el resto, siendo la PE3 la que tiene una curva de flujo de calor más alta.

Llegado este punto se decidió iniciar la construcción de un sensor que simulara el contacto de la mano humana y registrara esta curva de flujo de calor.

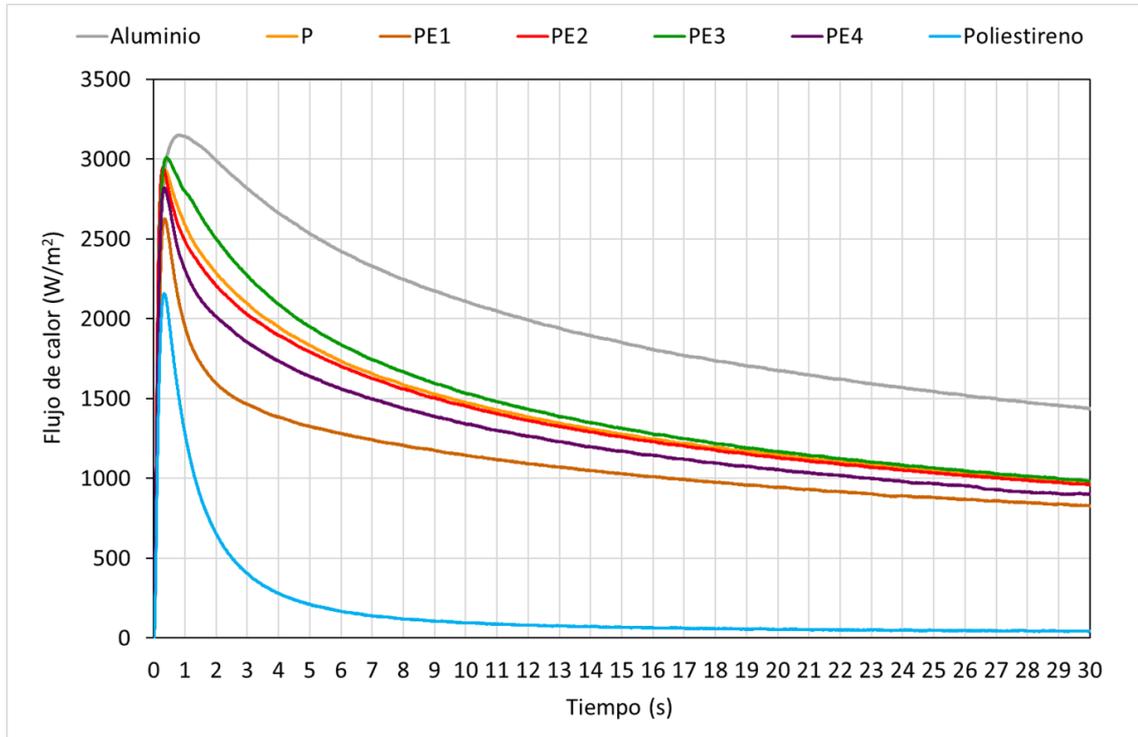


Figura 5. Curvas de flujo de calor preliminares.

Para continuar con el diseño del demostrador se realizó una selección de materiales con distintas texturas y cubriendo un amplio rango de efusividades térmicas.



Figura 6. Curvas de flujo de calor preliminares.

La primera celda de medida (figura 7) constaba de un aislante de poliestireno expandido (material azul), una alfombrilla calefactora de silicona (capa roja), un acumulador de calor (pieza de aluminio), el sensor de flujo de calor y una capa de látex que simula la piel humana. La alfombrilla se conectaba a la salida de un controlador de temperatura externo y se controlaba la temperatura con un termopar tipo T de cabeza desnuda. Cuando el conjunto alcanzaba la temperatura deseada ($\approx 36^{\circ}\text{C}$), se emplazaba el sensor sobre la muestra a analizar y se aplicaba

manualmente un peso para simular la presión que ejerce la mano. Tras realizar un barrido con algunos de los materiales seleccionados se concluyó que la respuesta del sensor era demasiado lenta por lo aislante que es la capa de látex y además el conjunto era demasiado rígido, con una mala adaptación al relieve o rugosidad de los materiales.

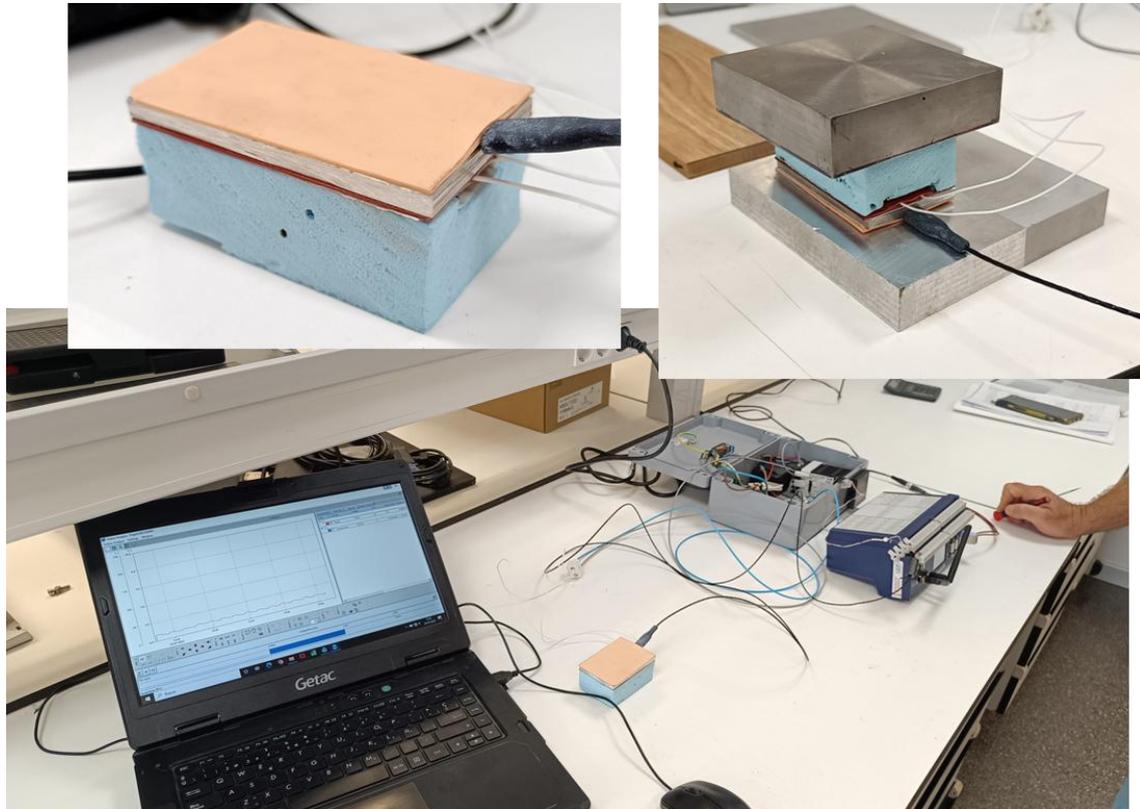


Figura 7. Celda de medida para pruebas iniciales.

Se modificó la celda añadiendo una capa antes y después del sensor de flujo para mejorar el contacto del sensor sobre superficies con relieve o alta rugosidad. Se procedió a su montaje sobre un actuador lineal neumático que permite colocar distintos pesos libres y aplicar una presión controlada entre el sensor y la muestra a analizar (figura 9). Se hicieron distintas pruebas modificando el espesor y dureza de las capas de la celda a diferentes presiones hasta alcanzar una configuración en la que los resultados obtenidos con la celda estuvieran en consonancia con la percepción humana. Estas pruebas fueron realizadas sobre un número de materiales más reducido (figura 10).

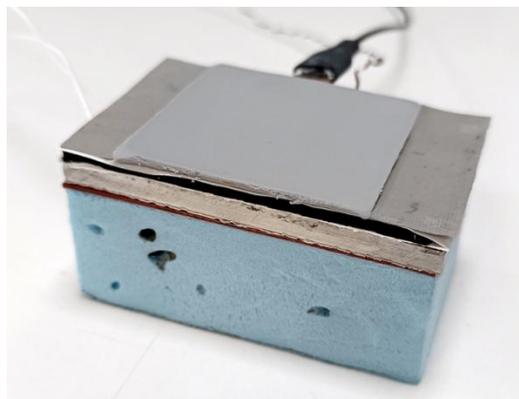


Figura 8. Celda de medida para pruebas iniciales modificada.

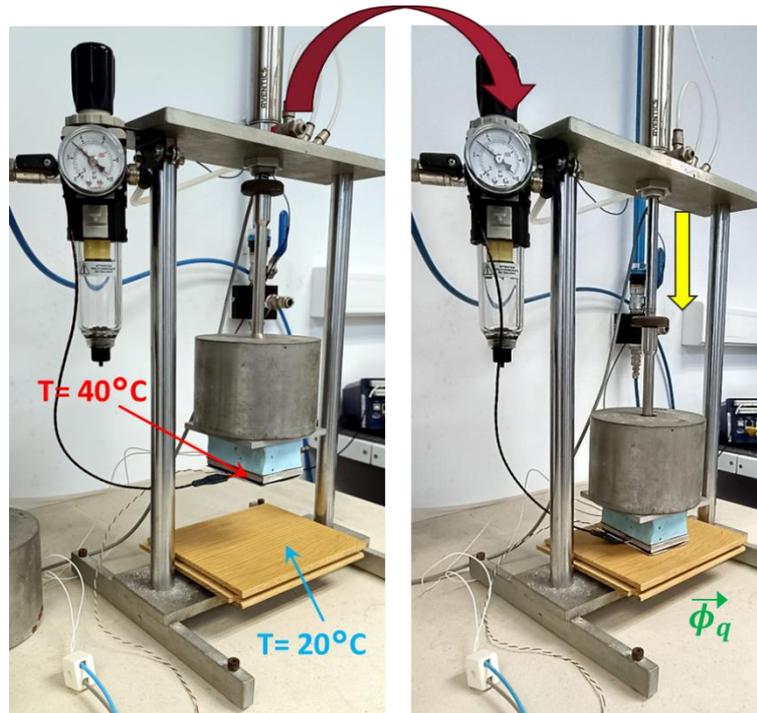


Figura 9. Celda de medida modificada montada sobre el actuador lineal neumático.



Figura 10. Selección de materiales.

En la figura 11 se muestran las curvas de flujo de calor obtenidas con la celda de pruebas modificada. Se observa como los materiales cerámicos con elevado relieve (porcelánico para piscinas y porcelánico pirámides) ofrecen resultados similares a las maderas debido a que el área de contacto es menor, pero si se mantiene el contacto, los materiales cerámicos continúan drenando más energía que las maderas. Por otra parte, el porcelánico textura piedra que también daba resultados anómalos (demasiado bajos) con la celda más rígida ofrece valores más similares al revestimiento esmaltado liso como cabría esperar.

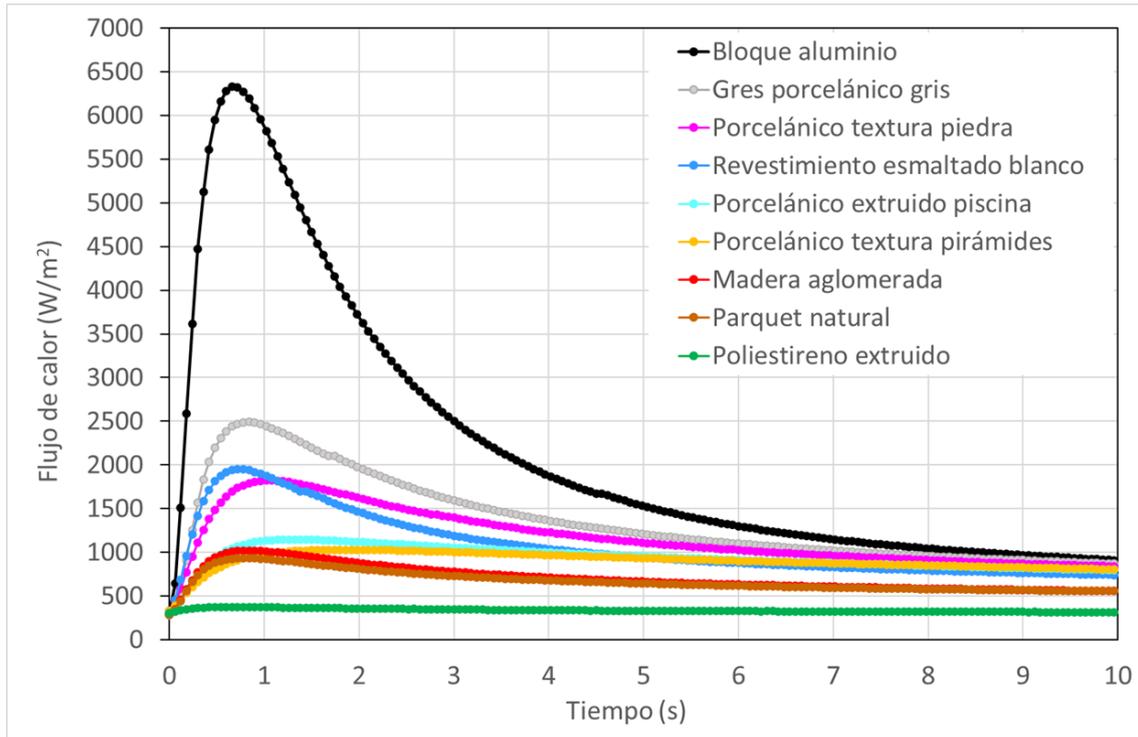


Figura 11. Resultados obtenidos con la celda de medida modificada.

En este punto del trabajo se decidió realizar una primera baremación de los materiales desde el punto de vista de la percepción humana. Para ello se seleccionaron 7 de los materiales caracterizados con la celda experimental y se pidió a 5 sujetos que los puntuaran del 1 al 7 (1 más frío, 7 más caliente) según la sensación que percibían al tocarlos.



