

Evaluación teórico experimental de la influencia de la rugosidad en la medida de ángulo de contacto como característica fundamental de la fisicoquímica superficial

Sergio Armando Celis Madrid, Silvia Alejandra Gómez Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Físico

Director

Jaime Enrique Meneses Fonseca

PhD. Ciencias (Óptica)

Codirector

Diego Fernando Hernández Pardo

MSc. Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía constante, por darme fuerza en los momentos difíciles y luz en días oscuros.

A la memoria de mi padre, Alirio Gómez, y de mi hermano, Julián: gracias por su luz y por permanecer presentes en cada uno de mis logros, junto a los demás seres queridos que ya partieron. Su recuerdo ha sido de inspiración y consuelo a lo largo de este camino.

A mi madre Amparo Rodríguez, por su incansable apoyo, amor y fortaleza que han sido fundamentales en cada etapa de mi formación.

A mi hermano Jhoan Alonso, por estar cerca con su apoyo y cariño.

A mi compañero de vida, Juan Carlos Gaitán, por su comprensión, paciencia y respaldo durante este proceso.

A mi hijo, Alan Matías, mi mayor inspiración, fuerza y motivo. Gracias por dar sentido a cada esfuerzo y recordarme cada día por qué vale la pena seguir adelante.

Y a toda mi familia, gracias por acompañarme, por creer en mí y por estar siempre a mi lado en este recorrido.

Este logro es tan mío como de ustedes.

Silvia Gómez

Agradecimientos

Esta tesis representa el resultado académico alcanzado tras varios años de esfuerzo, compromiso y dedicación. Sin embargo, más allá del conocimiento adquirido, la experiencia vivida durante el pregrado nos ha dejado aprendizajes valiosos que trascienden lo académico, fortaleciendo nuestro crecimiento personal y profesional.

Al culminar esta etapa tan significativa de nuestra formación, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que este proyecto fuera posible.

Agradecemos a nuestros profesores, por compartir su conocimiento, su tiempo y su guía a lo largo del camino. De manera especial, expresamos nuestro sincero reconocimiento a los profesores Jader Enrique Guerrero y Arturo Plata por su invaluable dedicación, por el tiempo que siempre estuvieron dispuestos a brindarnos y por compartir con generosidad sus conocimientos.

A nuestro asesor de tesis, Jaime Meneses, por su paciencia, exigencia y orientación constante, pilares fundamentales para hacer posible este logro.

A nuestras familias y amigos, por su apoyo en los momentos difíciles y su confianza en nuestras capacidades. Gracias por estar siempre presentes, brindándonos fuerza y motivación.

Y finalmente, agradecemos a nuestra alma mater por brindarnos un espacio de formación, crecimiento y transformación.

A todos, mil gracias por ser parte de este logro.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo General	21
1.2 Objetivos Específicos.....	21
2. Conceptos básicos de la fisicoquímica de superficies	22
2.1 Fases e interfases.....	22
2.2 Clasificación de las interfases.	23
2.3 Energía interfacial	24
2.4 Tensión interfacial.....	25
2.5 Ecuación de Young – Laplace.....	29
2.5.1 Ecuación de Young – Laplace bajo campo gravitacional.	31
3. Conceptos y modelos aplicados al mojado de superficies ideales	31
3.1 Superficie ideal	32
3.2 Mojabilidad	32
3.3 Gota sésil.....	34
3.4 Ángulo de contacto	35
3.4.1 Interpretación de los valores del ángulo de contacto:	36
3.4.2 Evolución en la medición del ángulo de contacto: de Young al procesamiento digital de imágenes.....	37
3.5 Ecuación de Young	40

4. Conceptos y modelos aplicados al mojado de superficies reales	46
4.1 Superficies reales	46
4.2 Textura.....	46
4.2.1 Rugosidad Superficial	48
4.2.1.1 Perfil de rugosidad	48
4.3 Modelos teóricos	49
4.3.1 Modelo de Wenzel	50
4.3.2 Modelo de Cassie-Baxter	51
4.3.3 Modelo de Kubiak.....	53
4.3.3.1 Parámetro RLO	54
4.3.3.2 Parámetro Rmr	55
4.4 Caracterización de la topografía superficial mediante microscopía de interferencia por luz blanca.....	57
5. Montaje experimental	61
5.1 Diagrama esquemático	61
5.2 Materiales.....	61
5.3 Procedimiento de preparación.....	62
5.3.1 Sistema óptico	63
5.3.1.1 Calibración del sistema óptico	65
5.3.1.1.1 Calibración horizontal.....	66
5.3.1.1.2 Calibración vertical	67
5.3.1.1.3 Error en la medida del ángulo	68
5.3.2 Fuente de iluminación.....	70

5.3.3 Sistema de inyección.....	73
5.3.3.1 Calibración del sistema inyección.....	74
5.4 Ensamble del dispositivo para medir ángulo de contacto	76
5.5 Calibración del sistema óptico telecéntrico para medir ángulo de contacto	78
5.6 Validación del sistema óptico telecéntrico para medir ángulo de contacto	81
5.6.1 Elección del material.....	82
5.6.2 Elección del líquido	83
5.6.3 Generación de la gota de agua Tipo I	83
5.6.4 Medición de ángulo de contacto para el sistema silicio-agua.....	86
6. Metodología experimental	89
6.1 Sustrato.....	89
6.2 Preparación de probetas de aluminio para aplicación del modelo de Kubiak.....	89
6.3 Rotación de las probetas y la medida de ángulo de contacto.....	91
6.3.1 Procedimiento de rotación de la probeta y medida del ángulo de contacto.....	92
7. Datos experimentales del ángulo de contacto en función de la rugosidad.....	96
7.1 Evaluación topográfica para la extracción de los parámetros <i>RLO</i> y <i>Rmr</i>	100
7.2 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 0°- 180° de rotación ...	110
7.3 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 30°- 210° de rotación .	112
7.4 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 60°- 240° de rotación .	114
7.5 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 90°- 270° de rotación .	116
7.6 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 120°- 300° de rotación	118
7.7 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 150°- 330° de rotación	120
8. Conclusiones	122

9. Recomendaciones.....	124
Referencias Bibliográficas	125

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de las interfases.</i>	23
Tabla 2. <i>Promedio de medida para el eje horizontal.</i>	66
Tabla 3. <i>Promedio de medida para el eje vertical.</i>	68
Tabla 4. <i>Promedio de medida para el eje horizontal.</i>	70
Tabla 5. <i>Datos obtenidos al usar el ajuste de la mejor elipse</i>	73
Tabla 6. <i>Ángulo de contacto sistema silicio-agua</i>	88
Tabla 7. <i>Datos experimentales para aluminio tratado con lija 1500</i>	96
Tabla 8. <i>Influencia de la orientación superficial en el ángulo de contacto de cada probeta de aluminio</i>	97
Tabla 9. <i>Ajuste de datos experimentales y modelados del ángulo de contacto (orientación 0°)</i> 109	
Tabla 10. <i>Ajuste de datos experimentales y modelados del ángulo de contacto (orientación 90°)</i>	109
Tabla 11. <i>Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 0°-180°)</i>	111
Tabla 12. <i>Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 30°-210°)</i>	113
Tabla 13. <i>Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 60°-240°)</i>	115

Tabla 14. <i>Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 90°-270°)</i>	117
Tabla 15. <i>Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 120°- 300°)</i>	119
Tabla 16. <i>Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 150°- 330°)</i>	121

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diagrama de fuerzas de dos moléculas en un líquido</i>	23
Figura 2. <i>Material sólido formado por moléculas o átomos modelados como rombos</i>	25
Figura 3. <i>Diagrama de fuerzas de dos moléculas en un líquido</i>	26
Figura 4. <i>Superficie que separa dos fluidos</i>	29
Figura 5. <i>Sistema de Mojado</i>	33
Figura 6. <i>Mojado de superficie por dos gotas de líquidos diferentes</i>	34
Figura 7. <i>Gota sésil</i>	35
Figura 8. <i>Ángulo de contacto</i>	35
Figura 9. <i>Ángulo de contacto de líquidos sobre superficies</i>	37
Figura10. <i>Ángulo de contacto usando el plugin LB-ADSA</i>	39
Figura 11. <i>Ángulo de contacto usando el plugin DropSnake</i>	40
Figura 12. <i>Ángulo de contacto y tensiones interfaciales</i>	41
Figura 13. <i>Representación ecuación de Young</i>	43
Figura 14. <i>Representación de gota sésil</i>	44
Figura 15. <i>Textura de una superficie sólida</i>	47
Figura 16. <i>Corte del plano normal con un sólido</i>	48
Figura 17. <i>Topografía del material y perfil de rugosidad</i>	49
Figura 18. <i>Modelo de Wenzel</i>	51

Figura 19. <i>Representación del estado Cassie-Baxter</i>	52
Figura 20. <i>Representación del estado Cassie-Baxter donde el líquido no penetra en la rugosidad</i>	53
Figura 21. <i>Representación del estado de mojado según Kubiak</i>	54
Figura 22. <i>Extracción del parámetro RLO del perfil de rugosidad</i>	55
Figura 23. <i>Contacto efectivo entre el sólido y el líquido</i>	56
Figura 24. <i>Extracción del parámetro Rmr del perfil de rugosidad</i>	56
Figura 26. <i>Patrón de interferencia de una muestra de cobre lijado con lija de grano 120</i>	58
Figura 27. <i>Topografía 3D cobre lija 120</i>	59
Figura 28. <i>Microscopio por interferometría de luz blanca</i>	60
Figura 29. <i>Objetivo tipo Mirau</i>	60
Figura 30. <i>Esquema del montaje experimental</i>	61
Figura 31. <i>Comparación entre los sistemas ópticos no telecéntrico y telecéntrico</i>	63
Figura 32. <i>Diagrama de trayectoria de rayos en un sistema óptico telecéntrico y un sistema óptico no telecéntrico</i>	64
Figura 33. <i>Imagen formada por un sistema óptico telecéntrico y un sistema óptico no telecéntrico</i>	64
Figura 34. <i>Lente telecéntrica y cámara digital CMOS</i>	65
Figura 35. <i>Calibración horizontal</i>	66
Figura 36. <i>Calibración vertical</i>	67
Figura 37. <i>Campo de observación transversal del sistema óptico</i>	69
Figura 38. <i>Error por posicionamiento</i>	70
Figura 39. <i>Sistema de iluminación</i>	71

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN EL ÁNGULO DE CONTACTO	12
Figura 40. <i>Fotografía del balón</i>	72
Figura 41. <i>Fotografía del balón binarizada</i>	72
Figura 42. <i>Jeringa de insulina con sus partes</i>	73
Figura 43. <i>Sistema de inyección y sus partes</i>	74
Figura 44. <i>Embolo hule de la jeringa</i>	75
Figura 45. <i>Aguja sin punta</i>	75
Figura 46. <i>Sistema de inyección</i>	76
Figura 47. <i>Base del goniómetro</i>	77
Figura 48. <i>Sistema óptico telecéntrico para medir ángulo de contacto</i>	78
Figura 49. <i>Imágenes patrones de calibración</i>	79
Figura 50. <i>Construcción patrones de calibración</i>	80
Figura 51. <i>Ángulos de los patrones de calibración</i>	80
Figura 52 <i>Ángulos medidos de los patrones de calibración</i>	81
Figura 53. <i>Higrómetro</i>	82
Figura 54. <i>Topografía sustrato de Silicio</i>	83
Figura 55. <i>Formación de la gota sésil</i>	84
Figura 56. <i>Dosificación de una gota de 1 μL de agua Tipo I</i>	84
Figura 57. <i>Posicionamiento de la gota sobre la superficie</i>	85
Figura 58. <i>Gota sésil en equilibrio</i>	85
Figura 59. <i>Ubicación del punto triple usando la cruz guía del software ImageJ</i>	86
Figura 60. <i>Panel de software ImageJ usando el plugin DropSnake</i>	87
Figura 61. <i>Imagen gota sésil analizada con ImageJ</i>	88
Figura 62. <i>Esmeriladora manual de 4 estaciones</i>	90

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN EL ÁNGULO DE CONTACTO	13
Figura 63. <i>Probetas de aluminio</i>	90
Figura 64. <i>Componentes del ángulo de contacto</i>	91
Figura 65. <i>Sistema de rotación de las probetas para la medida de ángulo de contacto</i>	92
Figura 66. <i>Ubicación inicial de la probeta de aluminio</i>	93
Figura 67. <i>Rotación de la probeta de aluminio</i>	93
Figura 68. <i>Variación del perfil de la gota en función de la rugosidad superficial</i>	94
Figura 69. <i>Pares de ángulos de rotación</i>	95
Figura 70. <i>Influencia de la orientación superficial en el ángulo de contacto: representación en coordenadas polares</i>	98
Figura 71. <i>Índice de anisotropía de mojabilidad según nivel de rugosidad</i>	100
Figura 72. <i>Topografía aluminio tratado con lija 1500</i>	101
Figura 73. <i>Topografía aluminio tratado con lija 1200</i>	102
Figura 74. <i>Topografía aluminio tratado con lija 600</i>	103
Figura 75. <i>Topografía aluminio tratado con lija 120</i>	104
Figura 76. <i>Relación superficie de la probeta y región barrida del microscopio</i>	105
Figura 77. <i>Perfil de la gota sésil en comparación con el perfil de rugosidad obtenido con la región barrida del microscopio</i>	105
Figura 78. <i>Micrografía de la probeta Al-120 en MATLAB</i>	106
Figura 79. <i>Proceso de eliminación de los puntos aislados y puntos de discontinuidad</i>	107
Figura 80. <i>Rotación de la micrografía y trazado de múltiples cortes para extraer los perfiles de rugosidad en la dirección de rotación</i>	107
Figura 81. <i>Perfiles de rugosidad del Al-120 a 0°</i>	108

Figura 82. <i>Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 0°-180°)</i>	112
Figura 83. <i>Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 30°-210°)</i>	114
Figura 84. <i>Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 60°-240°)</i>	116
Figura 85. <i>Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 90°-270°)</i>	118
Figura 86. <i>Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 120°- 300°)</i>	120
Figura 87. <i>Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 150°- 330°)</i>	122

Resumen

Título: Evaluación teórico experimental de la influencia de la rugosidad en la medida de ángulo de contacto como característica fundamental de la fisicoquímica superficial*

Autor: Sergio Armando Celis Madrid y Silvia Alejandra Gómez Rodríguez**

Palabras Clave: Rugosidad, ángulo de contacto, mojabilidad

Descripción: La mojabilidad es una capacidad física de un líquido para extenderse sobre una superficie sólida. Esta mojabilidad se determina a partir de la magnitud física conocida como ángulo de contacto. El cálculo de esta magnitud de mojabilidad de los líquidos es relevante para diversos campos industriales e investigativos como la ciencia de materiales o la nanotecnología. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar la influencia de la rugosidad en la medida del ángulo de contacto para determinar el tipo de mojabilidad. De igual manera, se evalúan modelos matemáticos existentes, se diseña un sistema óptico y las probetas a condiciones de laboratorio, se mide el ángulo de contacto para el sistema agua-aluminio-vapor y se confrontan los valores experimentales obtenidos del montaje con el valor teórico del modelo de Kubiak. Metodológicamente, se realizan trabajos experimentales, en los que se diseña y se construye un sistema óptico y se realizan

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Programa de Física. Director: Jaime Enrique Meneses Fonseca. PhD. Ciencias (Óptica). Codirector: Diego Fernando Hernández Pardo. MSc. Ingeniería de Materiales.

pruebas con diferentes superficies rugosas de aluminio. Se obtuvo como resultado que la rugosidad influye en la medida del ángulo de contacto.