Figura 12. Ensayo preliminar de percepción de la sensación térmica con personas.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la baremación. Se observa como todos los sujetos participantes bareman de igual forma al aluminio, el porcelánico liso, la madera natural y el poliestireno extruido, pero tienen dificultades en ubicar a los materiales cerámicos con texturas. Pese a las diferencias de puntuación entre los materiales con texturas. Es cierto, que todos ellos puntúan "más fríos" que la madera natural, por lo que algún descriptor del ensayo con la celda experimental debería ofrecer resultados similares.

Tabla 2. Resultados de la baremación de 7 materiales por 5 participantes.

Material / persona	Aluminio	Porcelánico liso	Madera natural	Porcelánico pirámides	Porcelánico textura piedra	Porcelánico piscina	Poliestireno extruido
A	1	2	6	4	5	3	7
B	1	2	6	3	4	5	7
C	1	2	6	4	3	5	7
D	1	2	6	5	4	3	7
E	1	2	6	5	3	4	7
Promedio	1	2	6	4,2	3,8	4,0	7

De los ensayos obtenidos con la celda se obtienen curvas de flujo del calor similares a la mostrada en la figura 13. De esta curva se pueden calcular distintos parámetros que podrían ser utilizados como descriptores de la sensación térmica percibida por un humano. Estos descriptores son el flujo de calor máximo, el tiempo hasta este pico máximo, las velocidades de subida o bajada del flujo tras el contacto, la integral del flujo de calor a cierto tiempo o el flujo valor del flujo de calor tras un tiempo de estabilización.

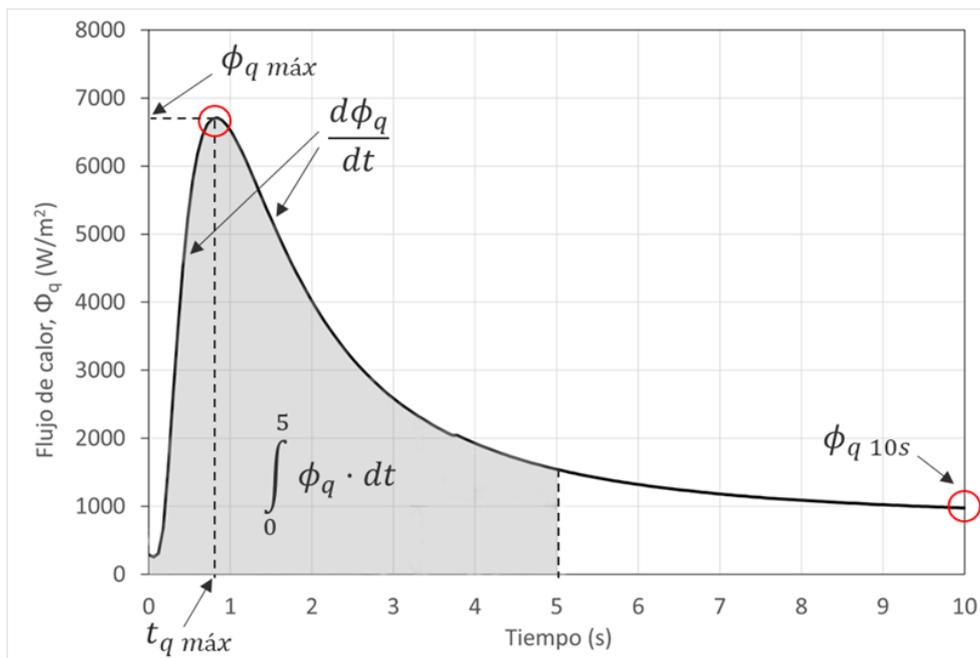


Figura 13. Posibles descriptores procedentes de la curva de flujo de calor del ensayo de sensación térmica.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la baremación de los materiales que se obtiene mediante la celda modificada experimental utilizando como predictor el valor de la integral a 5 segundos. Se observa como los materiales con textura quedan ubicados entre el porcelánico liso y la madera natural de igual forma que en la baremación realizada por personas.

Tabla 3. Baremación de los 7 materiales según el valor de la integral a 5 segundos de la curva de flujo de calor.

Material	$\int_0^5 \phi_q \cdot dt \text{ (J/m}^2\text{)}$
Aluminio	16338
Porcelánico liso	8528
Porcelánico piedra	7006
Porcelánico piscina	5043
Porcelánico pirámides	4689
Madera natural	3748
Poliestireno extruido	1742

1.2 Diseño 3D y construcción del equipo de medida de sensación térmica

Tras las pruebas iniciales se procedió al diseño y construcción de un prototipo basado en la celda experimental modificada. En la figura 14 se muestra un esquema de las distintas capas que formarán la celda de medida. Se utiliza una pieza de acero inoxidable mecanizada como base del sensor y a la vez actuará de lastre para aplicar presión entre el sensor y la pieza a analizar. Su masa se calcula en base a la presión que ejerce un humano medio al pisar con el pie sobre una superficie. En el interior de la base se aloja un aislante donde se instala la alfombrilla calefactora que calentará el conjunto a aproximadamente 36°C en superficie. Sobre la alfombrilla se coloca un acumulador de calor, una capa elástica porosa para mejorar la adaptabilidad sobre superficies con relieve, el sensor de flujo de calor y una capa deformable plástica de alta conductividad térmica para adaptarse a la rugosidad de los materiales.

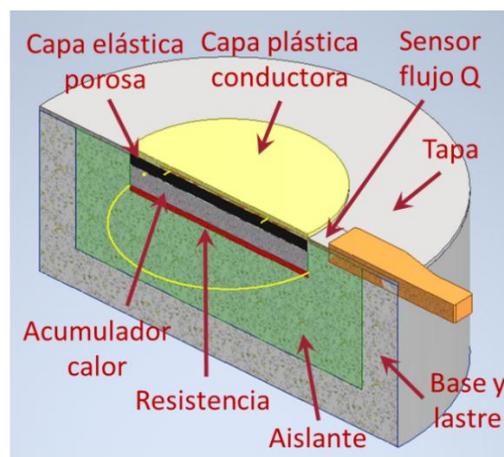


Figura 14. Esquema con las diferentes capas que forman la celda de medida.

En la siguiente figura se muestra el diseño 3D del equipo de medida. Se compone de una base con dos columnas y una traviesa móvil donde se emplaza el actuador lineal neumático, conectado al actuador pende un vástago roscado que permite la conexión rápida del conjunto de la celda.

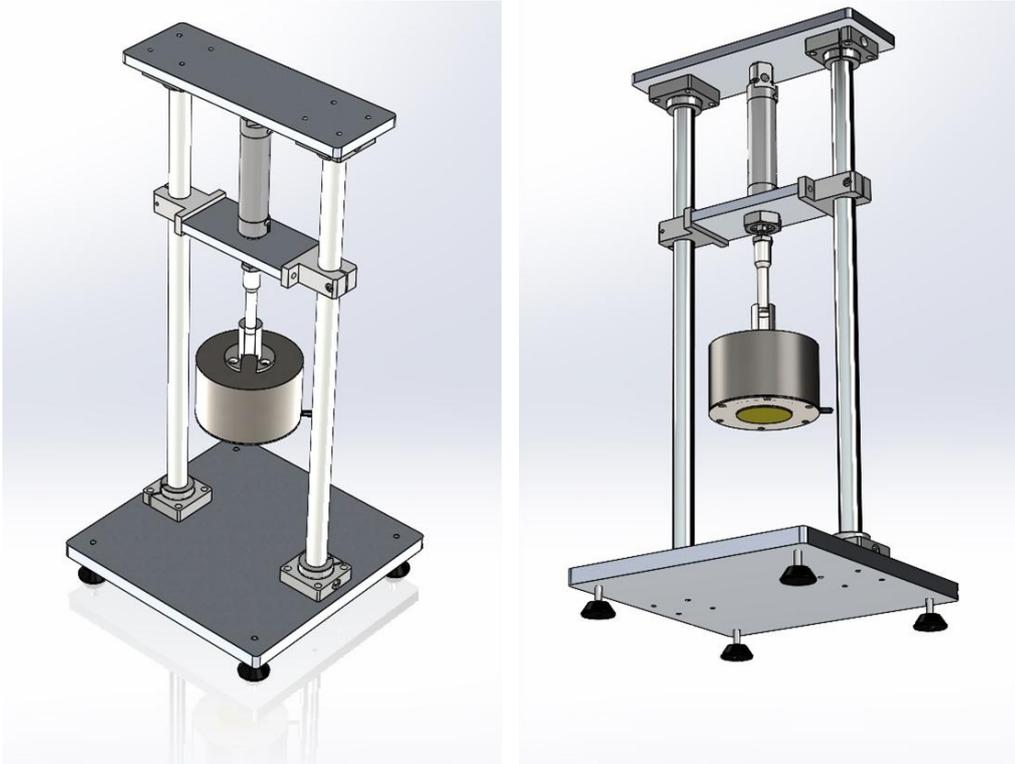


Figura 15. Vistas 3D del diseño del equipo de medida de sensación térmica.

En las siguientes figuras se muestran los distintos elementos para el montaje de la celda de medida.



Figura 16. Elementos de la celda de medida.

En la figura 17 se muestra una vista general del equipo finalizado. La base del equipo se sitúa sobre una caja metálica que reúne todos los elementos electrónicos para el funcionamiento del equipo. En la parte frontal se puede observar el pulsador de paro de emergencia, un botón de inicio de ensayo que activa la bajada del actuador neumático y el controlador de temperatura para configurar la temperatura deseada. Una vez se activa el pulsador la pieza desciende hasta descansar de forma libre sobre el material a analizar y transcurrido un tiempo de ensayo, configurado en un temporizador interno, sube a su posición de reposo. A la derecha del equipo se ubica un sistema de adquisición de alta velocidad con mejor relación señal/ruido que el utilizado en las pruebas preliminares.

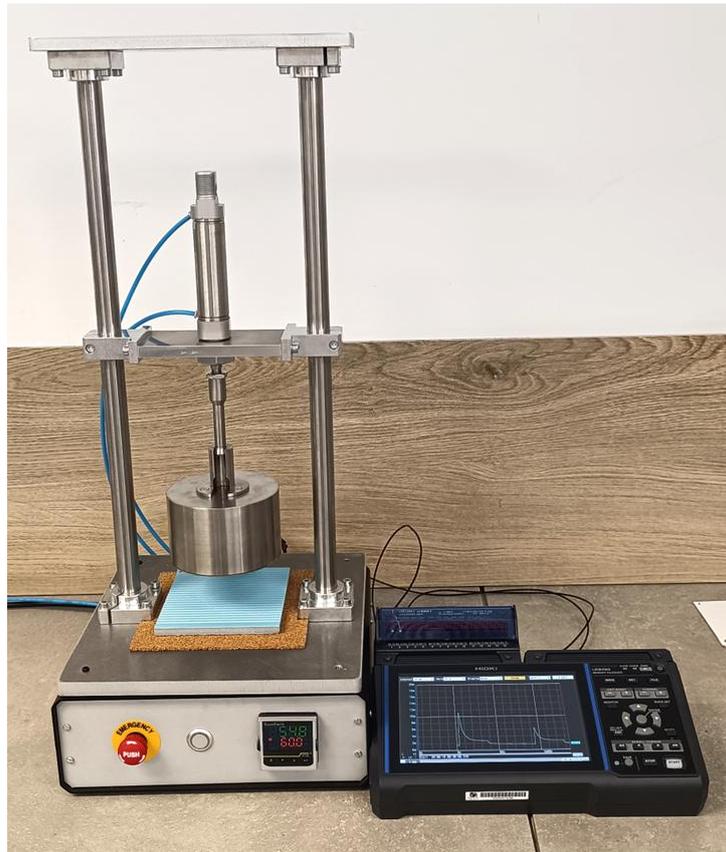


Figura 17. Vista general del equipo de medida de sensación térmica.

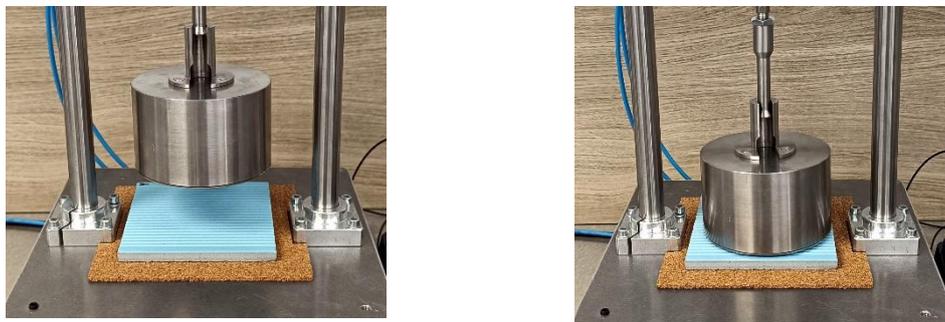


Figura 18. Detalle del equipo de medida de sensación térmica en posición de reposo y en posición de medida.

2 Demostrador de técnicas de análisis láser de dimensiones y defectos

Este demostrador se basa en perfilómetros láser 2D para realizar medidas dimensionales y evaluar defectos o rugosidades de superficies. Dado que el perfilómetro será el corazón del demostrador se inició la etapa de diseño evaluando el desempeño en condiciones de laboratorio de distintos modelos de telémetro láser 2D de la marca MICROEPSILON.

2.1 Selección del telémetro para el demostrador

En concreto se realizaron pruebas con los telémetros MICROEPSILON:

- Modelo 2500, telémetro de láser rojo de gama media-baja con una anchura útil de lectura de 50 mm y 640 píxeles.

- Modelo 3500, telémetro de láser azul de gama alta con una anchura útil de lectura de 100 mm y 2048 píxeles en 100 mm.
- Modelo 3002, telémetro de láser rojo de gama media con una anchura útil de lectura de 50 mm y 1028 píxeles.

El objetivo era encontrar que modelo tenía mejor desempeño en un mayor número de superficies a un precio más contenido. Para ello, tras unas pruebas iniciales y una vez se configuraron los equipos con los parámetros más adecuados según el fabricante. Se evaluó cada modelo realizando medidas sobre diferentes piezas cerámicas con distintos acabados superficiales: piezas claras, oscuras, con brillo, acabado mate, vidriados transparentes, con pinchados internos, pintadas con rotulador permanente, vidrio transparente, marmoleados, veteados, relieves suaves, relieves agresivos, etc.

Los telémetros de MICROEPSILON 2500 y 3500 se evaluaron a la vez y el modelo 3002 fue evaluado en solitario con las mismas piezas y configuración.

- Pieza blanca brillante

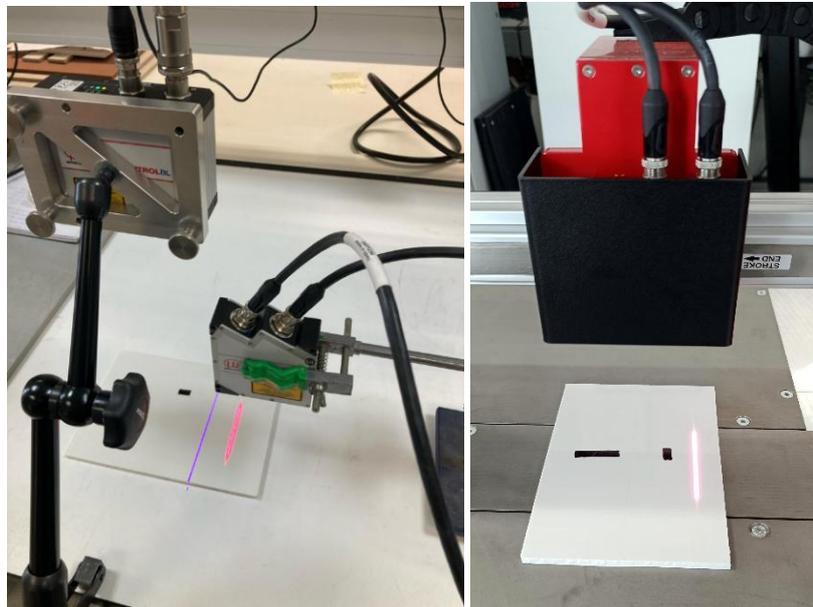


Figura 19. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza blanca brillante.

Sobre la pieza blanca brillante la medida del modelo 3010 es menos estable (presenta un mayor ruido) que la lectura ofrecida por los modelos de láser rojo 2500 y 3002.

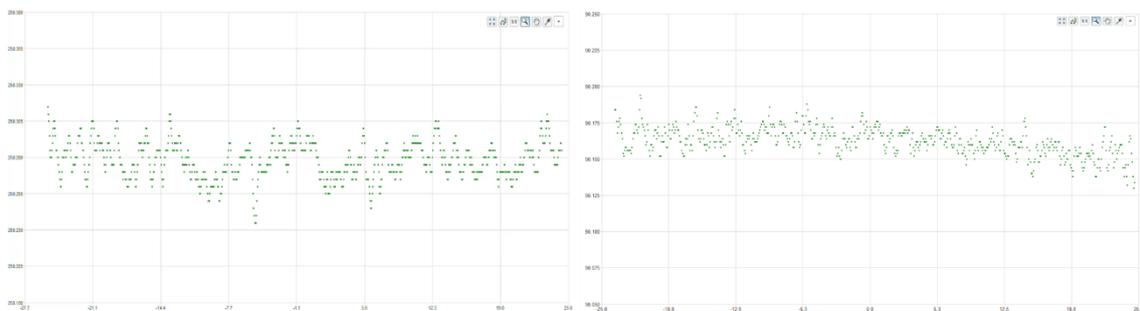


Figura 20. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza blanca brillante.

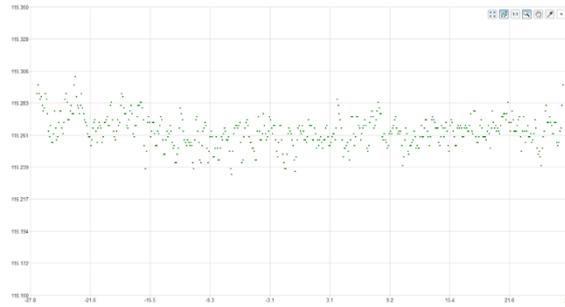


Figura 21. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza blanca brillante.

- Pieza blanca brillante rotulada con permanente negro

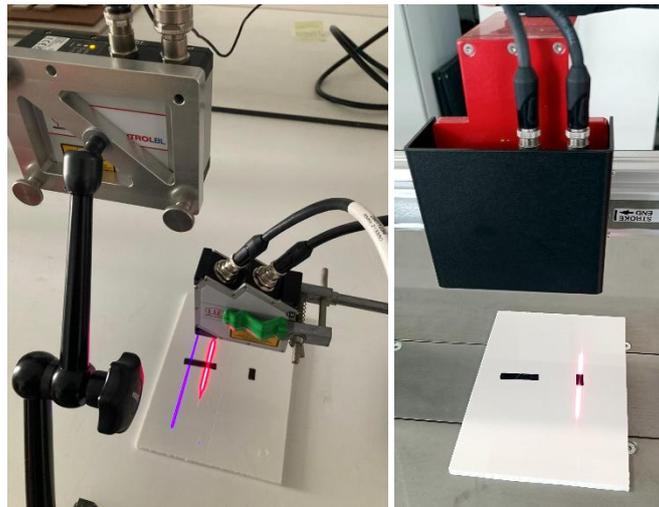


Figura 22. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza blanca brillante con zona pintada de rotulador permanente negro.

En la zona rotulada el sensor 2500 no genera lecturas, el sensor 3010 ofrece lecturas menores a las esperadas y perdidas en algunos pixeles. El sensor 3002 genera lecturas mayores a lo esperado con menor número de pixeles perdidos.

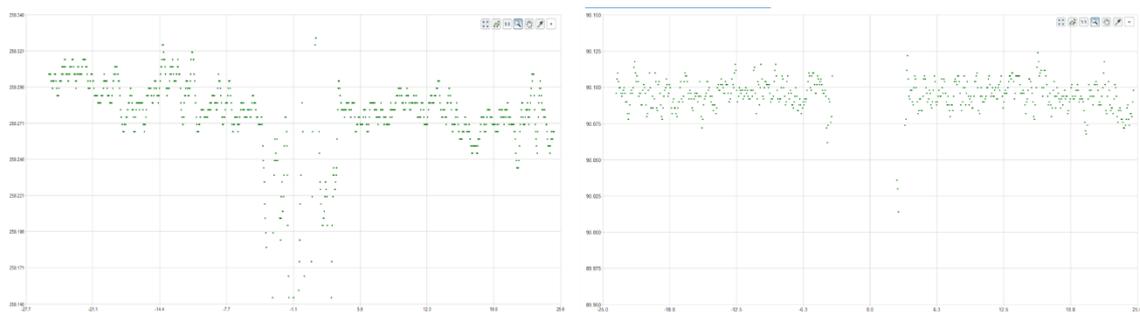


Figura 23. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza blanca brillante con zona pintada de rotulador negro permanente.

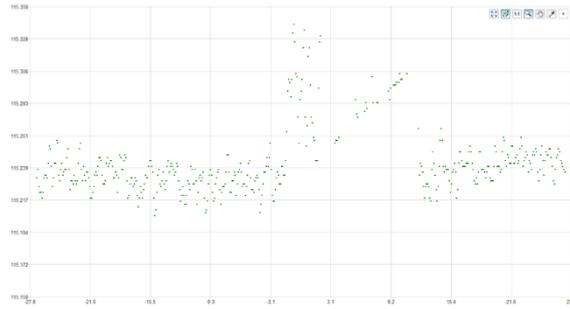


Figura 24. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza blanca brillante con zona pintada de rotulador negro permanente.

- Pieza blanca mate

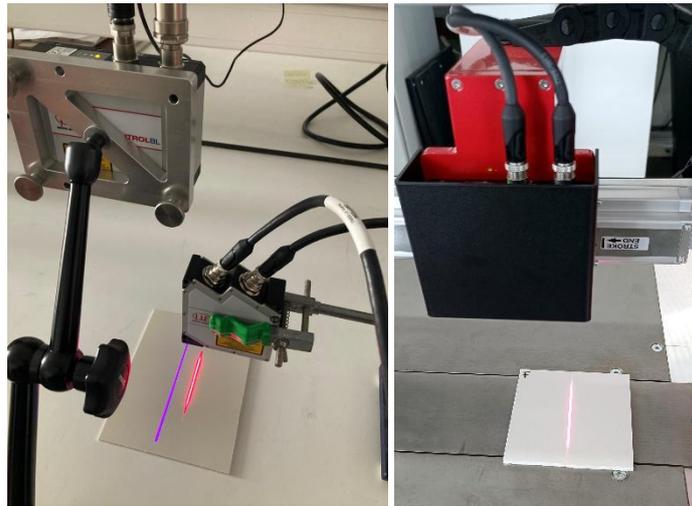


Figura 25. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza blanca mate.

Sobre pieza blanca mate se obtienen mejores resultados con los modelos de láser rojo.

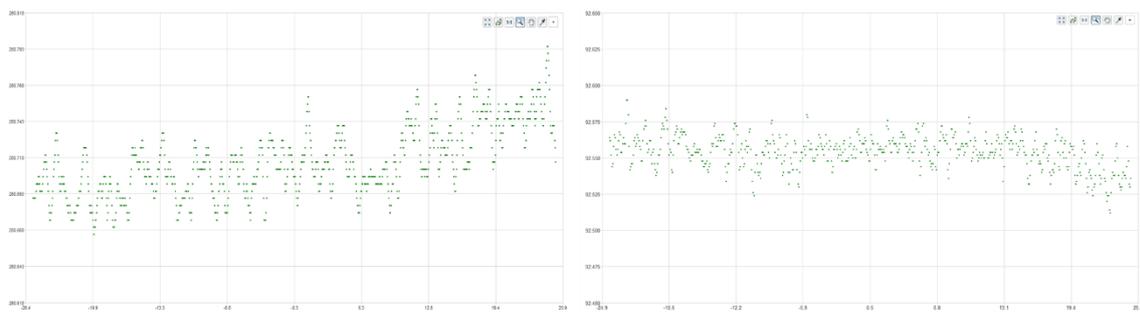


Figura 26. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza blanca mate.

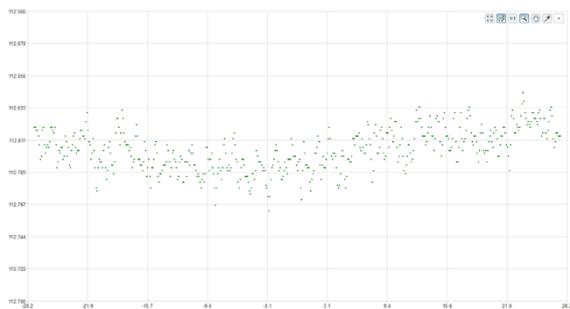


Figura 27. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza blanca mate.

- Pieza negra mate

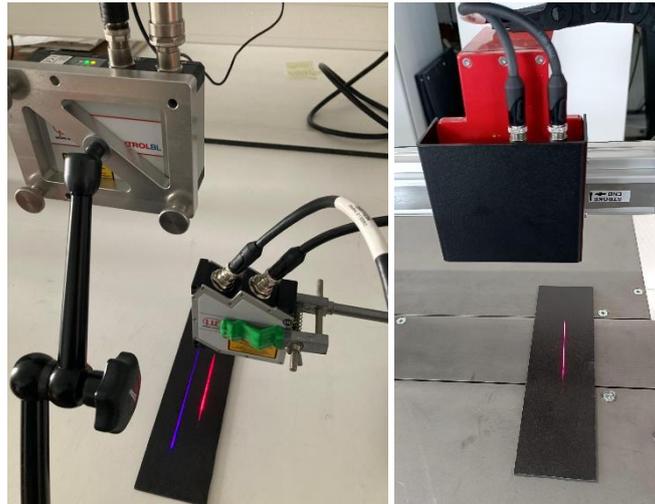


Figura 28. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza negra mate.

Sobre pieza negra mate, pieza con elevada absorción del láser, se obtienen mejores resultados con el modelo 3010.

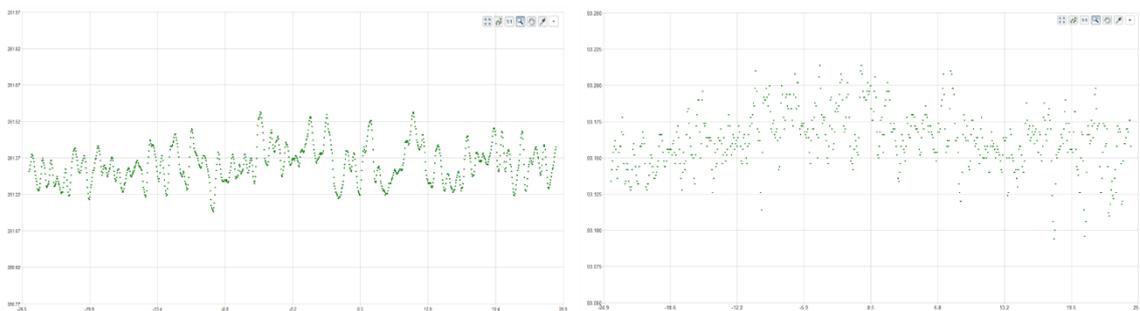


Figura 29. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza negra mate.

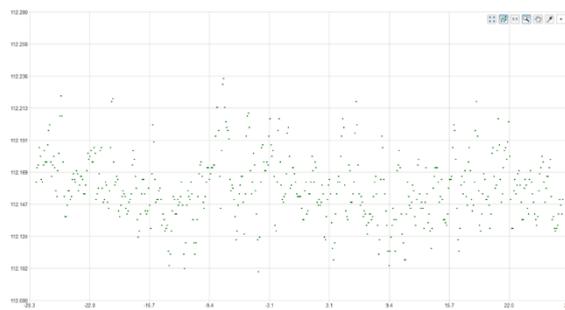


Figura 30. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza negra mate.