Abstract

Title: Theoretical and experimental evaluation of the influence of roughness on contact angle measurement as a fundamental characteristic of surface physicochemistry*

Author(s): Sergio Armando Celis Madrid y Silvia Alejandra Gómez Rodríguez

Key Words: Roughness, contact angle, wettability

Description: Wettability is the physical capacity of a liquid to spread over a solid surface. This wettability is determined from the physical quantity known as the contact angle. Calculating this wettability quantity for liquids is relevant to various industrial and research fields, such as materials science and nanotechnology. Therefore, the objective of this work is to analyze the influence of roughness on contact angle measurements to determine the type of wettability. Existing mathematical models are also evaluated, an optical system and test tubes are designed under laboratory conditions, the contact angle is measured for the water-aluminum-steam system, and the experimental values obtained from the setup are compared with the theoretical values of the Kubiak model. Methodologically, experimental work is carried out, in which an optical system

* Degree Work

**Faculty of Sciences. Department of Physics. Physics program. Director: Jaime Enrique Meneses Fonseca. PhD. Sciences (Optics). Codirector: Diego Fernando Hernández Pardo. MSc. Materials engineering.

is designed and built, and tests are performed on different rough aluminum surfaces. The result is that roughness influences contact angle measurements.

Introducción

Cuando entran en contacto dos fases de la materia, la superficie que las delimita se conoce como interfase. Los diferentes tipos de interfases se manifiestan en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Es así que pueden existir interfases de tipo gas-líquido, gas-sólido, líquido-líquido, líquido-sólido y sólido-líquido. En el momento que una gota de un fluido líquido entra en contacto sobre una superficie de un sólido (interfase sólido-líquido), la gota tiende a esparcirse en la superficie hasta una extensión que depende de las tensiones superficiales y/o energías superficiales de las fases presentes. Este fenómeno es conocido como *mojabilidad* y es de suma importancia porque permite entender la afinidad que existe entre un líquido y un sólido, es decir, hace referencia a la tendencia relativa de un fluido a adherirse a una superficie sólida (Michael & Williams, 1977).

Las propiedades fisicoquímicas de las fases actúan de tal manera que la gota adquiere una forma esférica (Michael & Williams, 1977; Cabello, 2009; Ravazzoli, 2019). En este proceso interviene fuertemente la energía superficial del sólido y la tensión superficial del líquido. Esto da como resultado lo que se conoce como *ángulo de contacto*, magnitud física relacionada con la mojabilidad cuyo valor depende principalmente de la relación entre las fuerzas adhesivas del líquido y del sólido y las fuerzas cohesivas del propio líquido (Hernández, 2014). Conocer el ángulo de contacto permite caracterizar las propiedades de mojabilidad en los materiales. Es así como esta medida se hace importante para campos industriales e investigativos.

Generalmente, debido a la importancia industrial del ángulo de contacto y a la calidad de los equipos empleados, estos instrumentos presentan un alto costo y, por ende, son de difícil

acceso. Adicionalmente, en la determinación del ángulo de contacto se emplea el modelo matemático de Young, que impone condiciones de planidad (Young,1805); es decir, aunque se estudia la interfaz sólido-líquido no se tiene en cuenta la rugosidad de la superficie. Estos equipos especializados reportan las propiedades de mojabilidad para el tipo de material sólido y el tipo de líquido. Conocer estas propiedades se torna sumamente relevante para la industria. Además de lo anterior, en muchas aplicaciones se debe tener en cuenta el acabado final del sólido, que afecta su apariencia visual, al ser mojado por un líquido. Inclusive líquidos hidrofóbicos se vuelven más hidrofóbicos cuando la superficie es más rugosa.

Actualmente, en el mercado, existen diversos equipos tecnológicos que se utilizan para la medición del ángulo de contacto tales como: Ramé-Hart instrument co. (2019), A. Krüss Optronic GmbH (2019), Kino Industry Co. LTD. (2019), Ossila Ltd. (2019). Estos están compuestos fundamentalmente por una cámara de alta resolución para tomar imágenes de la gota, una fuente de luz, un sistema de inyección en el cual se deposita la gota y un *software* especializado que permite el análisis de imágenes y la determinación del ángulo de contacto.

La revisión bibliográfica permite concluir que existen modelos matemáticos que incluyen la rugosidad en la medida del ángulo de contacto; sin embargo, es necesario analizar dichos modelos para determinar las condiciones experimentales que imponen, si se desean tener en cuenta en un dispositivo de medida apropiado. De esta manera, el presente trabajo de investigación se centra en la siguiente pregunta de investigación: *¿De qué manera un dispositivo ensamblado en condiciones de laboratorio permite evaluar experimentalmente modelos matemáticos para definir la mojabilidad teniendo en cuenta la rugosidad de la superficie?*

El dispositivo incluye procesamiento digital de imágenes que involucran corrección de distorsiones, calibración de la cámara y el uso de un objetivo telecéntrico. Este equipo

especializado es más económico que los comerciales y permite realizar mediciones con precisión que incluyen la rugosidad.

Se plantea un reto científico interesante: ¿Cómo adaptar una lente telecéntrica para adquirir imágenes que permita medir al ángulo de contacto? ¿Es posible corregir aberraciones ópticas y calibrar la cámara digital para obtener medidas precisas? A partir de diferentes rugosidades de superficies, ¿es posible confrontar experimentalmente los modelos matemáticos que tiene en cuenta la rugosidad?

Diversos campos industriales e investigativos exigen conocer las propiedades de mojabilidad de los líquidos en ciertas superficies específicas de interés. Por ejemplo, en los procesos de distribución y adhesión de pinturas y barnices, se hace necesario conocer el ángulo de contacto como característica física entre la pintura y la superficie sólida (Quére,2008). En la nanotecnología, se utiliza para el desarrollo de recubrimientos de dispositivos electrónicos como celulares o tabletas, con el fin de fabricarlos resistentes hasta cierto punto ante cualquier líquido que se derrame sobre ellos (Wu,2017). En la absorción de crudo, resultado de derrames petroleros en el mar, se emplea para desarrollar un material que permita la separación de contaminantes oleosos vertidos accidentalmente en mares y océanos (Abdallah et al.,2007). Otros campos de aplicación son en la medicina, en el transporte de líquidos sin pérdidas, en la biología (efecto loto y efecto pétalo de rosa), en la ciencia de materiales, entre otros usos (Adamson & Gast, 1977; Jung & Bhushan,2006). De manera que la medición del ángulo de contacto permite el desarrollo planificado de métodos óptimos en la industrialización.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar y validar un sistema óptico para la medición de ángulos de contacto en el sistema sólido-líquido (aluminio-agua) con diferentes rugosidades.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los modelos matemáticos que permiten evaluar el ángulo de contacto y tienen en cuenta la rugosidad de la superficie.
- Diseñar e implementar un sistema óptico telecéntrico que permita medir el ángulo de contacto.
- Evaluar el modelo matemático de Kubiak para la determinación del ángulo de contacto del sistema aluminio-agua teniendo como variable la rugosidad del aluminio.

Conceptos básicos de la fisicoquímica de superficies

En este capítulo se presentan definiciones importantes para el entendimiento de algunos fenómenos superficiales, sus características y propiedades que determinan cómo las superficies interactúan con su entorno.

La fisicoquímica de superficies hace referencia al estudio de fenómenos químicos y físicos que ocurren en las interfases como sólido-líquido, sólido-gas o líquido-gas. En este trabajo se enfatiza un sistema donde interactúan tres fases aluminio, agua y vapor, asumiendo una superficie ideal, es decir, no reactiva y químicamente homogénea.

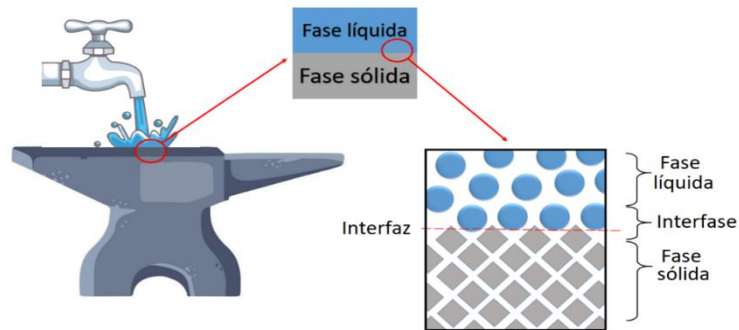
1.1 Fases e interfases

Una *fase*, en termodinámica, se entiende como un estado específico de la materia dentro de un sistema caracterizado por presentar propiedades físicas y químicas uniformes. Esto es, una región homogénea de un sistema en el que todas las partículas (átomos, moléculas, iones) tienen las mismas propiedades termodinámicas, como temperatura, presión y composición química.

Cuando dos fases se encuentran en contacto, la región que las delimita se conoce como *interfase*. Para indicar su ubicación se describe mediante una superficie llamada *interfaz* (Figura 1) por lo que, a partir de ahora esta última se tratará como la superficie imaginaria de separación y a la interfase como la región tridimensional de transición (Rodríguez, 2010)

Figura 1

Diagrama de fuerzas de dos moléculas en un líquido.



Nota. El gráfico representa dos fases compuestas por partículas diferentes representadas por rombos grises moléculas del sólido y por círculos azules moléculas del líquido.

1.2 Clasificación de las interfases.

En los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso, se pueden observar diferentes clases de interfases (Jódar, 2006). Es así que pueden existir de tipo fijas: sólido – sólido; rígidas: sólido – líquido y sólido – gas y las flexibles: líquido – líquido (inmiscibles) y líquido – gas.

Tabla 1

Clasificación de las interfases.

Medios	Tipo de interfaz	Ejemplo
Sólido – sólido	Fija	Soldaduras
Sólido – líquido	Rígida	Fondo de una piscina
Sólido – gas	Rígida	Superficie de una mesa
Líquido – líquido (no miscibles)	Flexible	Agua y aceite
Líquido – gas	Flexible	Superficie de un lago
Líquido – líquido (miscibles)	Inexistente	Agua y alcohol
Gas – gas	Inexistente	Aire y vapor de agua

Nota. Clasificación de los tipos de interfaces. Adaptado de *Gea Jódar, P. M. (2006). Mojado en condiciones de no-equilibrio sobre superficies reales.*

Las interfases flexibles tienden a deformarse y se adaptan modificando su área, las fijas pueden modificar su área y las rígidas son invariantes a su forma, son capaces de cambiar su extensión. En los capítulos 0 y 0, se estudia la extensión de las interfases rígidas en un sistema compuesto por tres medios (uno sólido y dos fluidos no miscibles).

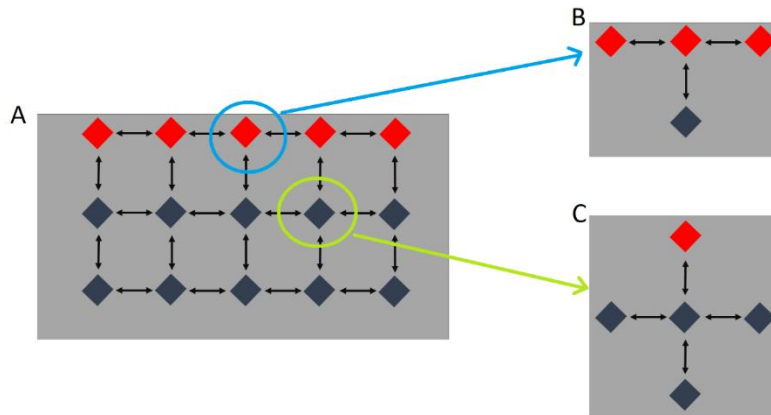
1.3 Energía interfacial

La energía interfacial ocurre debido a la energía potencial que tienen las moléculas cercanas a la superficie, causada por las fuerzas de cohesión con sus vecinas. Dada la naturaleza de corto alcance de los potenciales, la interacción entre moléculas lejanas se considera despreciable. Se expresa en unidades de $\frac{J}{m^2}$ (S.I), lo que la define como una densidad superficial de energía (Lyklema, 2005).

Se supone un sólido compuesto por moléculas idénticas (ver Figura 2) las moléculas que están presentes en la superficie (color rojo) tienen solo tres moléculas vecinas. En cambio, las moléculas que están situadas al interior del sólido (color gris) tienen cuatro moléculas vecinas. Esto quiere decir que una molécula en la superficie del sólido está unida con solo un 75 % de la energía de unión de una molécula del interior. El excedente de energía que poseen las moléculas superficiales se denomina *energía libre superficial* o *energía interfacial*.

Figura 2

Material sólido formado por moléculas o átomos modelados como rombos.



Nota. El gráfico representa un material sólido formado por moléculas o átomos modelados como rombos, los rombos rojos serán las moléculas o átomos de la superficie del material; B) moléculas o átomos vecinos en la superficie del material; C) moléculas o átomos vecinos al interior del material.

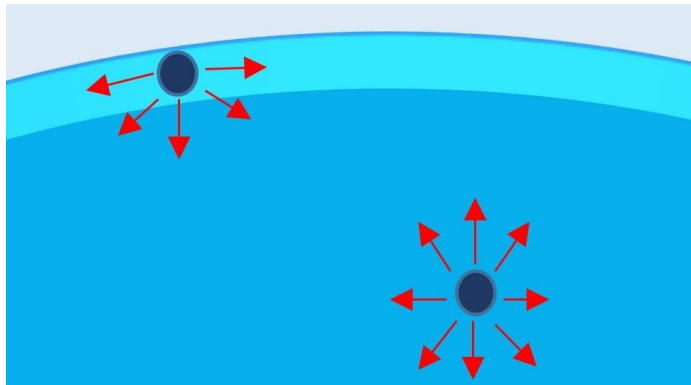
1.4 Tensión interfacial

Es un fenómeno físico que ocurre en interfases líquido-líquido, líquido-sólido o sólido-vapor, se debe a las diferencias en las fuerzas de atracción intermolecular entre las moléculas de las dos fases adyacentes (Figura 3). Las moléculas en el interior de cada fase están rodeadas por moléculas similares y experimentan fuerzas de atracción en todas direcciones. Sin embargo, las moléculas en la interfase experimentan fuerzas desequilibradas, ya que las moléculas de la otra fase pueden tener una intensidad de atracción diferente. Esta diferencia genera una energía extra en la superficie. Por lo tanto, surge una resistencia al aumento de la región interfacial, manifestada como la fuerza de tensión interfacial o superficial.

Esta propiedad cobra relevancia al estudiar la forma que adoptan las interfases, ya que su comportamiento depende del estado fisicoquímico de sus componentes. Las de tipo sólido-líquido y sólido-fluido presentan una mayor rigidez estructural, en cambio, la de clase líquido-fluido tienden a deformarse con mayor facilidad obteniendo así una configuración esférica. En términos generales, actúa como una fuerza que busca reducir la relación área-volumen siendo la esfera la superficie de mínima área que encierra el mayor volumen. Se representa con la letra griega gamma (γ), es una magnitud física que expresa la fuerza ejercida por unidad de longitud sobre una interfaz, y sus unidades en el Sistema Internacional son newtons por metro (N/m).

Figura 3

Diagrama de fuerzas de dos moléculas en un líquido.



Nota. La imagen representa Diagrama de fuerzas de dos moléculas en un líquido, una molécula al interior y otra en la superficie del líquido.

Desde una perspectiva termodinámica, el carácter espontáneo de los procesos está condicionado por la energía de Gibbs (G), cuyo cálculo debe incluir necesariamente el trabajo asociado a la variación de área superficial, expresado como $dW = \gamma dA$. A nivel macroscópico, todo sistema exhibe una tendencia natural a disminuir su área superficial. En un sistema cerrado

donde el número de moléculas permanece constante $dN_i = 0$, la primera ley de la termodinámica define la variación de la energía interna (dU), en términos del calor (δQ), y el trabajo (dW), conforme a la siguiente expresión

$$dU = \delta Q + dW \quad (1)$$

la variación del calor en un proceso reversible se describe en función de la entropía mediante

$$\delta Q = T dS \quad (2)$$

considerando que las únicas formas de trabajo son de frontera (presión-volumen) y de tensión superficial, y tomando en cuenta el área superficial, se obtiene:

$$dW = -P dV + \gamma dA \quad (3)$$

sustituyendo (2) y (3) en (1), se obtiene la variación de la energía

$$dU = T dS - P dV + \gamma dA \quad (4)$$

asimismo, considerando cómo se define la energía de Gibbs donde H es la entalpía y T es la temperatura absoluta, se tiene que

$$G = H - TS \quad (5)$$

$$H = U + PV$$

$$G = U + PV - TS$$

el cambio en la energía de Gibbs corresponde a

$$dG = dU + P dV + V dP - T dS - S dT \quad (6)$$

sustituyendo (4) en (6), el cambio en la energía de Gibbs es

$$dG = V dP - S dT + \gamma dA \quad (7)$$

si la temperatura (T) y la presión (P) permanecen constantes, $dP = 0$ y $dT = 0$, se obtiene

$$dG = \gamma dA \quad (8)$$

de lo anterior, se define el coeficiente de tensión superficial como

$$\gamma = \left(\frac{dG}{dA} \right)_{P,T} > 0 \quad (9)$$

La tendencia espontánea de las superficies interfaciales a contraerse se fundamenta en si $\gamma > 0$, $dA < 0$ implica $dG < 0$, lo que significa que, al incrementarse el área interfacial, también lo hace la energía de Gibbs. Por consiguiente, la condición de equilibrio (P y $T = cte$), se satisface cuando el sistema minimiza su área, pues la energía de Gibbs debe alcanzar su valor mínimo.

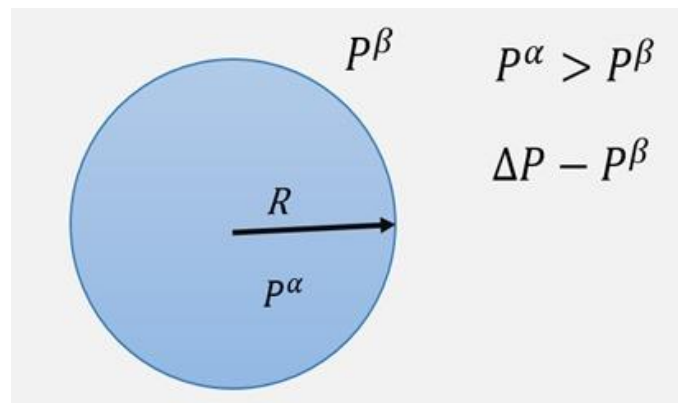
A pesar de que los términos energía interfacial y tensión interfacial no describen exactamente la misma propiedad física (Gray,1965), en numerosos textos científicos es común encontrarlos sin ninguna distinción (Adamson,1997) debido a que ambos son matemáticamente equivalentes, es decir, $\frac{J}{m^2} \equiv \frac{N}{m}$.

1.5 Ecuación de Young – Laplace

La ecuación de Young-Laplace, que se conoce como la ley de Laplace, describe cómo la presión varía a través de una superficie curva que separa dos fluidos (ver Figura 4).

Figura 4

Superficie que separa dos fluidos.



Nota. En esta imagen se muestra la superficie que separa dos fluidos, adquiriendo un radio de curvatura debido a la diferencia entre la presión externa e interna, P^α y P^β presiones de cada fase y R el radio de curvatura.

En el presente análisis se considera un sistema compuesto por dos fases, líquido y aire. A partir de la variación de la energía de Helmholtz, manteniendo la temperatura constante y asumiendo volumen total constante, es posible obtener la ecuación de Young-Laplace.

Donde:

dF → Variación de energía de Helmholtz

P^α y P^β → Presiones de cada fase

dV^α y dV^β → Variación de volumen

γ → Tensión superficial del fluido líquido

dA → Variación del área superficial

$$dF = -P^\alpha dV^\alpha - P^\beta dV^\beta + \gamma dA \quad (10)$$

Asumiendo que el sistema está en una condición de equilibrio termodinámico, entonces

$$dF = 0 \quad (11)$$

Reemplazando (10) en (11) se tiene

$$P^\alpha dV^\alpha + P^\beta dV^\beta = \gamma dA \quad (12)$$

El incremento de volumen de una fase implica el decremento de volumen de la otra, de modo que

$$dV^\beta = -dV^\alpha \quad (13)$$

Sustituyendo (13) en (12) se obtiene

$$P^\alpha dV^\alpha - P^\beta dV^\alpha = \gamma dA \quad (14)$$

Haciendo uso del algebra

$$(P^\alpha - P^\beta) dV^\alpha = \gamma dA$$

$$dV^\alpha = dV \quad (15)$$

$$\Delta P dV = \gamma dA$$

$$\Delta P = \gamma \frac{dA}{dV}$$

Los diferenciales de volumen y área para una esfera de radio R son

$$dV = 4\pi R^2 dR \quad (16)$$

$$dA = 8\pi R dR$$

Reemplazando (16) en (15) se llega a

$$\Delta P = \gamma \frac{8\pi R dR}{4\pi R^2 dR} \quad (17)$$

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R}$$

La ecuación (17) corresponde a la ecuación de Young-Laplace sin gravedad o ecuación de Young-Laplace para la condición esférica.

1.5.1 Ecuación de Young – Laplace bajo campo gravitacional.

Sin la presencia de un campo externo, la superficie adopta una forma esférica. Sin embargo, al considerar la influencia de un campo externo, como el gravitacional, esta superficie esférica se deforma. Esto ocurre porque el radio de curvatura varía en cada punto debido a la presión hidrostática. Al introducir el término de presión hidrostática en la ecuación de Young-Laplace (ecuación (17)) resulta que la diferencia de presiones está dada por

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} + \rho g y \quad (18)$$

Conceptos y modelos aplicados al mojado de superficies ideales

Los principios fundamentales de la teoría clásica que explican fenómenos superficiales como la capilaridad, la mojabilidad, la adsorción y la adhesión fueron establecidos por Thomas Young y Pierre Simon Laplace a comienzos del siglo XIX. Aunque han transcurrido más de dos siglos desde sus publicaciones (Young, 1805; Laplace, 1806), el estudio de los fenómenos de

superficie sigue siendo relevante en la actualidad, debido a su amplia aplicabilidad en campos diversos como la ciencia de materiales y la biología (De Gennes et al., 2004).

1.6 Superficie ideal

Una superficie ideal es un concepto teórico utilizado para simplificar el estudio de los fenómenos interfaciales. Se entiende como una superficie perfectamente continua y suave, sin discontinuidades ni deformaciones. Posee una estructura cristalina perfecta y una composición homogénea, careciendo de rugosidad e imperfecciones. Además, no presenta adsorción de moléculas, no reacciona químicamente con el entorno, no forma compuestos con otros materiales y permanece inalterable sin presentar cambios de fase. Este modelo idealizado permite analizar propiedades interfaciales sin la influencia de factores externos.

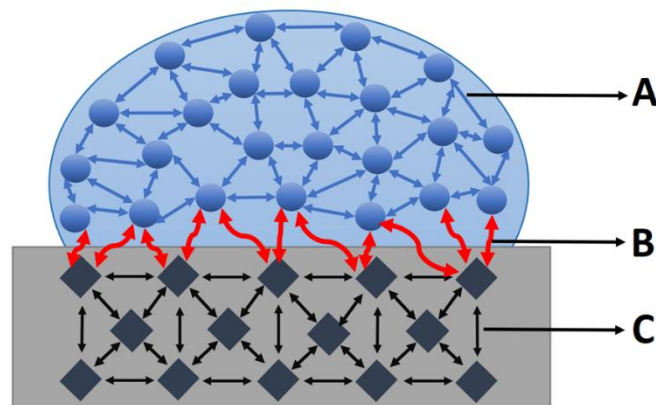
1.7 Mojabilidad

Se define la mojabilidad como la propiedad que posee un líquido de expandirse y desplazarse sobre una superficie sólida, dejando sobre él una traza (Akal,1992). El estudio del Mojado se enfoca en los fenómenos que ocurren en la interfaz de sistemas termodinámicos con tres fases, tal como se ilustra en la Figura 5. Este comportamiento ocurre cuando las fuerzas de atracción entre el sólido y el líquido (adhesión) superan a las fuerzas internas del propio líquido (cohesión), permitiendo que el líquido se extienda con facilidad sobre la superficie del sólido. En cambio, si la cohesión es más fuerte, el líquido formará gotas y evitará extenderse. Factores como la composición química, la rugosidad del material y la temperatura pueden influir en este comportamiento. La mojabilidad tiene importantes implicaciones en diversos campos como la adhesión, el recubrimiento, la impresión, la fabricación de dispositivos biomédicos y la ciencia de

materiales, donde un control preciso de este fenómeno mejora la eficiencia y calidad de los productos.

Figura 5

Sistema de Mojado

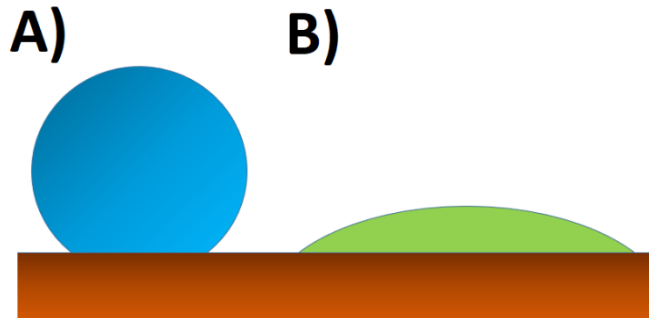


Nota. En esta imagen se muestra una gota sobre un sólido, en donde se señala; A) fuerzas de cohesión entre moléculas del líquido; B) fuerza de adhesión entre moléculas del líquido y el sólido; C) fuerzas de cohesión entre moléculas del sólido.

La Figura 6 muestra la comparación de la mojabilidad entre diferentes fluidos. Se observa que el fluido A tiene una mojabilidad muy baja, lo que indica que tiende a formar gotas y no se extiende fácilmente sobre la superficie. En contraste, el fluido B presenta una mojabilidad mucho mayor, lo que significa que se esparce con facilidad, cubriendo una mayor área de contacto. Esta diferencia radica en cómo interactúan las fuerzas cohesivas del líquido y las adhesivas que actúan entre el líquido y la superficie sólida.