- Pieza marmoleada blanca y negra brillante

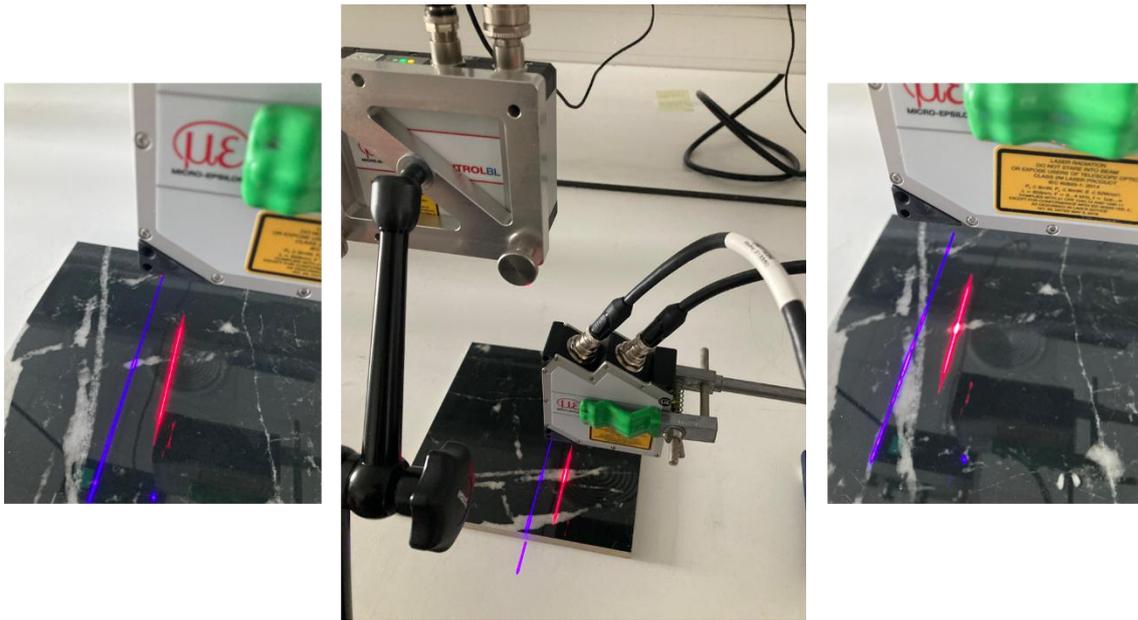


Figura 31. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza marmoleada.



Figura 32. Detalle del sensor 3002 de MICROEPSILON midiendo sobre pieza marmoleada.

Todos los modelos traspasan el vidrioado y la medida se ve influenciada por el fondo. Las zonas claras producen lecturas ligeramente superiores o inferiores (según el modelo) a las zonas oscuras.

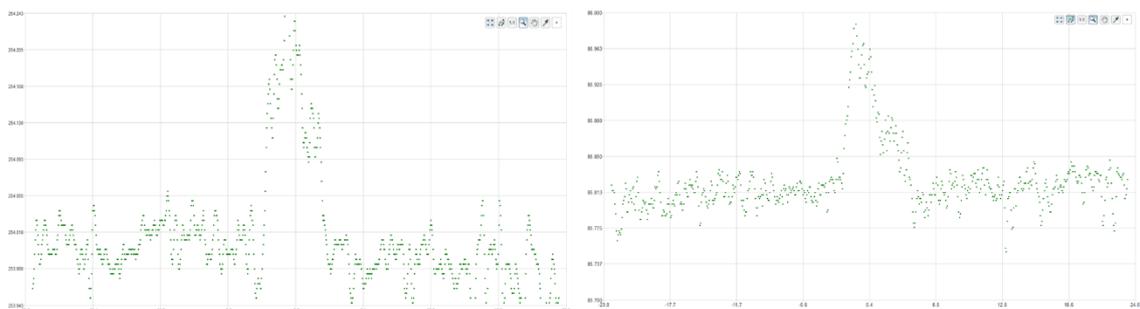


Figura 33. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza marmoleada.

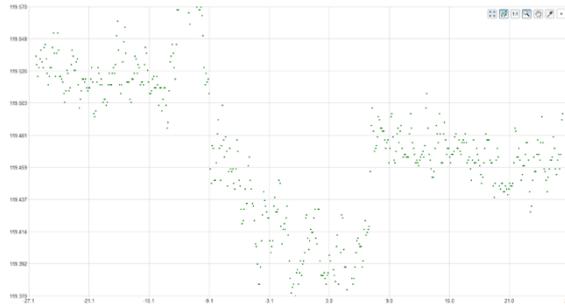


Figura 34. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza marmoleada.

- Pieza verde lisa brillante

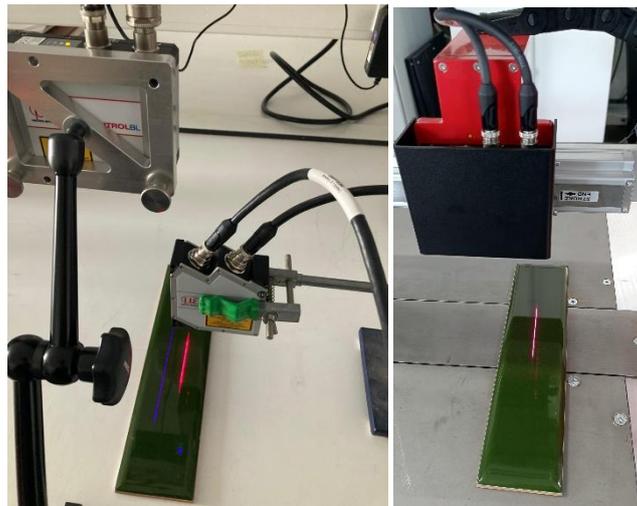


Figura 35. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza verde lisa brillante.

El modelo 3002 ofrece lecturas con menos ruido que el resto de los modelos.

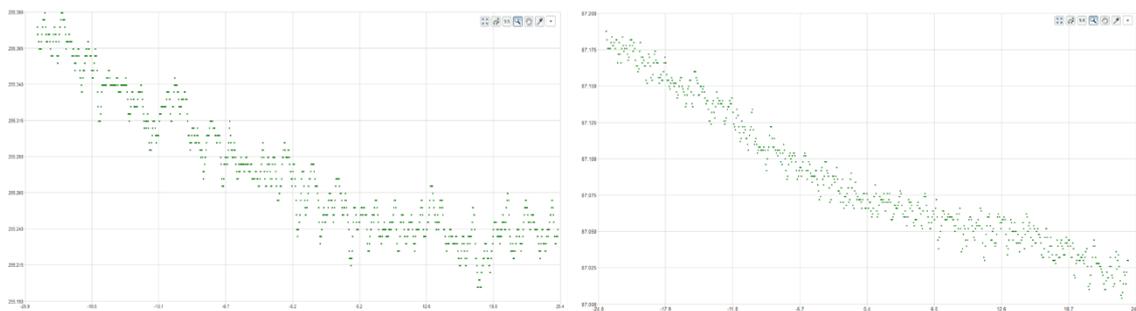


Figura 36. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza verde lisa brillante.

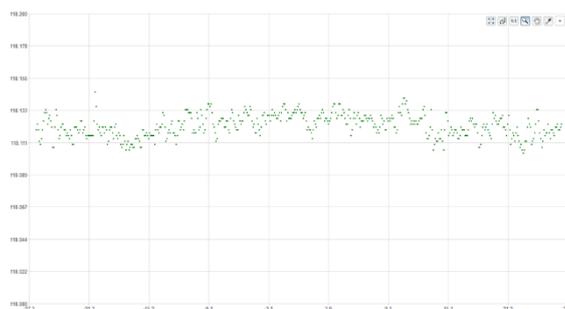


Figura 37. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza verde lisa brillante.

- Pieza verde rugosa brillante con burbujas internas

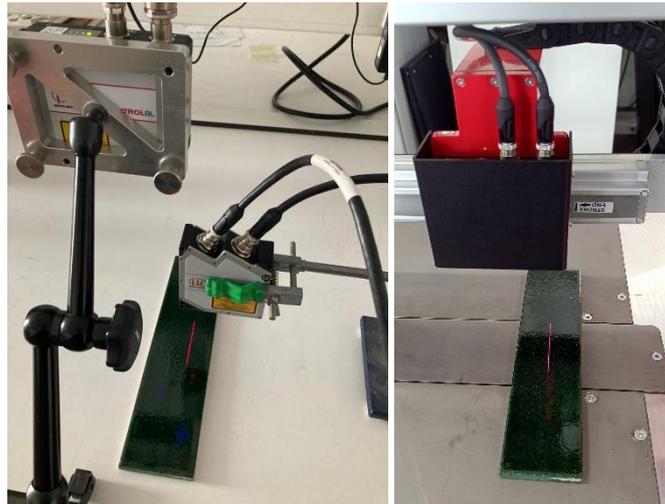


Figura 38. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza verde rugosa.

Los modelos 2500 Y 3500 pierden lecturas en algunos pixeles debido a las burbujas internas y a la rugosidad. El modelo 3002 funciona mejor con este tipo de pieza sobre todo si la medida es dinámica.

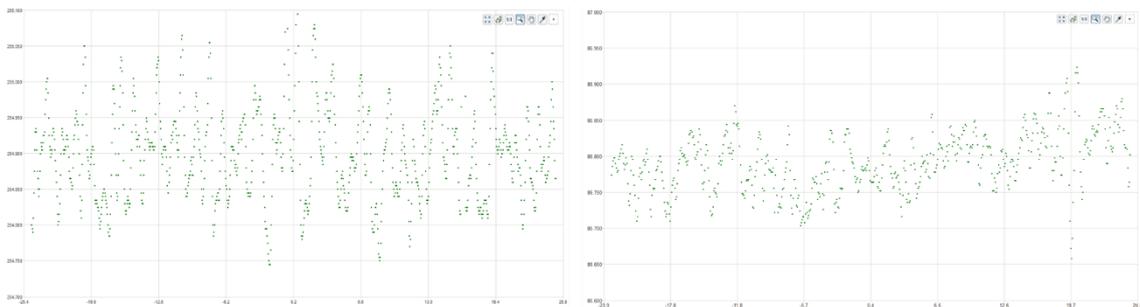


Figura 39. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza verde rugosa.

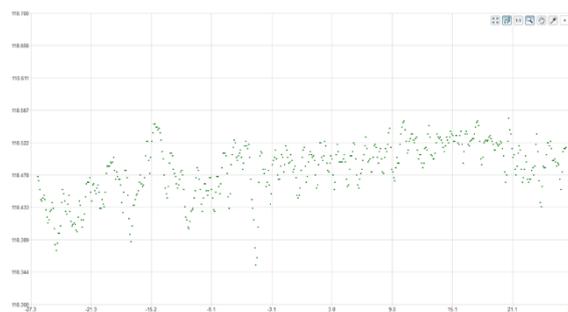


Figura 40. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza verde rugosa.

- Pieza de vidrio flotado

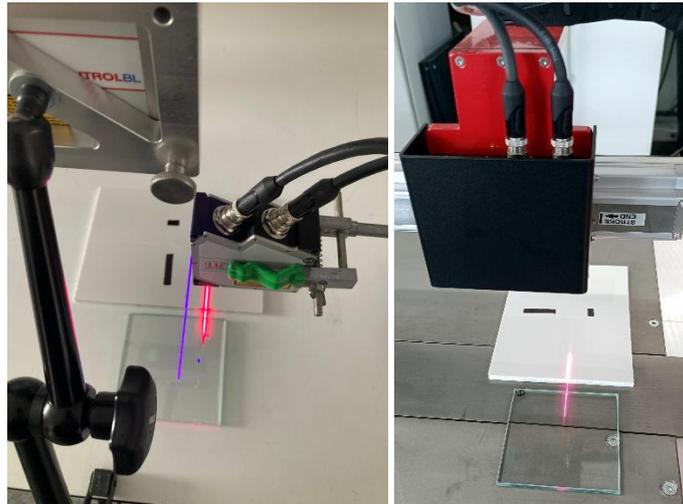


Figura 41. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza de vidrio flotado.

Se coloca una pieza opaca del mismo espesor que el vidrio transparente y se deja un hueco entre piezas. Todos los modelos ofrecen lecturas incorrectas sobre vidrio transparente a pesar de que el modelo 3010, de laser azul, debería ser adecuado para medir superficies transparentes.

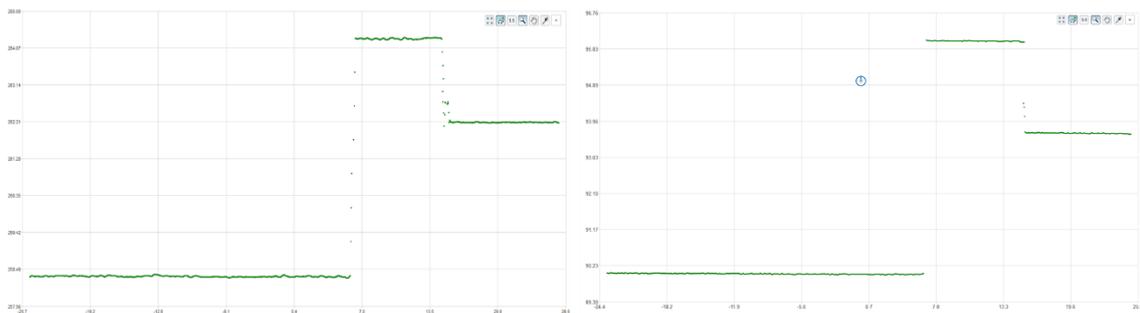


Figura 42. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza de vidrio flotado.

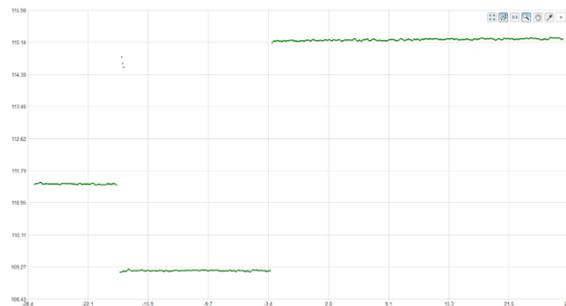


Figura 43. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza de vidrio flotado.