Figura 6

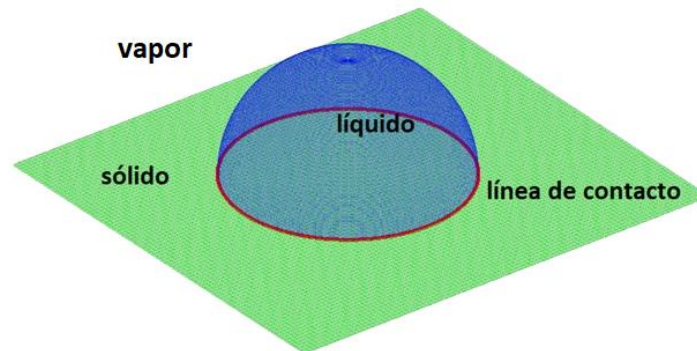
Mojado de superficie por dos gotas de líquidos diferentes



Nota. En esta imagen se muestra dos gotas de diferentes líquidos sobre un sólido, en donde se señala; A) este líquido presenta un mojado deficiente sobre la superficie; B) el líquido presenta un mojado total sobre la superficie.

1.8 Gota sésil

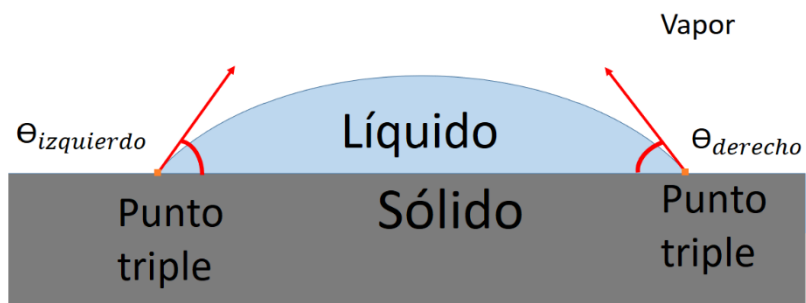
Una gota sésil representa una pequeña cantidad de líquido que reposa sobre una superficie sólida, se encuentra en equilibrio con el medio ambiente y no tiene movimiento aparente, su forma obedece a la ecuación de Young-Laplace permitiendo analizar el comportamiento del líquido frente al sólido, indicando la calidad de adhesión o repulsión existente. Además, describe un sistema formado por tres fases (ver Figura 7): sólida representa la superficie donde la gota se sitúa; líquida constituida por la propia gota y vapor que corresponde al medio que rodea la gota. Estas fases interactúan en una región conocida como línea de contacto o punto triple, donde coexisten formando tres tipos de interfaces: sólido-líquido es la zona en la que el líquido entra en contacto con la superficie del sólido, líquido-vapor corresponde a la superficie de la gota y sólido-vapor describe la superficie del sólido sin mojar.

Figura 7*Gota sésil*

Nota. gota sésil sobre superficie lisa, en la imagen se muestran las tres fases presentes y la línea de contacto de las tres fases.

1.9 Ángulo de contacto


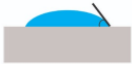

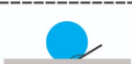
Se define como el ángulo que se forma en el punto donde una gota de líquido toca una superficie sólida, medido entre la tangente a la superficie de la gota y la superficie del sólido en el punto triple. Este ángulo, usualmente denotado por θ , proporciona información crucial sobre la mojabilidad de una superficie por un líquido (ver Figura 8).

Figura 8*Ángulo de contacto*

1.9.1 Interpretación de los valores del ángulo de contacto:

- $\theta < 90^\circ$ (Mojado parcial o hidrofílico): Las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido son más fuertes que las fuerzas cohesivas dentro del líquido. El líquido tiende a extenderse sobre la superficie. Cuanto menor sea el ángulo, mejor será el mojado.
- $\theta \approx 90^\circ$ (Mojado intermedio): Las fuerzas adhesivas y cohesivas están relativamente equilibradas.
- $\theta > 90^\circ$ (Mojado parcial o hidrofóbico): Las fuerzas cohesivas dentro del líquido son más fuertes que las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido. El líquido tiende a formar una gota y minimizar su contacto con la superficie.
- $\theta \approx 180^\circ$ (Mojado muy pobre o superhidrofóbico): El líquido prácticamente no moja la superficie y forma una esfera casi perfecta.

Figura 9*Ángulo de contacto de líquidos sobre superficies*

Super-hidrófilo	$\theta < 10^\circ$	
Hidrófilo	$10^\circ < \theta < 90^\circ$	
Hidrófobo	$90^\circ < \theta < 120^\circ$	
Super-hidrófobo	$\theta > 120^\circ$	

Nota. El gráfico representa el tipo de superficies con su respectivo ángulo de contacto Atria Innovation. (2016, octubre 24). Superficies funcionales. <https://www.atriainnovation.com/que-es-el-angulo-de-contacto>.

1.9.2 Evolución en la medición del ángulo de contacto: de Young al procesamiento digital de imágenes.

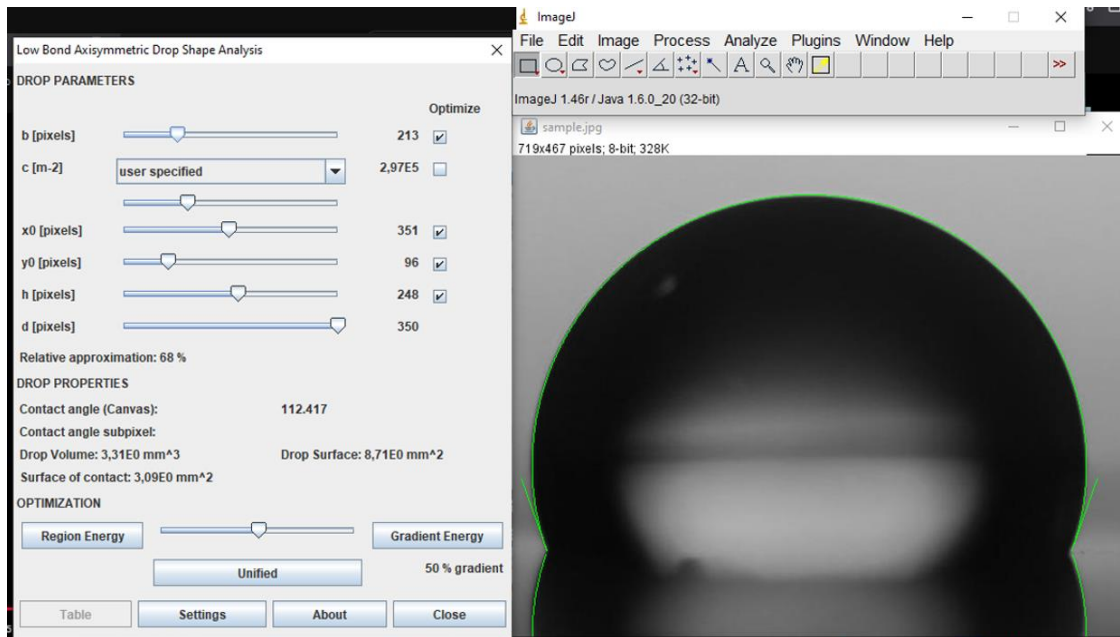
Desde hace más de 200 años, el análisis del ángulo de contacto ha despertado un interés constante en el campo de la ciencia de superficies. Uno de los pioneros en la investigación de este fenómeno, Young, empleaba instrumentos sencillos como transportadores o escalas graduadas para determinar el ángulo que formaba una gota líquida sobre un material sólido. A lo largo del tiempo, surgieron métodos más sofisticados, basados en principios geométricos y asumiendo que la gota tenía una forma esférica o parte de una esfera. Con el desarrollo de la tecnología digital, la medición del ángulo de contacto ha mejorado notablemente gracias al procesamiento de imágenes, permitiendo análisis más precisos. Actualmente, se emplean herramientas como ImageJ, un software de código abierto de uso común en la ciencia y la academia, que cuenta con

complementos especializados para la medición del ángulo de contacto, como LB-ADSA y DropSnake, los cuales permiten realizar análisis detallados de gotas con diferentes características.

El complemento Low Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis (LB-ADSA) se emplea principalmente para analizar gotas axisimétricas y funciona mediante la ecuación de Young-Laplace. La forma de la gota puede ser ajustada con precisión por este método, el cual se basa en cinco variables principales: b , x , y , h y d . Para lograr un análisis detallado, primero se ajustan las coordenadas x y y para alinear la parte superior de la curva generada con el punto más alto de la gota real. Luego, se modifica la variable b para ajustar el ancho de la gota y se afina nuevamente la posición con x y y . Posteriormente, la variable h se ajusta para que la forma de la gota coincida exactamente con los puntos trifásicos en la imagen. Finalmente, la variable d permite recortar el reflejo de la gota si es necesario, aunque esto no afecta significativamente los resultados. Una vez completado el ajuste, la forma de la gota en la imagen se superpone a la solución de la ecuación de Young-Laplace, permitiendo alcanzar valores precisos del ángulo de contacto.

Figura10

Ángulo de contacto usando el plugin LB-ADSA



Nota. Captura de pantalla del uso del plugin LB-ADSA, mostrando el análisis aplicado a una imagen de calibración incluida en el programa. Como resultado, se obtuvo un ángulo de contacto de 112.417° , coincidiendo con el valor esperado.

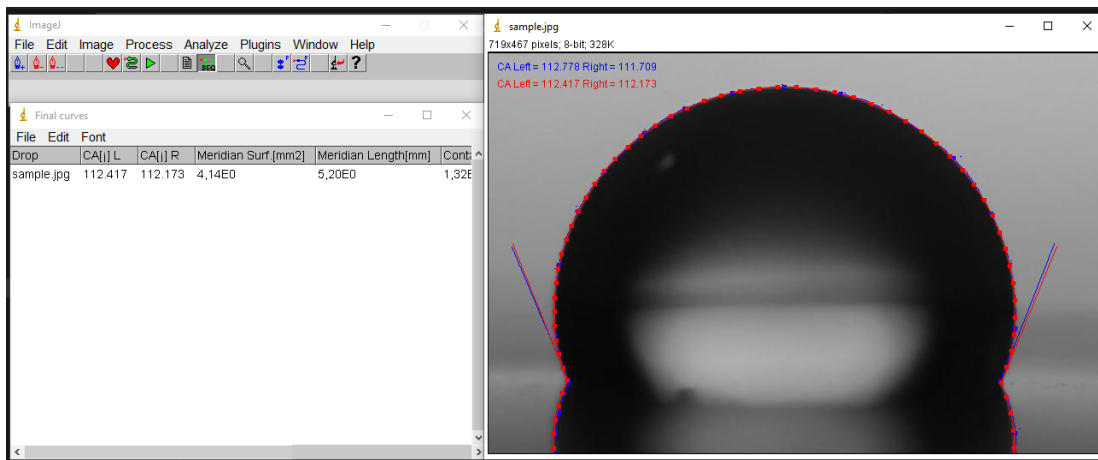
Por otro lado, el complemento DropSnake es ideal para analizar gotas de geometría irregular o no axisimétricas, ya que no asume ninguna forma predeterminada. La obtención del ángulo de contacto en este método se realiza mediante una técnica de ajuste polinómico por tramos.

Lo que permite una gran precisión en superficies inclinadas o en gotas en contacto con agujas de jeringa. El proceso comienza con la colocación de siete nodos a lo largo del contorno de la gota, iniciando en el punto trifásico inferior izquierdo y siguiendo en sentido horario hasta llegar al punto trifásico inferior derecho. Tras colocar el último nodo, un doble clic en la imagen finaliza

la definición del borde de la gota, generando una curva azul en forma de "serpiente" que se ajusta a su contorno. Posteriormente, se genera una curva roja con un mayor número de nodos para mejorar la precisión del ajuste. Una inspección detallada de la curva es esencial, ya que si el complemento no identifica correctamente los puntos trifásicos, es posible modificar las configuraciones predeterminadas en las preferencias del software. Gracias a este método, DropSnake permite realizar mediciones precisas incluso en condiciones donde otros métodos podrían fallar.

Figura 11

Ángulo de contacto usando el plugin DropSnake



Nota. Captura de pantalla del uso del plugin DropSnake, mostrando el análisis aplicado a una imagen de calibración incluida en el programa. Como resultado, se obtuvo un ángulo de contacto de 112.417° , coincidiendo con el valor esperado.

1.10 Ecuación de Young

La ecuación de Young describe la condición de equilibrio para el ángulo de contacto θ en la interfaz donde un líquido, un vapor y una superficie sólida se encuentran. Fue formulada por

Thomas Young en 1805 y describe la relación del ángulo de contacto con las tensiones interfaciales entre las tres fases (ver Figura 12).

$$\gamma_{LV} \cos \theta_Y = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (19)$$

Donde,

γ_{sv} → Energía superficial sólido – vapor

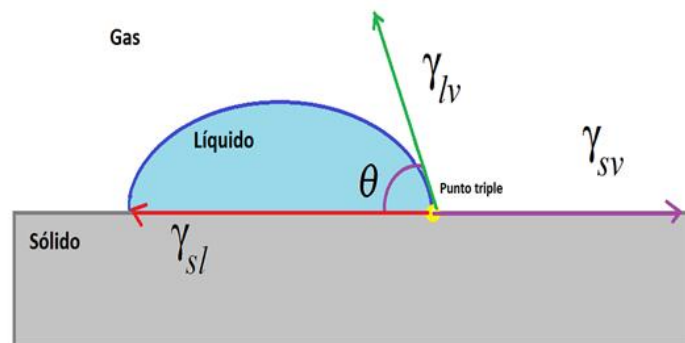
γ_{sl} → Tensión interfacial sólido – líquido

γ_{lv} → Tensión interfacial líquido – vapor

θ_Y → Ángulo de contacto medido a través de la fase líquida en el punto triple

Figura 12

Ángulo de contacto y tensiones interfaciales



Nota. Representación de las tensiones interfaciales presentes en una gota sésil sobre una superficie ideal.

La ecuación de Young se aplica estrictamente a superficies sólidas ideales que son perfectamente lisas, rígidas y químicamente homogéneas. Las superficies reales a menudo presentan rugosidad y heterogeneidad (ver capítulo 0).