- Pieza de madera natural

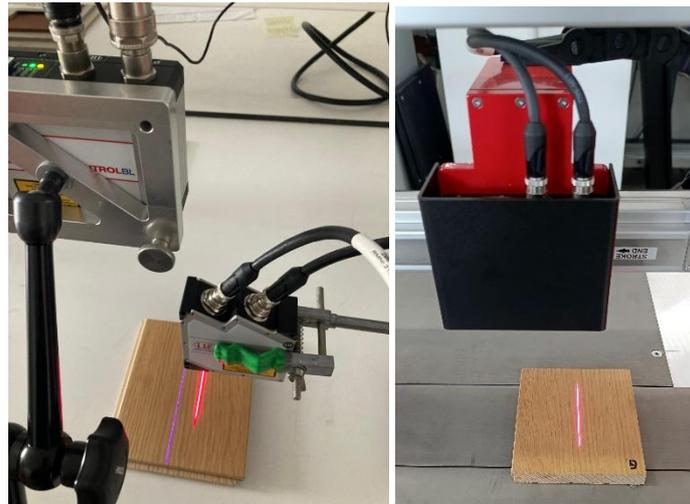


Figura 44. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza de madera natural.

Los sensores 2500 y 3002 ofrecen lecturas más robustas que el sensor 3010.

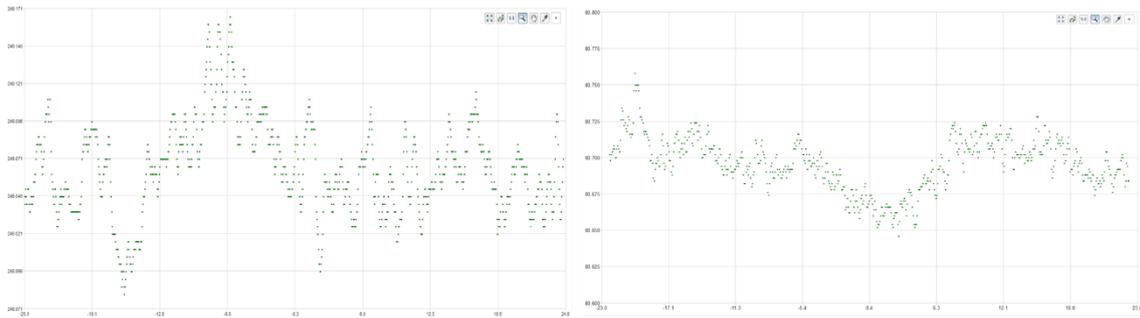


Figura 45. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza de madera natural.

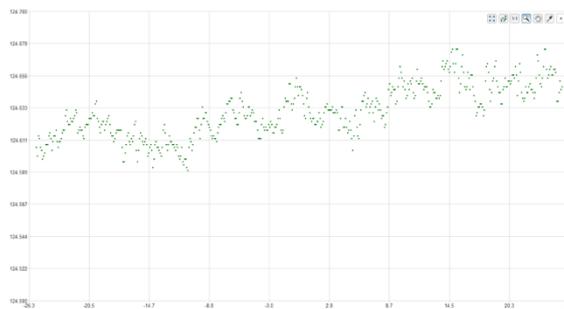


Figura 46. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza de madera natural.

- Pieza de aluminio

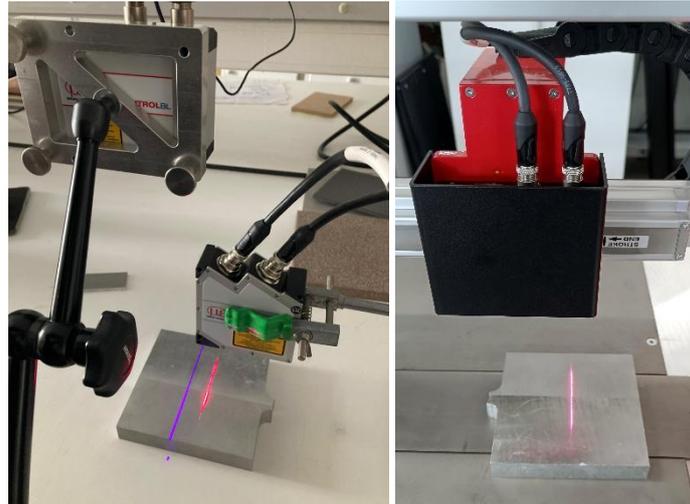


Figura 47. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza de aluminio.

El sensor 3002 ofrece mejores resultados sobre piezas de aluminio que el resto de los modelos.

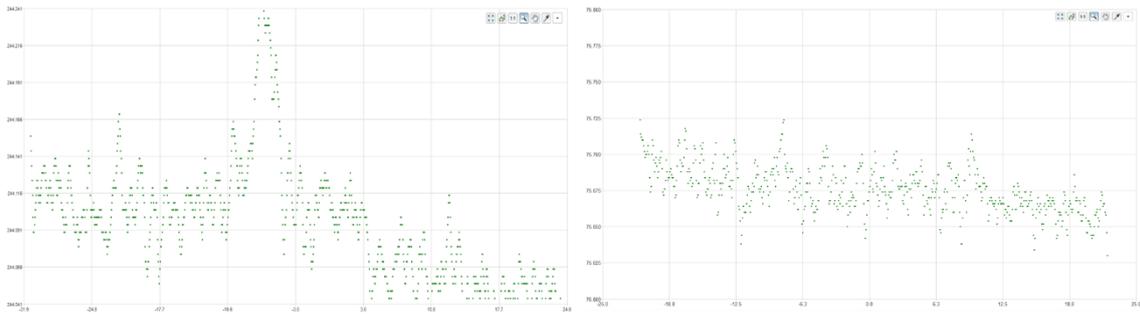


Figura 48. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre pieza de aluminio.

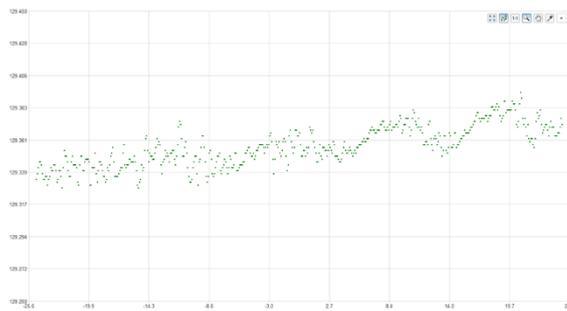


Figura 49. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre pieza de aluminio.

- Pieza cerámica con elevado relieve

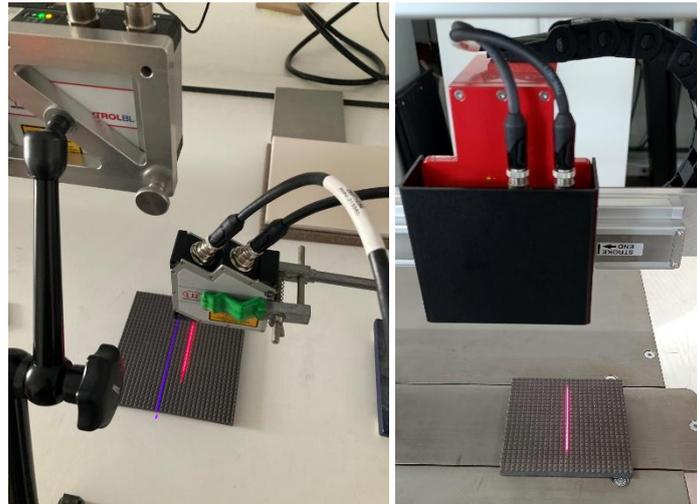


Figura 50. Detalle de los sensores de MICROEPSILON midiendo sobre pieza cerámica con elevado relieve.

Los modelos de láser rojo, 2500 y 3002, ofrecen lecturas más definidas y con menor ruido.

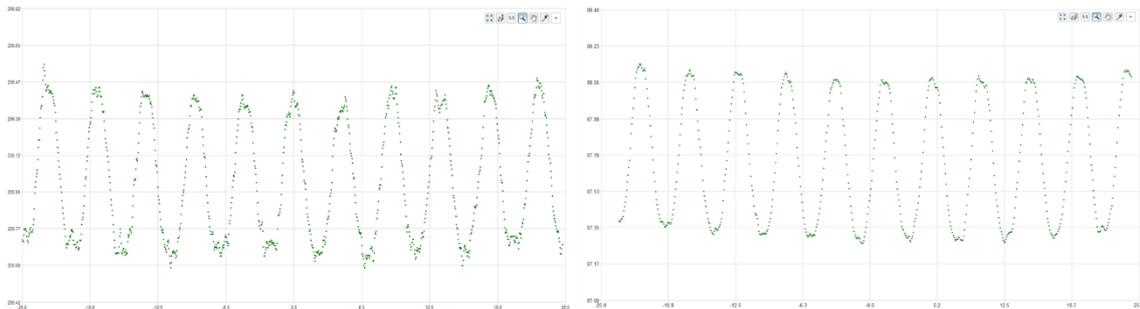


Figura 51. Medidas ofrecidas por el modelo 3010 (izq.) y el modelo 2500 (der.) sobre cerámica con elevado relieve.

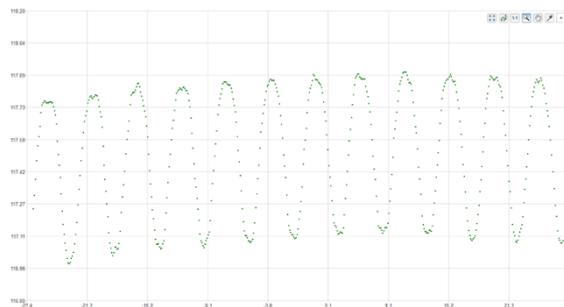


Figura 52. Medidas ofrecidas por el modelo 3002 sobre cerámica con elevado relieve.

En vista de los resultados no se justifica la compra del modelo de alta gama y laser azul modelo 3500 frente a los modelos de laser rojo.

Ambos modelos de laser rojo ofrecen un funcionamiento muy similar y misma precisión en el eje z, aunque el modelo 3002 tiene una mayor resolución en el eje x (1028 pixeles frente a 640) y, sobre todo, una mayor velocidad de captura de perfiles, 10000 Hz frente a 2000Hz del modelo 2500. Se decide incorporar al diseño del demostrador el modelo 3002 por sus mejores prestaciones frente al modelo 2500 teniendo en cuenta que la diferencia de precio entre ambos modelos es mínima.

2.2 Diseño 3D y construcción del equipo de medida de dimensiones y defectos por laser

Una vez seleccionados los perfilómetros láser 2D que utilizará el equipo se pasó a la etapa de diseño del equipo. Se pretende que el equipo explote las distintas funcionalidades que se pueden lograr con este tipo de sensores. Para ello se concibe un chasis de grandes dimensiones capaz de procesar piezas de hasta 1900 mm de longitud. Sobre este chasis se montan dos perfilómetros laser 2D enfrentados, uno por la parte superior y otro por la parte inferior. La zona media del equipo dispone de una placa extraíble que permite tener un plano liso para realizar medidas con únicamente el telémetro superior o extraer la placa para realizar medidas con ambos telémetros.

Para la movimentación se incorporan al diseño actuadores lineales de correa de 2 metros de longitud montados sobre perfiles de acero. Se colocará un actuador en la parte superior para la movimentación del telémetro superior y uno en la parte inferior. Ambos actuadores estarán posicionados de forma que se asegure el sincronismo de los telémetros cuando se ordene a los servomotores que se inicie el movimiento.



Figura 53. Actuadores lineales de la marca SMC modelo LEFB.

En la figura 54 se presenta una vista isométrica general del diseño 3D del demostrador. El conjunto está compuesto por una bancada de perfiles de aluminio que sirve de soporte estructural para una placa base de aluminio, la cual se encuentra firmemente anclada mediante fijaciones mecánicas.

La placa base incorpora un fresado longitudinal para el guiado y paso de los cables provenientes del telémetro superior y del actuador lineal, conduciéndolos hacia la caja inferior donde se aloja el instrumental de control y adquisición de datos. Adicionalmente, se han mecanizado dos recesos de gran superficie destinados a la instalación de placas de acero inoxidable atornilladas. Estas placas actúan como superficies de sacrificio antidesgaste, protegiendo la placa base frente al roce repetido de la cerámica durante su posicionamiento sobre el bastidor. Gracias a este diseño modular, las placas pueden sustituirse de forma independiente una vez alcanzado su límite de desgaste, evitando el reemplazo completo de la placa base.

La placa base también dispone de alojamientos fresados superior e inferiormente, que permiten el anclaje de columnas verticales. Estas columnas funcionan como montantes estructurales para el soporte de las traviesas de acero, sobre las cuales se fijan los actuadores lineales y las cadenas portacables. Los montantes superiores se unen mediante un perfil de aluminio que dota de rigidez al sistema de actuación lineal.

Finalmente, en la zona central de medida se ha previsto una placa adicional de acero inoxidable atornillada a la placa base. Esta configuración permite disponer de una superficie plana y continua de medición o, alternativamente, desmontarla para habilitar el acceso desde ambos lados de la bancada para realizar medidas en las dos caras de la pieza.