Se ha elaborado una detallada deducción de la ecuación de Young desde una perspectiva termodinámica (atendiendo a la segunda ley de la termodinámica). En el proceso de derivación, se parte de las siguientes suposiciones: en primer lugar, se asume que la superficie es ideal, es decir,

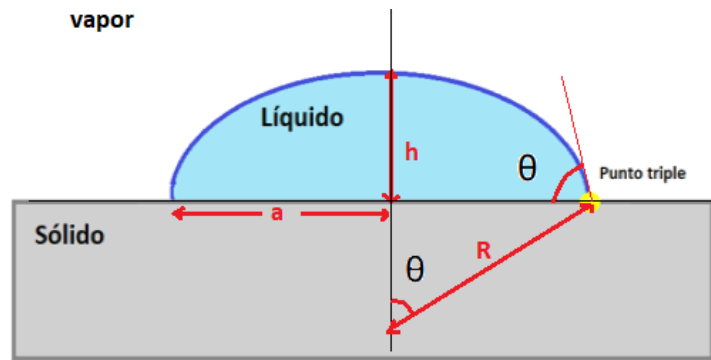
rígida, plana, insoluble, químicamente homogénea y suave, sin histéresis en el ángulo de contacto, permitiendo que la línea de contacto se desplace libremente. En segundo lugar, se considera que, en condiciones de gravedad cero, la forma de la gota en la superficie toma la forma de un casquete esférico, pues esta configuración minimiza la interfaz para lograr una mayor estabilidad.

Partiendo de la definición de energía de Helmholtz

$$\left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)_{T,n} = \gamma \quad (20)$$

En el sistema gota-sólido-vapor, están presentes las tres tensiones interfaciales, para cada una de ellas existe un cambio de área respectivamente, por tanto, la ecuación (10) se puede escribir de la siguiente manera

$$dF = \gamma_{SL}dA_{SL} + \gamma_{SV}dA_{SV} + \gamma_{LV}dA_{LV} \quad (21)$$

Figura 13*Representación ecuación de Young*

Para hallar cada diferencial de área dA , se parte del área de un casquete esférico

$$A = \pi (a^2 + h^2) \quad (22)$$

Derivando la ecuación (10) respecto al radio r o la altura h según sea el caso:

Tensión interfacial sólido-líquido, está delimitada por el radio a

$$\frac{dA_{SL}}{da} = 2\pi a \quad (23)$$

$$dA_{SL} = 2\pi a da$$

La tensión interfacial del sólido-vapor es la energía superficial del sólido y su diferencial de área es igual, pero de signo opuesto al diferencial de área de la interfaz sólido-líquido

$$\frac{dA_{SV}}{da} = -2\pi a \quad (24)$$

$$dA_{SV} = -2\pi a da$$

Por último, se tiene el diferencial de área líquido-vapor

$$dA_{LV} = 2\pi(a da + h dh) \tag{25}$$

Se expresa h y dh en términos de da , usando el volumen de casquete esférico

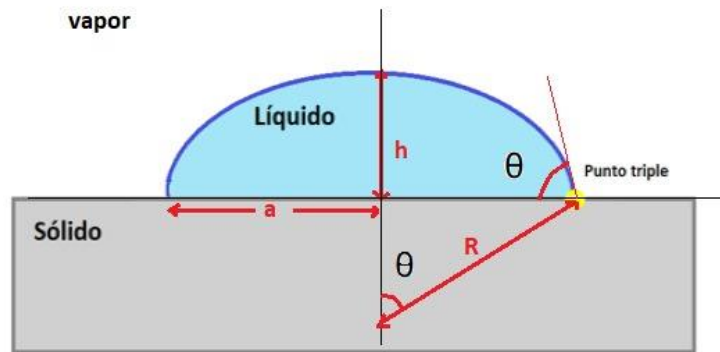
$$V = \frac{\pi}{6}(3a^2h + h^3) \tag{26}$$

El volumen del casquete esférico es constante, por tanto, $dV = 0$

$$dV = \frac{\pi}{2}(2ahda + (a^2 + h^2)dh) = 0 \tag{27}$$

Figura14

Representación de gota sésil



Haciendo uso del teorema de Pitágoras se tiene

$$R^2 = a^2 + (R - h)^2 \tag{28}$$

$$a^2 + h^2 = 2Rh$$

Reemplazando (28) en (27) se obtiene

$$dV = \frac{\pi}{2}(2ahda + 2Rh dh) = 0 \tag{29}$$

Despejando dh de (29)

$$dh = -\frac{a}{R} da \quad (30)$$

Reemplazando (30) en (25)

$$dA_{lv} = 2\pi \left(ada - \frac{a}{R} hda \right)$$

$$dA_{lv} = 2\pi ada \left(1 - \frac{h}{R} \right) \quad (31)$$

$$dA_{lv} = 2\pi ada \left(\frac{R-h}{R} \right)$$

$$dA_{lv} = 2\pi ada (\cos \theta)$$

Reemplazando (24), (25) y (31) en (21) se llega a

$$dF = \gamma_{sl}(2\pi a da) - \gamma_{sv}(2\pi a da) + \gamma_{lv}(2\pi ada(\cos \theta)) \quad (32)$$

$$dF = 2\pi ada (\gamma_{sl} - \gamma_{sv} + \gamma_{lv}(\cos \theta))$$

En el equilibrio

$$\frac{dF}{dA} = 0 \quad (33)$$

$$\frac{dF}{dA} = 2\pi (\gamma_{sl} - \gamma_{sv} + \gamma_{lv}(\cos \theta)) = 0$$

Por lo tanto, despejando de la ecuación (33), se llega a la ecuación de Young

$$\gamma_{lv}(\cos \theta) = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (34)$$

Conceptos y modelos aplicados al mojado de superficies reales

El estudio del mojado en superficies reales representa un desafío más complejo que en superficies ideales. Factores como la rugosidad, la heterogeneidad química y las imperfecciones estructurales influyen directamente en la forma en que un líquido se adhiere, se extiende o se retrae sobre un sólido. Estas características intrínsecas tienen un impacto significativo en fenómenos como el mojado, la adhesión y la fricción, desviando su comportamiento de las predicciones basadas en modelos idealizados. Comprender y caracterizar estas imperfecciones superficiales es crucial para la aplicación práctica de los principios de la ciencia de superficies en el mundo real.

1.11 Superficies reales

Desde el punto de vista fisicoquímico, una superficie real es aquella que presenta irregularidades estructurales y químicas en contraste con una superficie ideal, que se asume perfectamente lisa y homogénea. En la realidad, las superficies poseen textura, lo que afecta su adhesión y mojabilidad, así como heterogeneidad química, debido a variaciones en la composición o la presencia de adsorbatos del entorno, como agua u oxígeno. Además, pueden presentar defectos estructurales como dislocaciones, poros, lo que influye en su reactividad química.

1.12 Textura

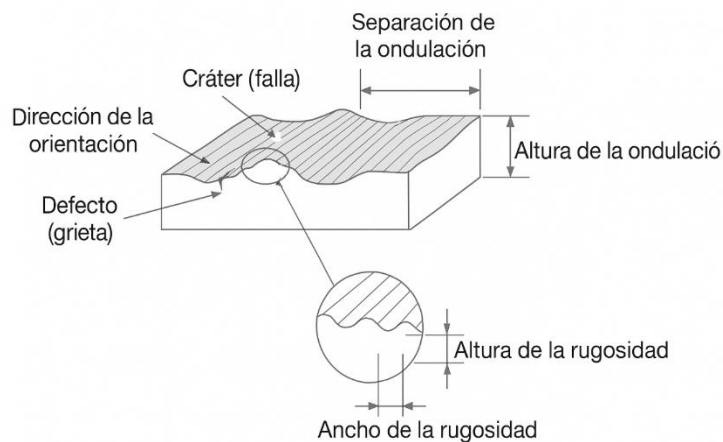
La textura de una superficie sólida se caracteriza por cuatro aspectos fundamentales que son:

- **Rugosidad superficial:** hace referencia a pequeñas variaciones microgeométricas con respecto a la superficie nominal, las cuales están muy próximas entre sí y dependen tanto del material como de los procesos de fabricación utilizados.

- **Ondulación:** se define como desviaciones macrogeométricas más amplias, que pueden originarse por deformaciones del material, vibraciones, tratamientos térmicos u otros factores.
- **Orientación:** depende del procedimiento de fabricación utilizado y define su dirección característica.
- **Fallas:** corresponden a irregularidades ocasionales que pueden manifestarse en forma de grietas, rayaduras, inclusiones u otros defectos en la superficie.

Figura 15

Textura de una superficie sólida.



Nota. Rugosidad, ondulación, orientación y fallas. Estos elementos pueden identificarse con claridad en la figura.

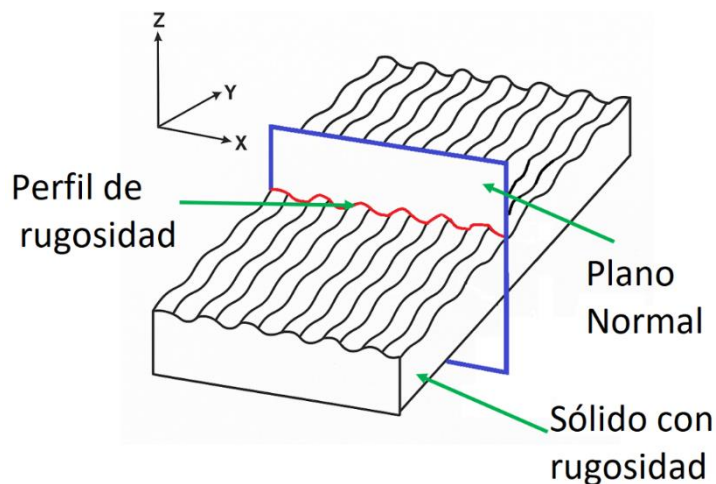
En este trabajo, el enfoque principal es la rugosidad superficial, por lo tanto, no se abordará en detalle los demás elementos que conforman la textura. No obstante, es importante destacar que todos estos elementos están interconectados.

1.12.1 Rugosidad Superficial

La rugosidad superficial es una medida de las irregularidades presentes en una superficie, su caracterización se hace mediante el estudio del perfil de rugosidad que corresponde a la curva de intersección entre un plano normal y un sólido.

Figura 16

Corte del plano normal con un sólido

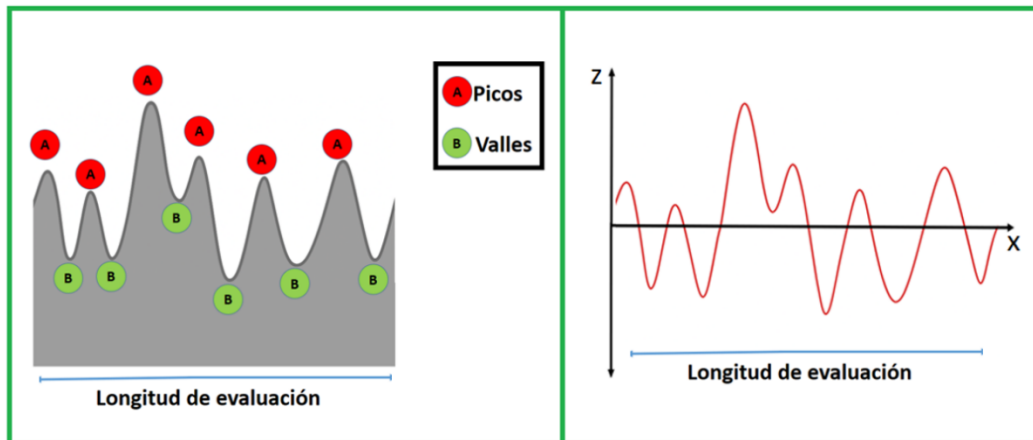


1.12.1.1 Perfil de rugosidad

Es una curva en la que el eje vertical representa la altura de los picos de la topografía del material, mientras que el eje horizontal indica la longitud de evaluación del perfil. Esta longitud corresponde a una línea recta que puede trazarse en cualquier dirección sobre la superficie del material (ver Figura 17).

Figura 17

Topografía del material y perfil de rugosidad



Nota. Al lado izquierdo se representa un corte de la topografía del material y su respectivo perfil de rugosidad.

La norma ISO 4287 presenta los parámetros más comunes que definen la rugosidad en una superficie y son:

- **R_a** : Desviación media aritmética de los valores absolutos de las alturas comprendidas en la longitud de muestreo.
- **R_z** : Suma de la máxima altura de pico y la máxima profundidad de valle.
- **Curva de Abbott – Firestone**: esta curva representa la tasa de material del perfil en función del nivel.

1.13 Modelos teóricos

Con el fin de abordar la rugosidad, se han establecido algunos modelos teóricos que describen ángulos de contacto para diferentes situaciones, entre ellos están:

1.13.1 Modelo de Wenzel

El objetivo del estudio de Wenzel fue determinar la influencia de la rugosidad superficial en el ángulo de contacto estático. Observó que la rugosidad hace que un fluido hidrofóbico se comporte como si fuese más hidrofóbico y un fluido hidrofílico como si fuese más hidrofílico (Whyman et al., 2008; Wenzel, 1936 & De Gennes et al., 2004).

En una superficie rugosa y químicamente homogénea, el ángulo de contacto aparente está relacionado con el ángulo de contacto ideal, de acuerdo con la ecuación de Wenzel

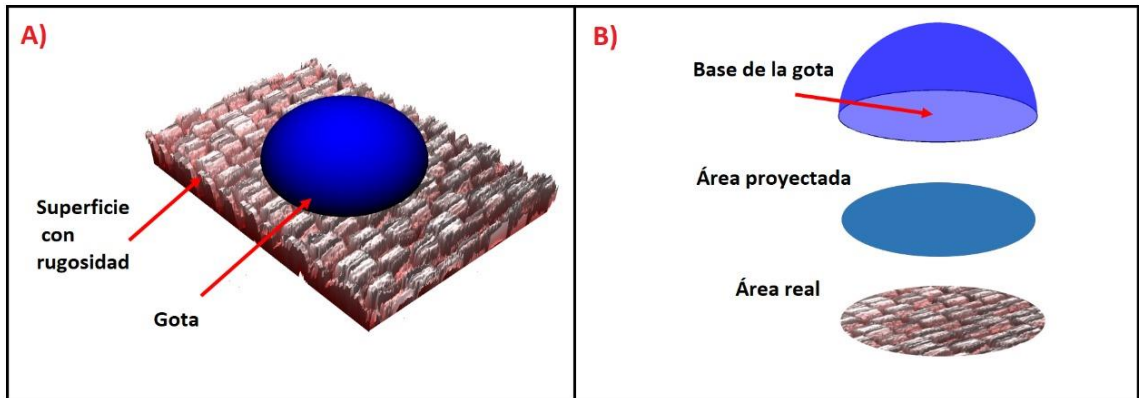
$$\cos \theta_W = r \cos \theta_Y \quad (35)$$

Donde θ_W es el ángulo de contacto de Wenzel (ángulo de contacto aparente sobre una superficie rugosa), θ_Y el ángulo de contacto de Young (ángulo de contacto ideal sobre una superficie lisa) y r es el factor de rugosidad dado por la ecuación (36).

$$r = \frac{\text{área real}}{\text{área proyectada}} \quad (36)$$

Donde el área real siempre es mayor que el área proyectada, si las dos áreas son iguales el factor de rugosidad es igual a 1, es decir, la superficie es ideal.

En la ecuación (35) se asume que las características superficiales del sustrato son insignificantes en comparación con las dimensiones de la gota y que su geometría no tiene importancia mientras no afecte el área de superficie (Cabello, 2009).

Figura 18*Modelo de Wenzel*

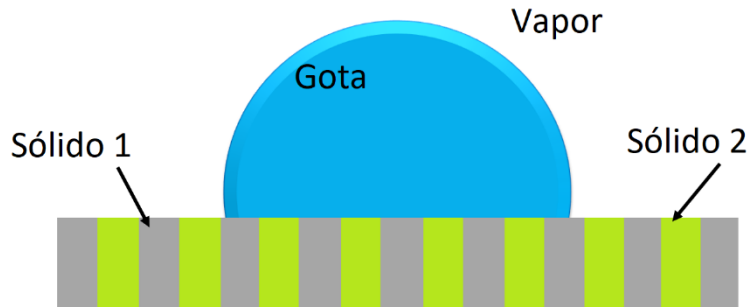
Nota. Definiciones usadas para comprender la ecuación de Wenzel: El área real sobre la superficie corresponde a la suma del área de contacto siguiendo la topografía y el área proyectada corresponde al valor medio.

1.13.2 Modelo de Cassie-Baxter

El modelo de Cassie-Baxter proporciona una descripción del comportamiento del ángulo de contacto de un líquido sobre una superficie rugosa. Es particularmente relevante ya que puede aplicarse a superficies heterogéneas compuestas por dos tipos de material diferentes y cada uno posee su propio ángulo de contacto θ_1 y θ_2 (ver Figura 19).

Figura 19

Representación del estado Cassie-Baxter



Nota. El material sobre el que reposa la gota está compuesto por dos sólidos.

El líquido moja cada material, el área superficial ocupada por el líquido en cada material está representada por f_1 y f_2

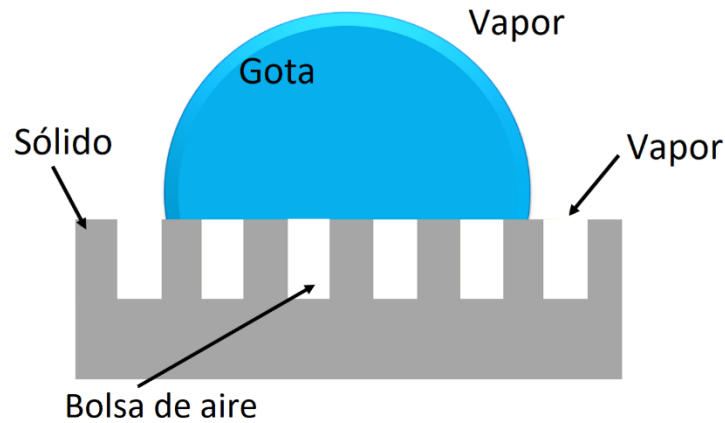
$$f_1 + f_2 = 1 \quad (37)$$

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \quad (38)$$

Cuando el líquido de la gota no penetra en el material, se forman burbujas de aire atrapadas entre la gota y la superficie sólida. La adherencia entre el líquido y el sólido se ve interrumpido por regiones donde el líquido reposa sobre aire. Este fenómeno ocurre comúnmente en superficies rugosas e hidrofóbicas, (ver Figura 20).

Figura 20

Representación del estado Cassie-Baxter donde el líquido no penetra en la rugosidad.



En estos casos, puede utilizarse el modelo de Cassie-Baxter para determinar el ángulo de contacto. Para ello, se calcula la fracción de líquido que moja efectivamente el material y el ángulo de contacto correspondiente. La fracción del líquido en contacto con el aire atrapado se obtiene a partir de la ecuación (37), considerando que el ángulo de contacto entre el aire y el líquido es de 180° . Con estas consideraciones, se plantea la ecuación (39), que describe el estado de Cassie-Baxter para una gota que no penetra en el sólido, dejando bolsas de aire en la superficie y el líquido

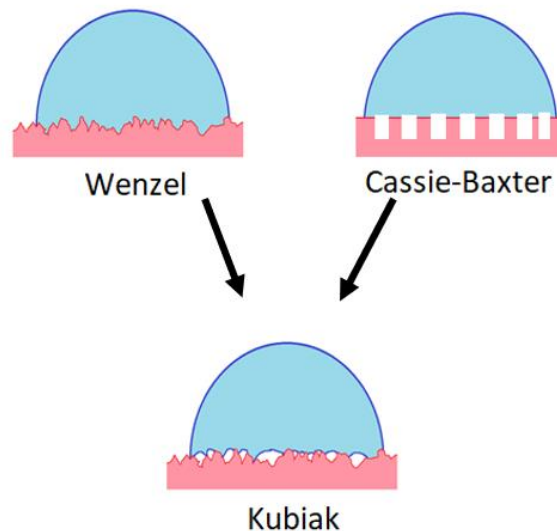
$$\cos \theta_{CB} = f_{LS} [\cos \theta_1 + 1] - 1 \quad (39)$$

1.13.3 Modelo de Kubiak

Kubiak llevó a cabo una investigación experimental detallada sobre la influencia de la rugosidad en las mediciones del ángulo de contacto y desarrolló un modelo sencillo donde combina las teorías clásicas de Wenzel y Cassie-Baxter, integrándolas con un análisis 2D del perfil de rugosidad. Este enfoque se aplicó a superficies reales, homogéneas y anisotrópicas, permitiendo una predicción más precisa del ángulo de contacto aparente.

Figura 21

Representación del estado de mojado según Kubiak



Nota. En esta figura se muestra la combinación de los estados de Wenzel y Cassie-Baxter dando origen al mojado propuesto por Kubiak, donde la superficie posee rugosidad y el líquido no penetra ciertos valles de la topografía del material.

El artículo publicado en 2010 por Kubiak et al., “wettability versus roughness of engineering surfaces”, se presenta un modelo que emplea dos parámetros fundamentales obtenidos del análisis bidimensional de perfiles de rugosidad denominados R_{LO} y R_{mr} .

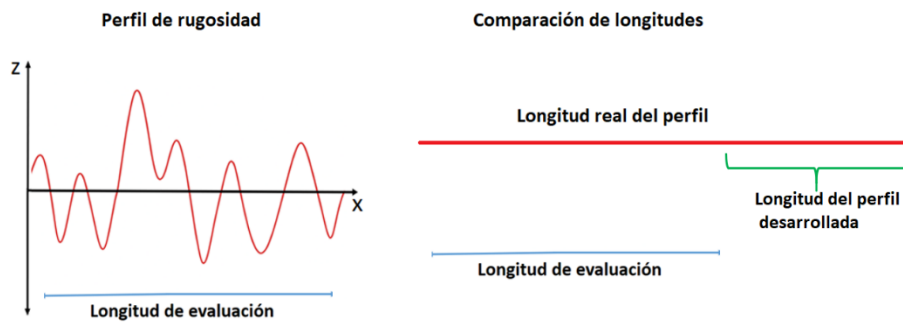
1.13.3.1 Parámetro R_{LO}

Corresponde al porcentaje de longitud desarrollada del perfil, representa el incremento porcentual de la longitud real de la superficie rugosa en comparación con la longitud de evaluación; un valor alto de este parámetro indica una superficie más accidentada. La longitud desarrollada del perfil corresponde a la distancia medida siguiendo el perfil de rugosidad, que, para superficies

rugosas, es mayor que la superficie horizontal o proyectada promedio llamada longitud de evaluación.

Figura 22

Extracción del parámetro R_{LO} del perfil de rugosidad



Nota. el parámetro de R_{LO} es el porcentaje de la longitud del perfil desarrollada, el cual se obtiene al comparar la longitud real del perfil de rugosidad con la longitud de evaluación del mismo.

1.13.3.2 Parámetro R_{mr}

Corresponde a la relación del material, indica el porcentaje de contacto efectivo entre el líquido y el sólido, medido a una altura específica del perfil (en este caso, a 25 % de la altura máxima del perfil rugoso).

Figura 23

Contacto efectivo entre el sólido y el líquido

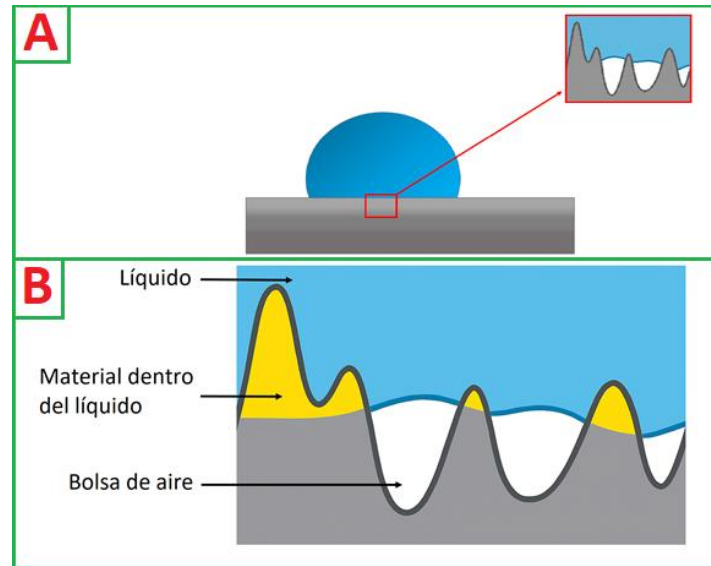
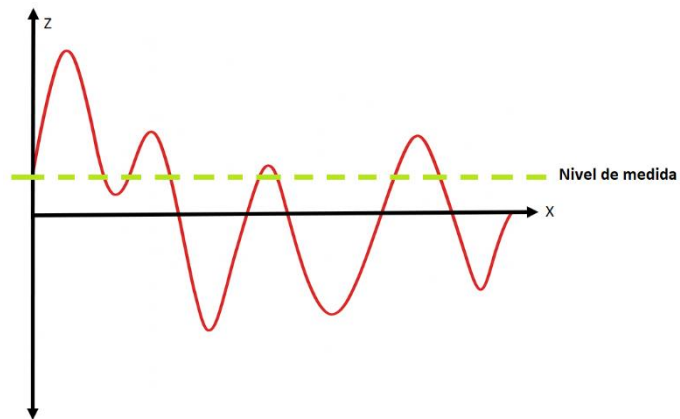


Figura 24

Extracción del parámetro R_{mr} del perfil de rugosidad



Nota. Se asume que la línea punteada posee puntos dentro del material y puntos que se llenaría de aire o líquido. R_{mr} corresponde a la relación de longitud dentro del materia sobre la longitud de evaluación.

1.14 Caracterización de la topografía superficial mediante microscopía de interferencia por luz blanca

Una de las técnicas más eficaces y recomendadas para la construcción topográfica de superficies a pequeña escala es la perfilometría óptica mediante interferencia de luz blanca. Esta metodología permite realizar mediciones sin contacto físico, lo que evita alterar o dañar la muestra, y proporciona topografías de alta resolución. Su funcionamiento se basa en los principios de la interferometría, utilizando dos haces de luz generados a partir de una misma fuente: uno de ellos actúa como referencia, mientras que el otro se refleja sobre la superficie de la muestra. La interferencia entre ambos haces permite detectar con gran precisión las variaciones en la altura de la superficie, facilitando así una caracterización detallada de su topografía.

Esta técnica utiliza luz blanca como fuente de iluminación. Dado que se trata de una luz policromática, posee una coherencia menor en comparación con fuentes monocromáticas, lo que restringe la generación de interferencias a un rango axial limitado. Esta característica resulta especialmente útil para realizar mediciones precisas de distancia, ya que permite localizar con alta resolución axial el punto exacto donde se produce la interferencia.

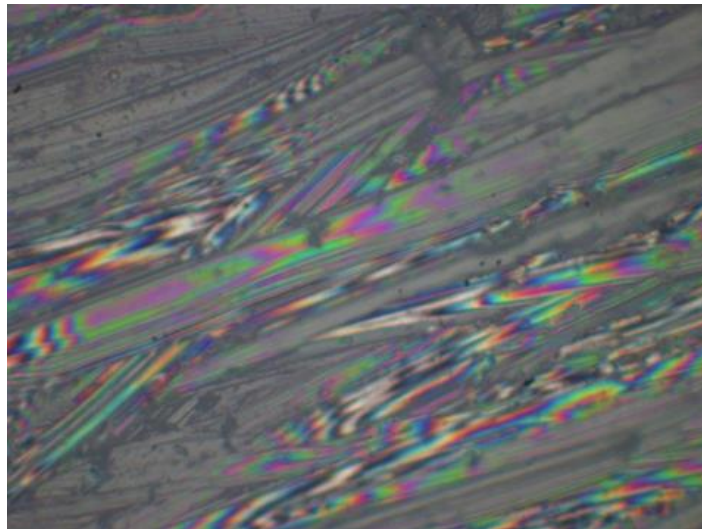
La microscopía por interferencia de luz blanca se fundamenta en identificar el punto de máximo contacto óptico, es decir, donde se alcanza el grado mayor de interferencia. Para determinar esta posición, se analiza el interferograma y se localiza el máximo de la envolvente de la señal de interferencia.