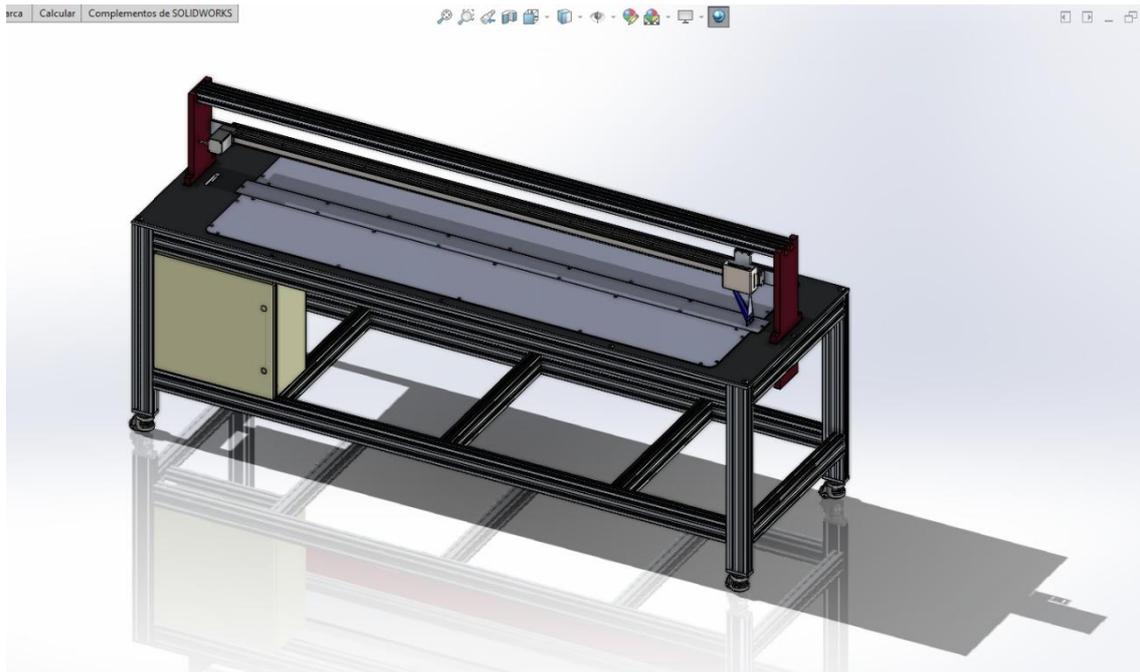


Figura 54. Vista isométrica general del demostrador de medida de dimensiones y defectos.

En la figura 55 se presenta un detalle del telémetro superior en la zona final de medición del equipo. La región de medición del láser, centrada sobre la placa adicional central, se ha resaltado en color azul para su identificación.

Tanto el telémetro superior como el inferior estarán provistos de una carcasa metálica de protección perimetral, diseñada para minimizar el riesgo de impactos accidentales durante la colocación de las piezas sobre el bastidor.

Asimismo, la posición de inicio de ambos telémetros se ha definido fuera del rango operativo de colocación de piezas, garantizando que el sensor permanezca protegido durante el posicionamiento de las piezas a analizar. Y evitando la caída de cualquier objeto o suciedad a la óptica del telémetro inferior.

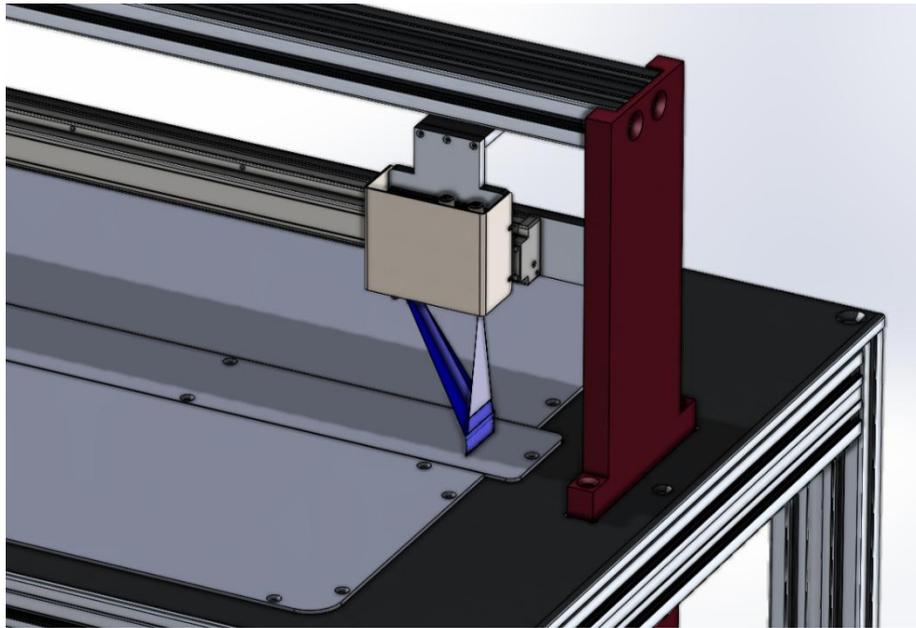


Figura 55. Detalle telémetro superior anclado al actuador lineal superior.

En la figura 56 se muestra una vista trasera del equipo donde se puede observar la cadena portacables.

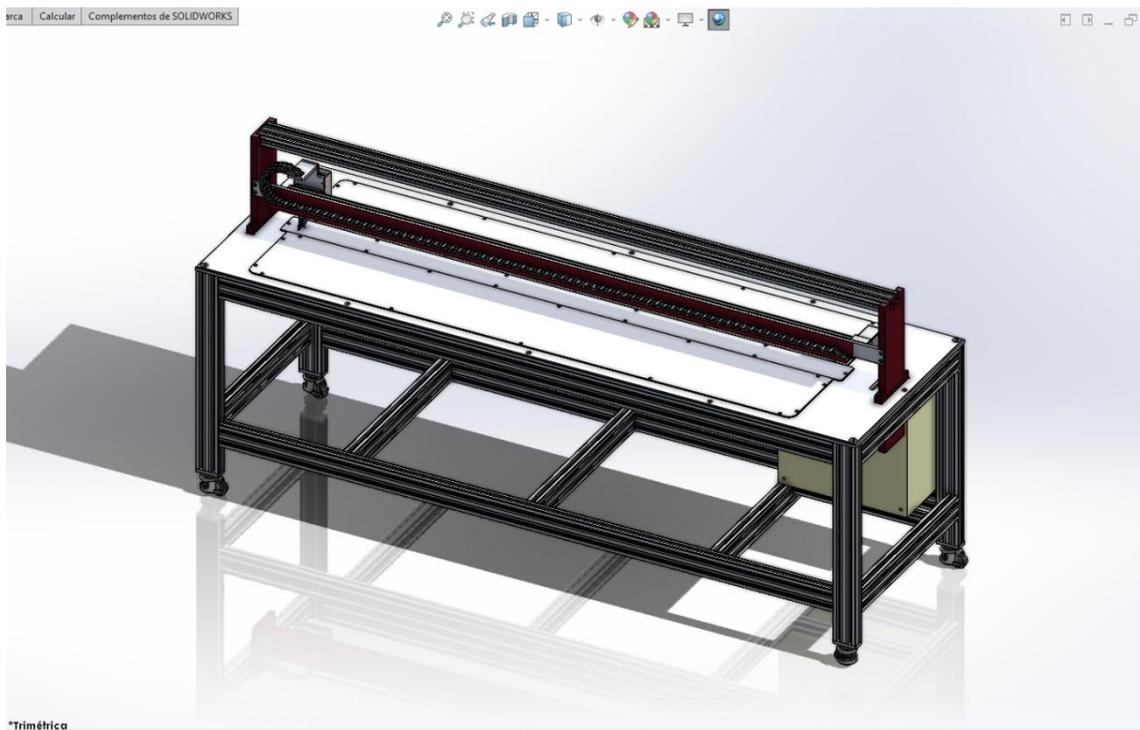


Figura 56. Vista isométrica trasera del demostrador de medida de dimensiones y defectos.

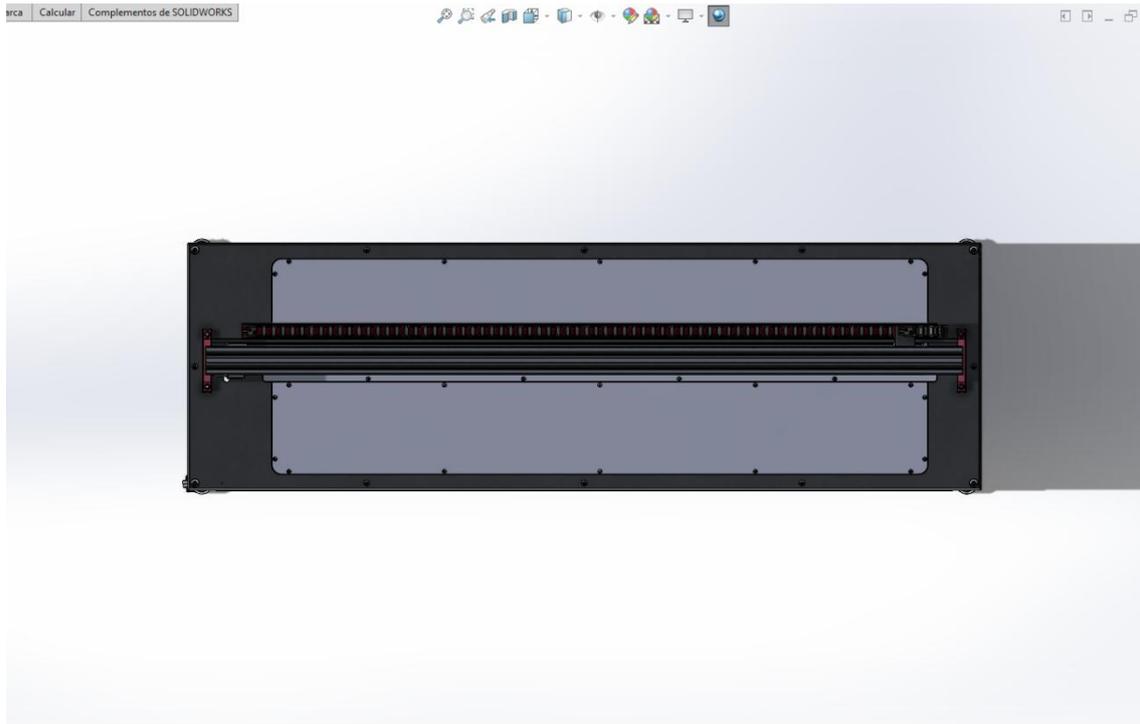


Figura 57. Vista en planta del demostrador de medida de dimensiones y defectos.

En la vista en alzado de la figura 58 se pueden observar ambos telémetros (superior e inferior), su colocación en el eje z se calcula para que el punto focal de los telémetros se sitúe sobre el plano de medida del equipo.

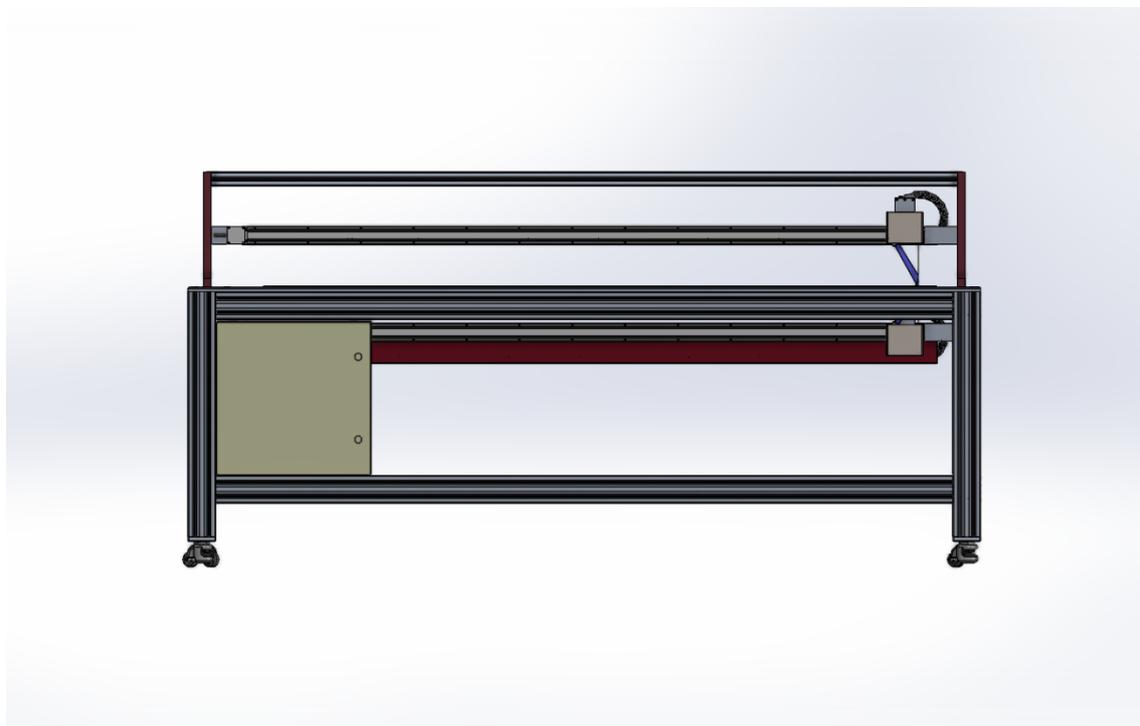


Figura 58. Vista en alzado del demostrador de medida de dimensiones y defectos.