La microscopía por interferencia de luz blanca se fundamenta en identificar el punto de máximo contacto óptico, es decir, donde se anula la diferencia de camino óptico entre ambos brazos de interferencia. El sistema óptico forma una imagen de la superficie donde interfieren los dos frentes de onda. Con el fin de encontrar el punto de contacto óptico, se debe introducir un

desplazamiento relativo de un brazo con respecto al otro. Generalmente se emplea un piezoeléctrico (PZT) cuyo rango dinámico define el tamaño máximo del objeto en estudio y cuya resolución define el más pequeño detalle que puede identificarse sobre la topografía. De esta manera, un PZT corresponde a una fuente de potencial eléctrico variable digitalmente a Nbits: Por ejemplo 10 bits permiten variar en 1024 posiciones el rango de voltaje máximo del PZT. En interferometría por barrido, cada pixel posee información de la intensidad de interferencia resultante para cada posición del PZT, dentro de estas posiciones de debe identificar la posición donde ocurre el contacto óptico (de Groot, 2015).

Figura 25

Patrón de interferencia de una muestra de cobre lijado con lija de grano 120.



La literatura especializada muestra una colección de procedimientos que permite extraer el punto de contacto óptico del interferograma de barrido. Como procedimiento innovador e interesante, recientemente Plata, Planidina, Mendoza y Guerrero (2023) explotaron la capacidad de almacenamiento de información en los canales cromáticos del interferograma en luz blanca.

Los autores transformaron la información cromática de intensidad luminosa del interferograma para cada pixel en el sistema de color CIEXYZ. LA variación de intensidad en función de la posición digital del PZT define una trayectoria en el diagrama CIEXYZ. EL punto de contacto corresponde al punto de máxima área para puntos vecinos cercanos. Una vez encontrado la posición PZT del punto de contacto óptico, una calibración tradicional permite convertir posiciones de PZT a micras de profundidad, de igual forma, calibración preliminar permite convertir pixeles en micras sobre el objeto. La Figura 26 muestra una reconstrucción topográfica 3D usando el método mencionado anteriormente: El interferómetro usa un objetivo interferométrico tipo Mirau (ver Figura 28).

Figura 26

Topografía 3D cobre lija 120

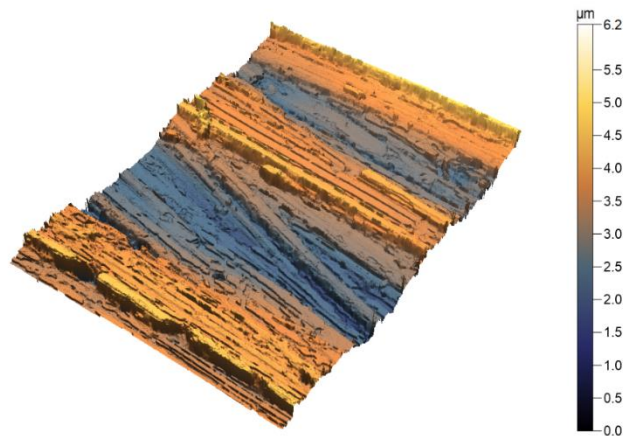
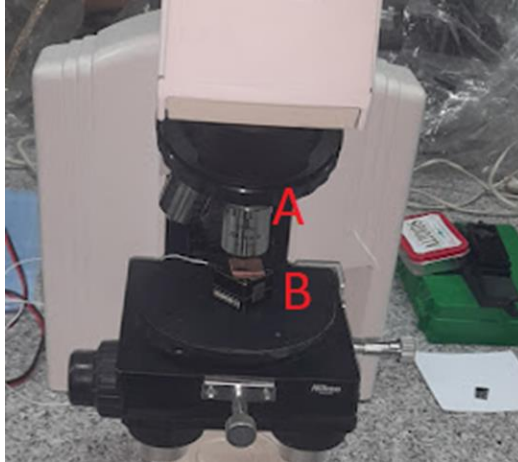


Figura 27

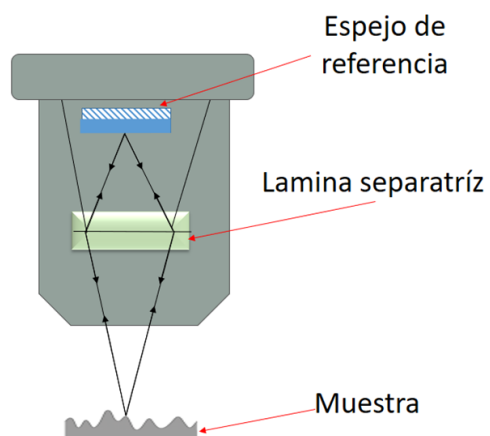
Microscopio por interferometría de luz blanca



Nota. En la imagen se muestra el microscopio por intergerometría de luz blanca. A) objetivo Mirau, B) piezoeléctrico.

Figura 28

Objetivo tipo Mirau



Montaje experimental

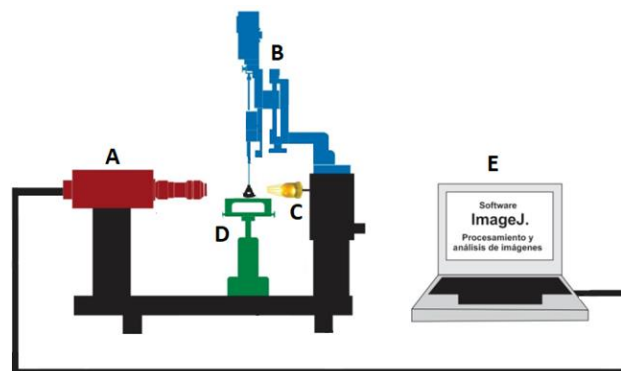
El montaje experimental fue diseñado con el propósito de realizar mediciones precisas del ángulo de contacto entre una gota de fluido líquido y una superficie sólida. Para ello, se integraron tres componentes fundamentales: un sistema óptico telecéntrico para capturar imágenes sin distorsión, una fuente de iluminación homogénea que asegura un contorno bien definido de la gota y un sistema de inyección controlado que permite dosificar con exactitud el volumen de la gota.

1.15 Diagrama esquemático

La creación e implementación del sistema óptico telecéntrico para la medición del ángulo de contacto requirió la unión de varios elementos ópticos, mecánicos y electrónicos que hicieron posible obtener mediciones de forma precisa. Para ello, se planteó el esquema de la Figura 29.

Figura 29

Esquema del montaje experimental



Nota. A) Sistema óptico, B) sistema de inyección para generar gotas, C) Sistema de iluminación, D) Base giratoria, E) ordenador

1.16 Materiales

Para llevar a cabo el diseño y construcción del sistema óptico el GOTS (Grupo de Investigación en Óptica y Tratamiento de Señales, Escuela de Física, UIS) y el GIMAT (Grupo de

Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, UIS) disponen de los siguientes elementos.

Cámara EO-5012M: es una cámara digital CMOS de alta resolución con área de detección 5,6 x 4,2 mm (HXV) y salida de vídeo USB 2,0. El *software* de la cámara permite capturar imágenes fijas en formato de archivo JPEG y mapa de bits o video en formato AVI. Además, el *software* puede realizar mejoras de bordes, duplicación y agrupamiento de imágenes en las direcciones vertical y horizontal.

Lente Telecéntrico EO-2,0 XTML: objetivo de alta magnificación, con un campo de observación transversal circular de 3,2 mm de diámetro en configuración telecéntrica.

Sistema de inyección: se usó una jeringa de insulina para obtener tamaños de gota de $1 \mu l$ y se depositó sobre la superficie rugosa.

Software ImageJ: permitió la adquisición, tratamiento de imágenes y cálculo de ángulo de contacto sobre cada superficie.

Soportes, adaptadores, platinas de traslación y rotación, mesón en granito: elementos adicionales para la realización del montaje experimental.

Líquidos: Agua tipo I

Superficie sólida: Aleación de aluminio AA706

1.17 Procedimiento de preparación

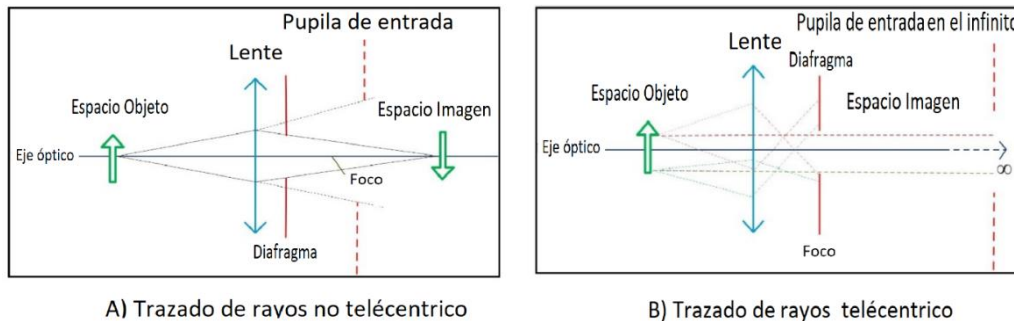
Para llevar a cabo el montaje destinado a la medición del ángulo de contacto, se consideraron tres componentes fundamentales: el sistema óptico, la fuente de iluminación y el sistema de inyección.

1.17.1 Sistema óptico

Se optó por un sistema óptico telecéntrico para la formación de imágenes debido a su capacidad de mantener los rayos de luz paralelos al eje óptico. Este diseño óptico elimina los errores de paralaje y disminuye la distorsión geométrica, tanto en forma de barril como de cojín, lo que incrementa la precisión de las medidas y elimina imprecisiones ópticas. Los sistemas telecéntricos se caracterizan por tener su pupila de entrada en el infinito, condición que se consigue al ubicar el diafragma en el plano focal posterior de la lente. La Figura 30 y la Figura 31 ilustran la posición de la pupila de entrada y la trayectoria de los rayos en un sistema óptico telecéntrico y no telecéntrico, respectivamente.

Figura 30

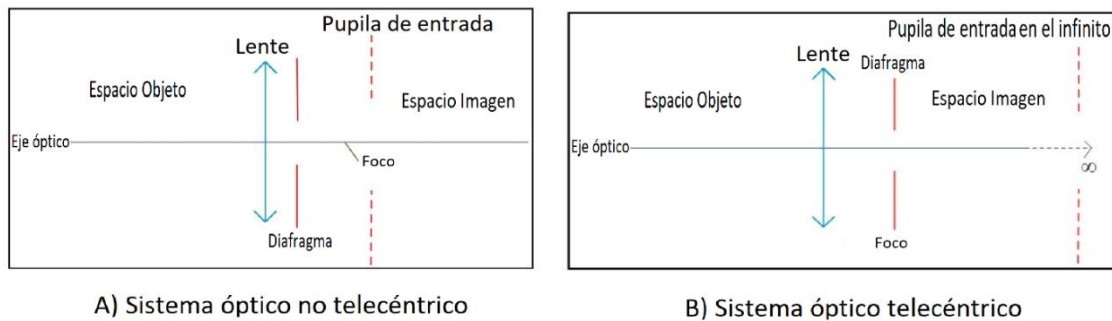
Comparación entre los sistemas ópticos no telecéntrico y telecéntrico.



Nota. Ubicación de la pupila de entrada en un sistema óptico telecéntrico y un sistema no telecéntrico

Figura**31**

Diagrama de trayectoria de rayos en un sistema óptico telecéntrico y un sistema óptico no telecéntrico.

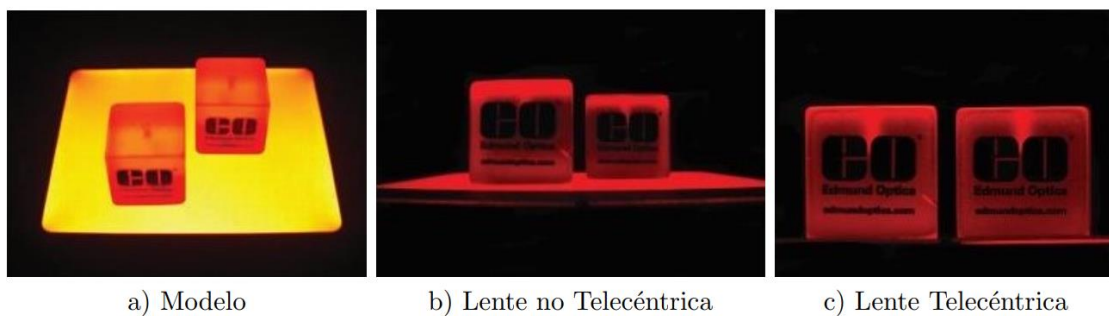


Un sistema óptico telecéntrico presenta ventajas como el aumento constante, zoom mejorado, difuminado simétrico y eliminación del error de paralaje. aportando precisión en las mediciones y reproducibilidad de los resultados.

En la Figura 32 se muestra una imagen formada por un sistema óptico telecéntrico y un sistema óptico no telecéntrico.

Figura 32

Imagen formada por un sistema óptico telecéntrico y un sistema óptico no telecéntrico



Nota. Los cubos de la figura son idénticos, cambia la distancia objeto, en un sistema no telecéntrico el tamaño de la imagen disminuye con el aumento de la distancia objeto, mientras que en un sistema telecéntrico el tamaño de la imagen es constante. Adaptado de (Edmund Optics, 2022).

El sistema óptico está compuesto por la cámara EO-5012M, una cámara CMOS de alta resolución encargada de registrar las imágenes, y el lente telecéntrico EO-2.0 XTML, seleccionado por su capacidad para eliminar distorsiones y mantener constante el tamaño de la imagen, como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Lente telecéntrica y cámara digital CMOS



1.17.1.1 Calibración del sistema óptico

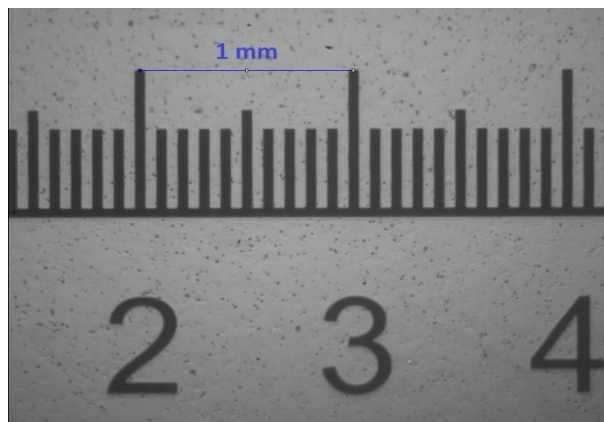
La calibración de un sistema óptico representa una etapa fundamental para optimizar la eficiencia de los instrumentos y garantizar la exactitud de los resultados. Este proceso implicó determinar la relación entre el tamaño de un píxel en la imagen y su medida real en milímetros. Para llevarlo a cabo, se empleó una regla graduada en milímetros y, mediante el software ImageJ, se seleccionaron dos puntos para trazar una recta que correspondiera con la distancia de un milímetro en la regla. Posteriormente, el programa generó una relación en píxeles por milímetro.