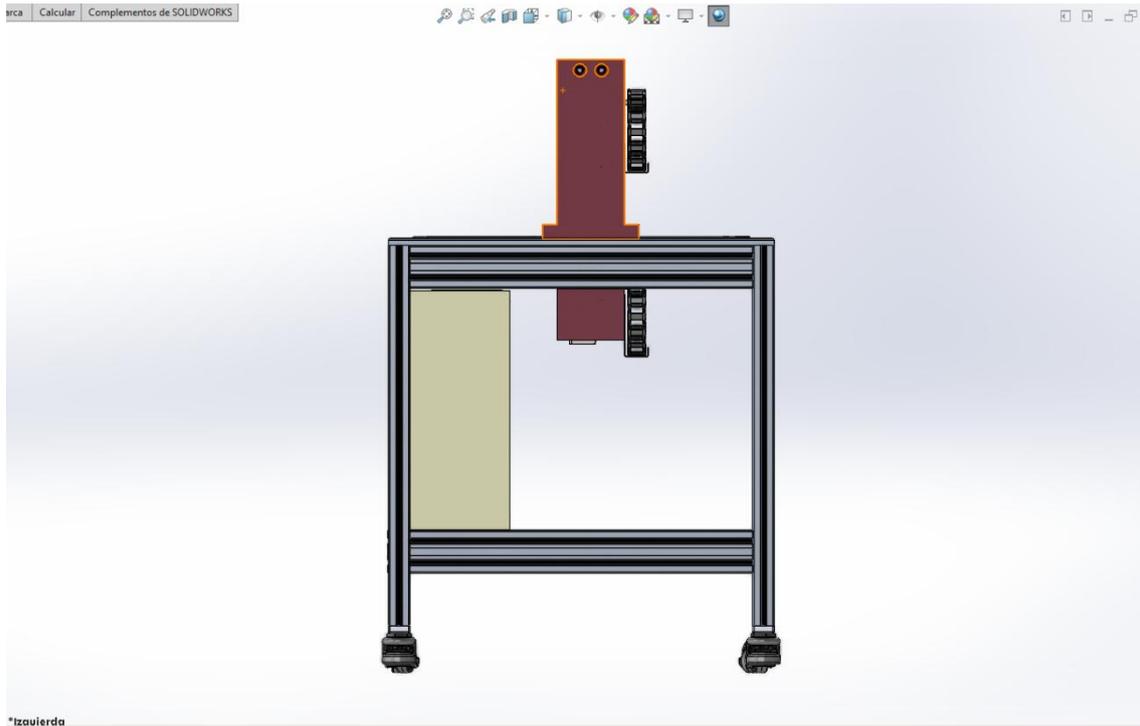


Figura 59. Vista en perfil izquierdo del demostrador de medida de dimensiones y defectos.

En la figura 60 se muestra la estructura en perfiles de aluminio del demostrador tras su ensamblaje.



Figura 60. Estructura en perfilaría de aluminio del demostrador de medida de dimensiones y defectos.

En la figura 61 se muestra el demostrador de medida de dimensiones y defectos una vez ensamblado.



Figura 61. Vista general de la zona de medida y detalle de la zona de inicio de ensayo.

3 Demostrador de técnica para la determinación de sílice cristalina respirable

Durante la ejecución de este proyecto se trabajará y profundizará en las problemáticas identificadas con anterioridad en el equipo de medida SILICA AIR XS. Principalmente en cuanto a la capacidad de identificación y cuantificación de los niveles de sílice cristalina respirable en tiempo real.

3.1 Validación de los montajes experimentales

Con el objetivo de llevar a cabo una comparativa entre el Silica AIR XS y el resto de los equipos en unas condiciones controladas, se planteó llevar a cabo un montaje experimental controlado a escala de laboratorio, donde se pudiesen manipular diferentes tipologías de polvo o materiales, con distintos contenidos en cuarzo/sílice, en primera instancia se escogió el “ensayo de tambor”. Este enfoque, permitía evaluar de forma sistemática la respuesta del equipo de medida en condiciones controlada cuando se llevaba a cabo la manipulación de diferentes materiales y también su comparativa con un método gravimétrico de referencia (bomba, ciclón y filtro) y con un equipo Grimm MINI-LAS, capaz de medir de forma continua la fracción respirable del polvo.

Ensayo de tambor

El “ensayo de tambor”, consta principalmente de un tambor rotatorio que contendría el material en su interior. El movimiento giratorio en continuo del tambor generaría polvo de manera

constante, el cual sería aspirado hacia la zona de muestreo, donde, mediante un “splitter” se dividiría en los 4 puntos de interés.

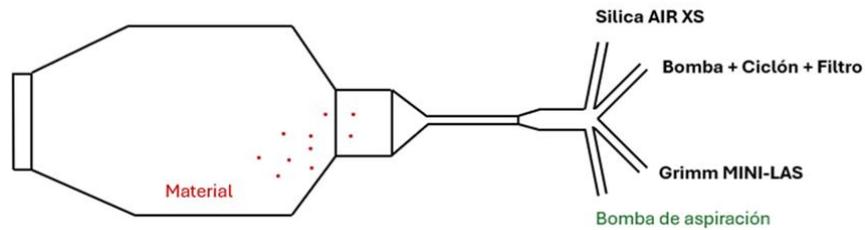


Figura 62. Esquema del ensayo de tambor

Previamente a la realización de los ensayos con los diferentes materiales, se llevó a cabo un montaje de prueba, para la verificación de los caudales en los diferentes puntos de muestreo en el splitter. Para llevar a cabo dicha verificación, se instalaron caudalímetros (rotámetros, másticos digitales, etc.) a la entrada de los diferentes equipos o bombas de muestreo.

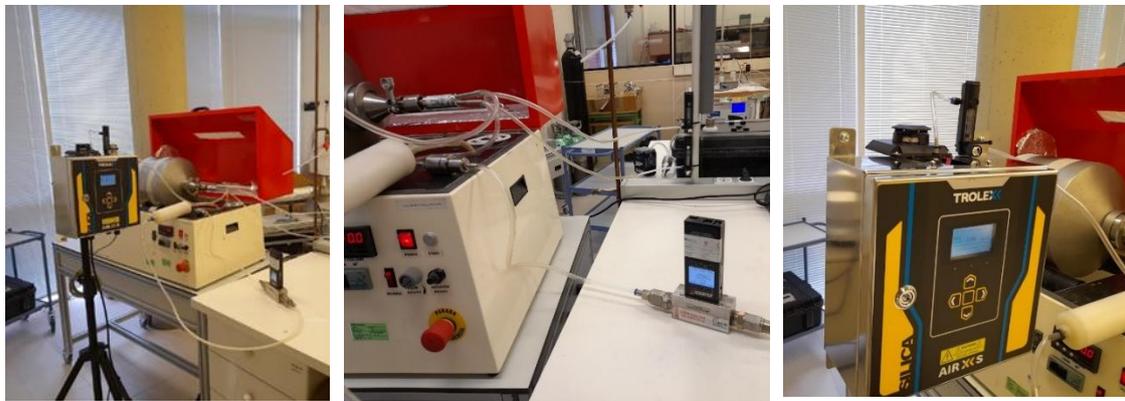


Figura 63. Montaje experimental para la verificación de caudales en el ensayo de tambor

En la siguiente tabla se muestran los caudales teóricos y experimentales de los diferentes equipos durante la verificación previa realizada:

Tabla 4. Resultados obtenidos de la verificación de caudal para los diferentes equipos de medida

Equipo	Caudal Teórico (L/min)	Caudal Experimental (L/min)
Silica AIR XS	1.5	0
Bomba de muestreo	4.2	4.2
Grimm MINI-LAS	1.2	1.2
Bomba aspiración*	31	31

*La bomba de aspiración a 31 L/min es necesaria en el ensayo de tambor para garantizar un caudal total aproximado de 38 L/min, necesario para desplazar el polvo generado hasta la zona de muestreo.

Tal y como se puede ver en los datos de la tabla, durante las primeras pruebas en el ensayo de tambor se observó una pérdida de caudal importante en la entrada de aire del equipo de medida Silica AIR XS, llevando su caudal prácticamente a cero. Es por esto por lo que se dedujo que la bomba de aspiración de 31 L/min del ensayo de tambor, generaba pérdida de carga total en el equipo de medida de SCR y el equipo no tenía potencia suficiente para contrarrestarla, imposibilitando de esta manera trabajar al caudal teórico de 1.5 L/min. Esta fue la razón por la

que, aunque parecía un montaje prometedor, se tuvo que descartar debido a los problemas técnicos y la incapacidad de lograr que el Silica AIR XS funcionase correctamente con este montaje.

De forma paralela, a raíz de este problema, se llevaron a cabo varias reuniones y contactos con la empresa fabricante de este dispositivo (TROLLEX), para aclarar ciertas dudas técnicas respecto al funcionamiento interno de este equipo de medida. Tras estos contactos y reuniones se concretaron varios aspectos de suma importancia:

- Para alcanzar el caudal total nominal de 1.5 L/min que marca el fabricante en el manual, el equipo dispone de dos entradas (superior e inferior). La entrada superior recoge la muestra de polvo (aire sucio), mientras que la entrada inferior pasa el aire por los filtros, por lo que se considera aire limpio. En condiciones normales cada por cada entrada debe existir un caudal de 0.75 L/min, tal y como se puede ver en la siguiente figura:

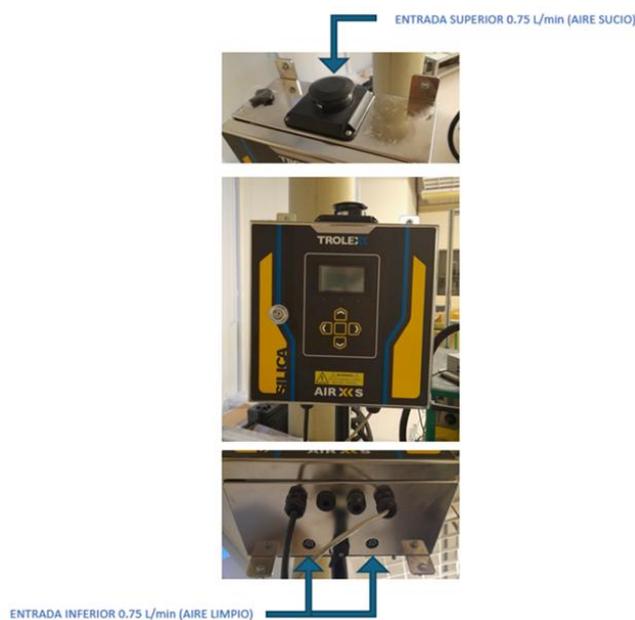


Figura 64. Esquema de funcionamiento de los caudales del equipo Silica AIR XS

- Las bombas de aspiración son capaces de regular el caudal, no obstante, solamente te garantiza que el caudal total combinado sea de 1.5 L/min, no es capaz de regular cada entrada de forma independiente. Por tanto, si el equipo sufre alguna pérdida de carga en alguno de las 2 entradas (superior o inferior), el caudal se compensará automáticamente aumentando el caudal de entrada contrario.

Tras comprender exhaustivamente el funcionamiento interno del equipo y los principios en los que se basa su operación, se pudo obtener una visión más clara de los posibles factores que podrían estar afectando e interfiriendo en la utilización del Silica AIR XS en el ensayo de tambor.

Como resultado de estas conclusiones, se decidió testear el Silica AIR XS en otro de los ensayos a escala de laboratorio disponibles en el ITC, en el que se consiguiese minimizar al máximo las pérdidas de carga del sistema, “el ensayo de caída continua”.

Ensayo de caída continua

El “ensayo de caída continua” consiste en dejar caer el material desde cierta altura sobre una corriente ascendente de aire generada por una bomba de aspiración (49 L/min).

El material se dosifica a un caudal de 6–10 g/min a través de un conducto interior concéntrico al conducto exterior, de menor longitud, de modo que el polvo se libera directamente en el flujo en contracorriente, tal y como se puede ver en la Figura 65. Cuanto mayor sea la cantidad de material incorporado a la corriente, mayor será su capacidad para generar polvo en suspensión. Por encima del punto de descarga se sitúan los equipos de muestreo en distintas posiciones, lo que permite caracterizar la fracción de polvo liberada.

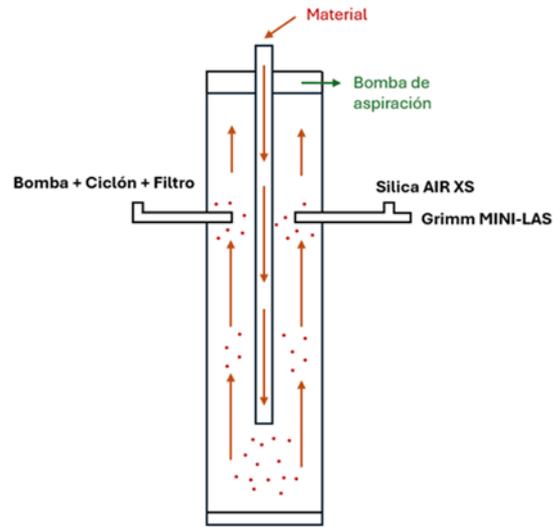


Figura 65. Esquema del ensayo de caída continua

Al igual que se ha realizado para el ensayo de tambor, previamente a la realización de los ensayos, se llevó a cabo un montaje de prueba, para la verificación de los caudales de los diferentes equipos en los puntos de muestreo.

Para llevar a cabo dicha verificación, se instalaron diferentes caudalímetros (rotámetros, másticos digitales, etc.) a la entrada de los diferentes equipos y/o bombas de muestreo. En el caso de la medida de caudal a la entrada superior del Silica AIR XS, se decidió utilizar un caudalímetro de burbuja de jabón (figura 66) con el objetivo de minimizar las pérdidas de carga generada en el sistema.

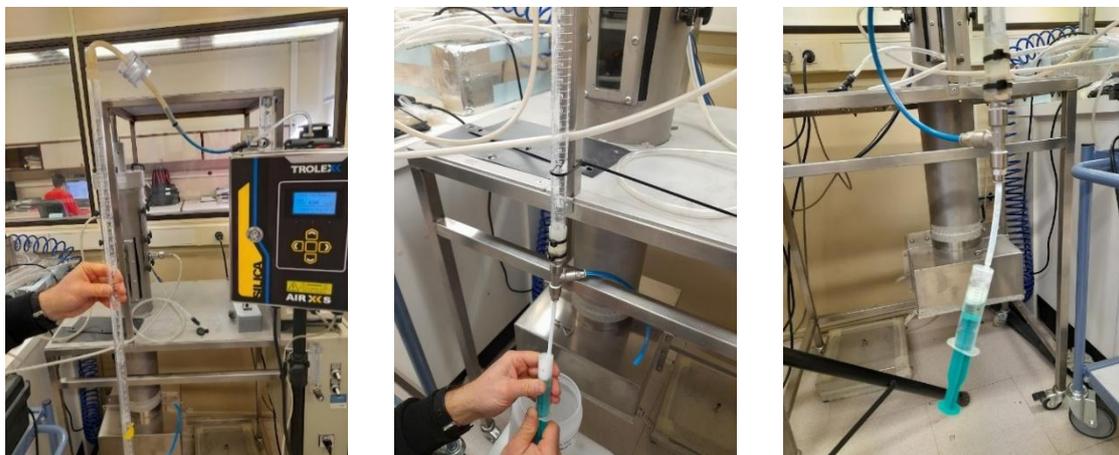


Figura 66. Montaje experimental para la verificación de caudal del Silica AIR XS en el ensayo de caída continua

El caudalímetro de burbuja de jabón se basa en medir el tiempo que tarda una burbuja en recorrer un volumen conocido dentro de un tubo transparente. A partir de esa relación tiempo–volumen se calcula directamente el caudal.

Las siguientes tablas muestran los volúmenes, tiempos y caudales obtenidos en la entrada del equipo Silica AIR XS para cada una de las diferentes repeticiones realizadas y para dos montajes diferentes: con baja pérdida de carga (tabla 6) y con mayor pérdida de carga (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

Tabla 5. Resultados de caudal obtenidos para el Silica AIR XS con baja pérdida de carga en el sistema.

Repetición	Volumen (mL)	Tiempo (s)	Caudal (L/min)
1	70	5.10	0.82
2	70	5.07	0.83
3	70	5.22	0.80
			0.82

Tabla 6. Resultados de caudal obtenidos para el Silica AIR XS con alta pérdida de carga en el sistema.

Repetición	Volumen (mL)	Tiempo (s)	Caudal (L/min)
1	70	8.88	0.47
2	70	8.47	0.49
3	70	8.57	0.49
			0.49

Los resultados muestran que, bajo condiciones de mínima pérdida de carga, el sistema alcanza un caudal medio de 0,82 L/min, valor ligeramente superior al nominal de 0,75 L/min. Sin embargo, al incrementar la pérdida de carga, el caudal se reduce de forma significativa hasta 0,49 L/min, lo que representa una desviación considerable respecto al valor de referencia.

Estos datos corroboran la idoneidad del ensayo de caída para comparar diferentes materiales, dado que el equipo de medida Silica AIR XS es capaz de mantener caudales de entrada próximos al nominal, siempre que se minimicen las pérdidas de carga. Al contrario que pasaba para el ensayo de tambor, donde el caudal del Silica AIR XS era cercano a 0.

Asimismo, evidencian la influencia directa de la resistencia del sistema sobre el caudal de entrada: un aumento en la pérdida de carga reduce el flujo de aire a través de la entrada superior, compensándose mediante la entrada inferior. En consecuencia, resulta imprescindible garantizar una calibración adecuada y un mantenimiento periódico del equipo, con el fin de asegurar la estabilidad del caudal en condiciones de operación.

Los materiales ensayados y los resultados obtenidos se muestran en la sección 3.2 “Resultados de la comparativa del equipo de medida”.

3.2 Resultados de la comparativa del equipo de medida

Tras las verificaciones del montaje y de los diferentes caudales, explicadas previamente en la sección 3.1, se llevó a cabo el montaje final en el ensayo de caída continua, tal y como se ve en las siguientes figuras:



Figura 67. Montaje experimental para la verificación y comparativa del Silica AIR XS en el ensayo de caída continua

Los equipos que se han utilizado para la verificación y comparativa del equipo Silica AIR XS han sido los siguientes: Grimm MINI-LAS, para medir en continuo el polvo de diferentes fracciones (respirable principalmente en este caso) y un kit de muestreo gravimétrico (bomba personal, ciclón y filtro) que se utiliza como método de referencia para la medida de sílice cristalina.

Para poder llevar a cabo una comparativa completa, se decidió evaluar con este montaje 3 materiales diferentes, con contenido en sílice cristalina respirable variable:

Tabla 7. Materiales objeto de ensayo y contenido en cuarzo

Material objeto de ensayo	Contenido en cuarzo
Polvo atomizado	Intermedio (10-40%)
Cuarzo	Máximo ($\approx 100\%$)
Carbonato de calcio	Mínimo ($\approx 0\%$)

El objetivo de usar estos tres materiales es comprobar que el equipo Silica AIR XS, mide el contenido en sílice de forma fiable en todo el rango: niveles intermedios (polvo atomizado), presencia total (cuarzo) y ausencia (carbonato de calcio).

Cada uno de estos materiales se sometió al ensayo de caída continua, con el montaje explicado previamente y con una duración aproximada de 20/30 minutos.

a) Polvo atomizado

La Figura 68 muestra los resultados de SCR en mg/m^3 obtenidos durante el ensayo de caída con el polvo atomizado, medido con los diferentes equipos de muestreo: Silica AIR XS (línea azul), método gravimétrico de referencia (línea roja discontinua) y Grimm MINI-LAS (línea naranja).

Para representar la línea de SCR Grimm MINI-LAS (línea naranja) se ha utilizado el valor experimental medido de polvo respirable en continuo y un valor teórico del 30% de SC en la muestra objeto de estudio (valor que se ha obtenido para el polvo atomizado en estudios previos con esta muestra).

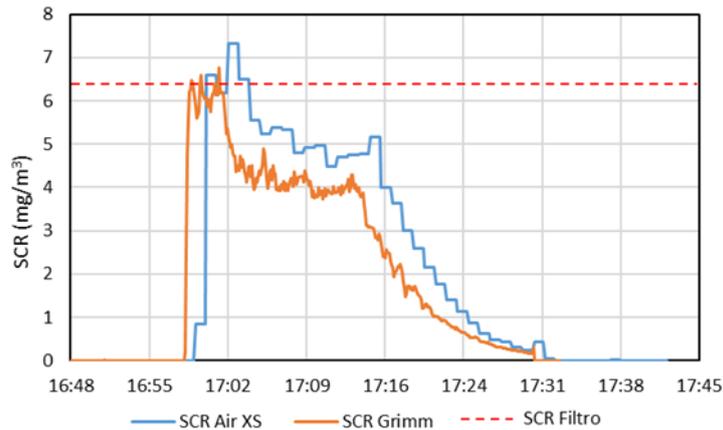


Figura 68. Concentraciones de SCR (mg/m^3) obtenidos para el polvo atomizado

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las concentraciones promedio de SCR (mg/m^3) calculados a partir de los datos obtenidos en las medidas en continuo:

Tabla 8. Comparativa de concentraciones de SCR (mg/m^3) obtenidos para el polvo atomizado

Equipo de medida	SCR (mg/m^3)
Filtro (método de referencia)	6.5
Silica AIR XS	5.4
Grimm MINI-LAS (30% SCR)	4.6

Al observar los resultados obtenidos, se detecta una correlación bastante buena entre los diferentes equipos de medida. Además, con estos datos se puede estimar el porcentaje (%) presente de SCR en el polvo atomizado medido por el Silica AIR XS y compararlo con el método de referencia para observar desviaciones importantes.

Tabla 9. Comparativa de contenido de SCR (%) obtenidos para el polvo atomizado

Equipo de medida	% SCR
Filtro (método de referencia)	30
Silica AIR XS	25

En este primer material utilizado para la comparativa entre el Silica AIR XS y el método gravimétrico de referencia, se han obtenido resultados satisfactorios, obteniendo concentraciones y porcentajes de SCR en la muestra muy similares, del mismo nivel de magnitud, muy comparables entre ellos.

b) Cuarzo

De la misma manera que para el material previo, Figura 69 muestra los resultados de concentración de SCR en mg/m^3 obtenidos durante el ensayo de caída con el cuarzo y con los diferentes equipos de muestreo: Silica AIR XS (línea azul), método gravimétrico de referencia (línea roja discontinua) y Grimm MINI-LAS (línea naranja).

Para representar la línea de SCR Grimm MINI-LAS (línea naranja) se ha utilizado el valor experimental medido de polvo respirable en continuo y un valor teórico del 90% de SC en la

muestra objeto de estudio (valor mínimo de contenido de SC que se ha obtenido para el cuarzo en estudios previos con esta muestra).

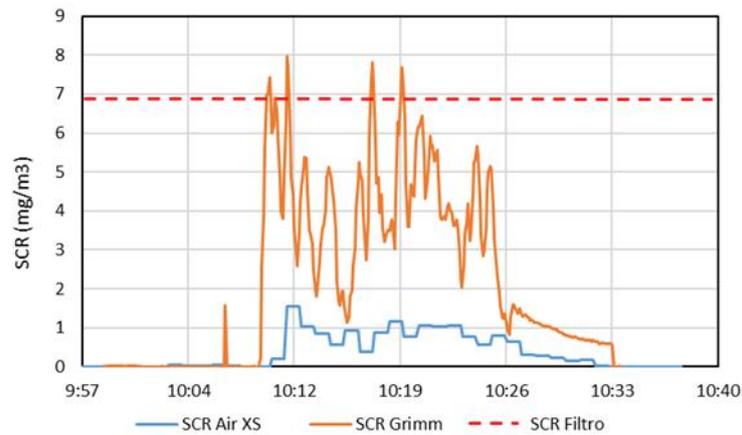


Figura 69. Concentraciones de SCR (mg/m³) obtenidos para el cuarzo

Equipo de medida	SCR (mg/m ³)
Filtro (método de referencia)	7
Silica AIR XS	0.9
Grimm MINI-LAS (30% SCR)	4.3

Tabla 10. Comparativa de concentraciones de SCR (mg/m³) obtenidos para el cuarzo

En la Figura 69 y Tabla 10 se observa claramente una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con el Silica AIR XS (azul) y los resultados obtenidos por el método de referencia y de cálculo (líneas naranja y roja).

Además, si se realiza el cálculo del porcentaje (%) de SCR presente en el cuarzo medido por el equipo Silica AIR XS y se compara con el medido por el método de referencia, se observan desviaciones importantes en los resultados:

Equipo de medida	SCR (mg/m ³)
Filtro (método de referencia)	90
Silica AIR XS	11

Tabla 11. Comparativa de contenido de SCR (%) obtenidos para el cuarzo

Debido a la diferencia entre los resultados obtenidos, se repitió el ensayo con otro cuarzo diferente. No obstante, se obtuvieron resultados prácticamente idénticos.

Los resultados obtenidos con los cuarzoes nos hicieron sospechar acerca de un posible mal funcionamiento del equipo. La diferencia obtenida en los valores de concentración y porcentaje era muy elevada para uno de los casos a priori más sencillos, donde solamente estaba presente el cuarzo (100% SC) y el equipo no debería de tener ningún problema ni interferencia a la hora de realizar las medidas.

c) Carbonato de calcio

Para este último material, un problema técnico en la realización de las medidas hizo que el equipo Silica AIR XS (línea azul) se parase a mitad de ensayo. No obstante, los datos obtenidos en este periodo son muy interesantes y nos permite confirmar las debilidades del equipo de medida.

La Figura 70 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran los resultados de concentración de SCR en mg/m^3 obtenidos durante el ensayo de caída con el carbonato de calcio y con los diferentes equipos de muestreo: Silica AIR XS (línea azul), método gravimétrico de referencia (línea roja discontinua) y Grimm MINI-LAS (línea naranja).

Para representar la línea de SCR Grimm MINI-LAS (línea naranja) se ha utilizado el valor experimental medido de polvo respirable en continuo y un valor teórico del 2% de SC en la muestra objeto de estudio (valor máximo de contenido de SC que se ha obtenido para el carbonato de calcio en estudios previos con esta muestra).

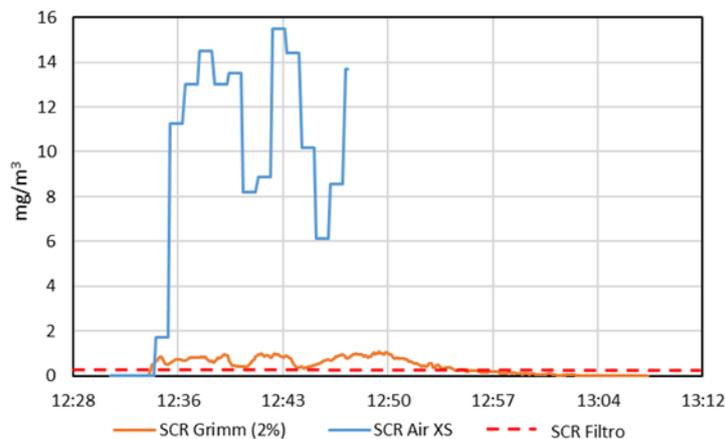


Figura 70. Concentraciones de SCR (mg/m^3) obtenidos para el carbonato de calcio

Tabla 12. Comparativa de concentraciones de SCR (mg/m^3) obtenidos para el carbonato de calcio

Equipo de medida	SCR (mg/m^3)
Filtro (método de referencia)	1.2
Silica AIR XS	11.5
Grimm MINI-LAS (30% SCR)	0.7

Al igual que en el caso del cuarzo, se observa claramente una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con el Silica AIR XS (azul) y los resultados obtenidos por el método de referencia y de cálculo (líneas naranja y roja).

El porcentaje (%) de SCR presente en el carbonato de calcio medido por el equipo Silica AIR XS y medido por el método de referencia (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), también presenta diferencias muy elevadas.

Tabla 13. Comparativa de contenido de SCR (%) obtenidos para el carbonato de calcio

Equipo de medida	SCR (mg/m^3)
Filtro (método de referencia)	2

Silica AIR XS

19

Los resultados obtenidos con el carbonato de calcio confirmaron las sospechas acerca de un posible mal funcionamiento del equipo. Al igual que en el caso previo, los valores de concentración y porcentaje eran demasiado dispares en otro de los casos más sencillos, donde no existía la presencia de cuarzo y el equipo no debería de tener ninguna interferencia a la hora de realizar las medidas, dando un valor de SCR lo más similar a cero.

En resumen, los resultados iniciales obtenidos con el polvo atomizado mostraron una buena correlación entre las mediciones del Silica AIR XS y el método gravimétrico de referencia. No obstante, los ensayos realizados posteriormente con el cuarzo y carbonato de calcio, dos escenarios extremos con >90% / <2% de contenido en SC, respectivamente, mostraron un deficiente desempeño del Silica AIR XS mostrando diferencias muy significativas al realizar la comparativa con el método gravimétrico de referencia.