1.17.1.1.1 Calibración horizontal

El sistema óptico empleado posee un ancho de 2560 píxeles; para convertir este valor a milímetros en el eje horizontal, se llevó a cabo la calibración correspondiente utilizando el software ImageJ.

Figura 34

Calibración horizontal



La Figura 34 representa la imagen de la regla graduada mediante el sistema óptico, sobre la cual se midió la distancia indicada por la línea. Esta línea fue trazada en 10 ocasiones para perfeccionar la calibración del sistema. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Promedio de medida para el eje horizontal.

Medida	Relación $\left[\frac{\text{pixel}}{\text{mm}}\right]$
1	904
2	901.86
3	899.03
4	907.53
5	904.7
6	907.53
Promedio	904,35

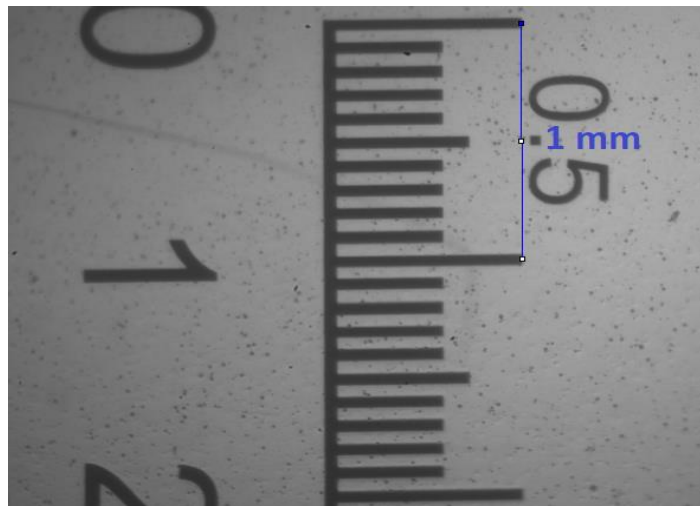
A partir de la relación $\frac{\text{pixel}}{\text{mm}}$ promedio, se determinó que un $\text{pixel} = 0.011[\text{mm}]$. Considerando que el error en las mediciones corresponde a un píxel, se obtuvo que el error en la dimensión horizontal es de $\delta x = \pm 0.0011[\text{mm}]$. Este resultado demuestra que el sistema empleado permite realizar mediciones con un alto grado de precisión.

1.17.1.1.2 Calibración vertical

El sistema óptico empleado posee un alto de 1920 píxeles; para convertir este valor a milímetros en el eje vertical, se llevó a cabo la calibración correspondiente utilizando el software ImageJ.

Figura 35

Calibración vertical



La Figura 35 representa la imagen de la regla graduada mediante el sistema óptico, sobre la cual se midió la distancia indicada por la línea. Esta línea fue trazada en 10 ocasiones para perfeccionar la calibración del sistema. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3

Tabla 3*Promedio de medida para el eje vertical*

Medida	Relación $\left[\frac{pixel}{mm}\right]$
1	904.01
2	903.08
3	904
4	903.53
5	904.7
6	904.38
7	903.53
8	904.7
9	904.09
10	903.58
Promedio	904

A partir de la relación $\frac{pixel}{mm}$ promedio, se determinó que un $pixel = 0.011[mm]$.

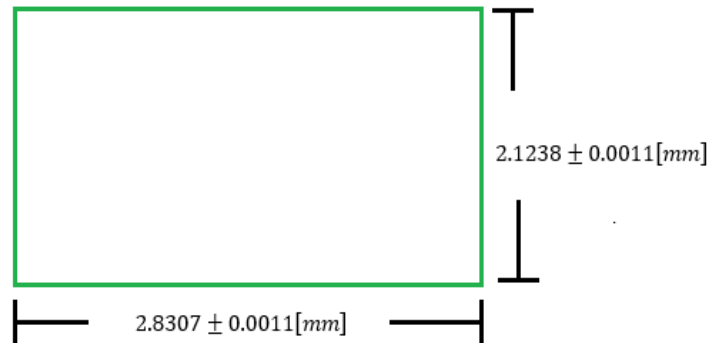
Considerando que el error en las mediciones corresponde a un píxel, se obtuvo que el error en la dimensión horizontal es de $\delta x = \pm 0.0011[mm]$. Este resultado demuestra que el sistema empleado permite realizar mediciones con un alto grado de precisión.

1.17.1.1.3 Error en la medida del ángulo

Dado que el instrumento mide el ángulo de contacto de una imagen tomada por el sistema óptico, es fundamental considerar que el error en esta medición se ve afectado por los errores en las dimensiones horizontal y vertical del campo de observación del sistema óptico. Estos errores corresponden a un píxel en cada dirección. Se determinó que las dimensiones del campo transversal de la cámara son las siguientes

Figura 36

Campo de observación transversal del sistema óptico



Nota. La imagen entregada por el sistema óptico tiene una resolución de 2560 x 1920 píxeles.

Cualquier incertidumbre en las mediciones de los ejes X y Y afecta directamente la incertidumbre en la medida del ángulo. Al hacer zoom en uno de los vértices del triángulo, se observa que el píxel central corresponde al vértice real que forma el triángulo. Sin embargo, el cuadro que lo rodea es más grande para facilitar su manipulación. Este píxel tiene una incertidumbre de localización de aproximadamente 1 *píxel*. Para estimar el error en la medida del ángulo, se calculó mediante la función tangente en cada caso (ver Tabla 4)

Figura 37

Error por posicionamiento.

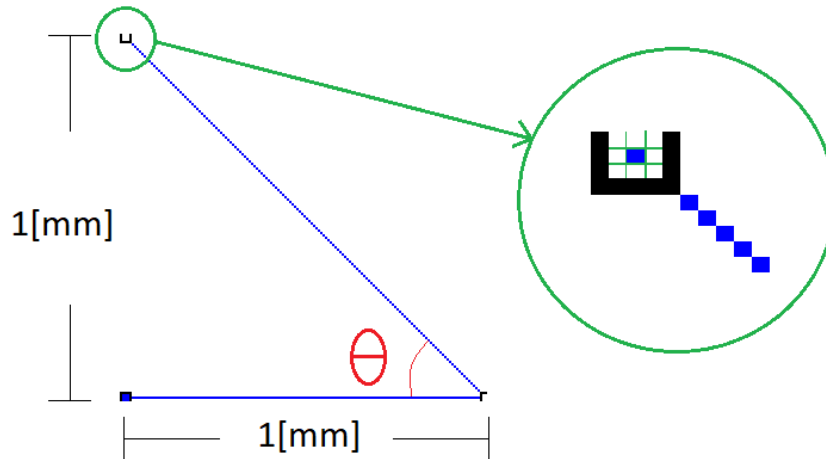


Tabla 4

Promedio de medida para el eje horizontal

Pixel	Distancia horizontal [mm]	Distancia vertical [mm]	Ángulo
0	1	1	45°
1 horizontal	1.0011	1	44.969°
-1 horizontal	0.9989	1	45.031°
1 vertical	1	1.0011	45.031°
-1 vertical	1	0.9989	44.969°
Error en la medida del ángulo $d\theta = \pm 0.031^\circ$			

1.17.2 Fuente de iluminación

Para lograr una iluminación uniforme sobre la gota y capturar claramente su contorno, los rayos de luz que inciden sobre ella deben ser paralelos al eje óptico. Una manera de aproximarse a esta condición es poniendo la fuente de luz a una gran distancia de la muestra, lo cual hace que

la luz incidente sea más coherente y los rayos más paralelos; sin embargo, esto implica una pérdida significativa de intensidad lumínica. En este diseño, se utilizó como fuente de iluminación una lámpara LED circular de cinco centímetros de radio.

Figura 38

Sistema de iluminación.



Nota. En la figura se muestra; A) lámpara para la iluminación de la gota; B) base del goniómetro

Para determinar la distancia óptima de la lámpara, se empleó un balín de $2.4 \pm 0.001 \text{ mm}$ de diámetro como referencia, posicionando la lámpara hasta que el contorno apareciera bien definido, sin distorsiones y con un buen contraste en la imagen. Esta configuración permitió una delimitación nítida del contorno, lo cual facilitó el procesamiento de imágenes en las mediciones de ángulo de contacto.

Figura 39

Fotografía del balón

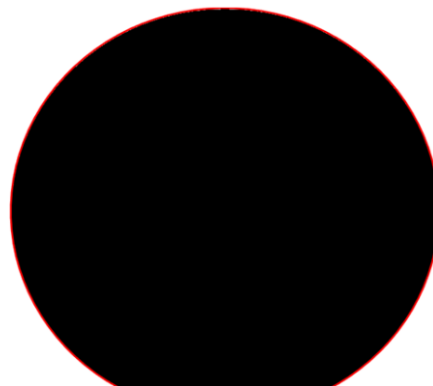


Nota. La distancia vertical del encuadre es de 2.16 mm, por lo tanto, la imagen del balón no sale completa.

Con el objetivo de comprobar que la imagen no presentara distorsiones, se realizó primero la binarización de la imagen y, posteriormente, se ajustó su contorno a la elipse más adecuada utilizando la función *fit ellipse* en Matlab.

Figura 40

Fotografía del balón binarizada.



Con base en el ajuste realizado, se calcularon las dimensiones del balón, verificando que las medidas obtenidas en la imagen correspondieran con las dimensiones reales del objeto, lo que garantiza la exactitud de las mediciones.

Tabla 5

Datos obtenidos al usar el ajuste de la mejor elipse.

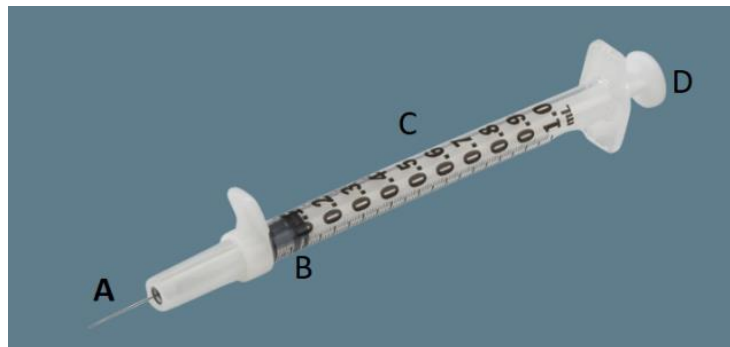
Semieje mayor	2.4 ± 0.0011 [mm]
Semieje menor	2.4 ± 0.0011 [mm]

1.17.3 Sistema de inyección

Para construir el sistema de inyección, se optó por utilizar una jeringa de insulina debido a sus características particulares: una aguja fina, un volumen reducido para el líquido, y una menor superficie tanto en el émbolo de hule como en su área de apoyo. Estas propiedades permiten alcanzar una mayor precisión en la generación de gotas.

Figura 41

Jeringa de insulina con sus partes.

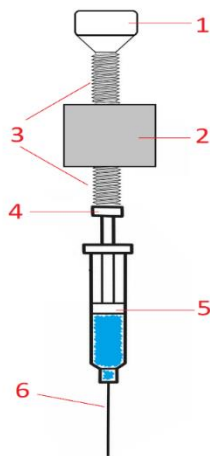


Nota. A: aguja, B: embolo de hule; C: cuerpo de la jeringa con marcas cada 0.1 mililitros (las marcas son llamadas unidades), longitud de 7 cm y diámetro de 0.6 cm; D apoyo del embolo.

El volumen de la gota producida por la jeringa está directamente relacionado con el desplazamiento de su émbolo. Por esta razón, se incorporó una plataforma de desplazamiento, lo que permitió un control preciso del proceso de inyección.

Figura 42

Sistema de inyección y sus partes.



Nota. El sistema de inyección consta de: 1-cabeza del tornillo, 2- plataforma de desplazamiento, 3-rosca, 4-apoyo de émbolo, 5-émbolo de hule, 6-aguja

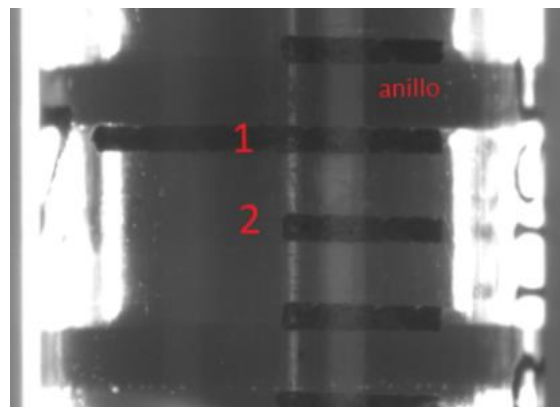
1.17.3.1 Calibración del sistema inyección

El volumen de la gota generada por la jeringa está directamente relacionado con el desplazamiento del émbolo. Por esta razón, se diseñó e integró una plataforma de desplazamiento que permite controlar con alta precisión el proceso de inyección. Para producir gotas de aproximadamente un microlitro, se estableció que el volumen comprendido entre dos marcas consecutivas en la jeringa es de 0,02 mililitros. Posteriormente, se determinó la relación entre el número de vueltas necesarias del tornillo para mover el émbolo desde la posición 1 hasta la posición 2 (ver Figura 43). Se concluyó que una rotación de 36 grados del tornillo permite

dispensar un volumen de 0,001 mililitros, equivalente a un microlitro. Esta precisión asegura que el volumen de la gota sésil se mantenga dentro del rango que valida la aproximación esférica utilizada en la ecuación de Young–Laplace, lo cual es esencial para garantizar mediciones confiables del ángulo de contacto (Biolin Scientific, 2016).

Figura 43

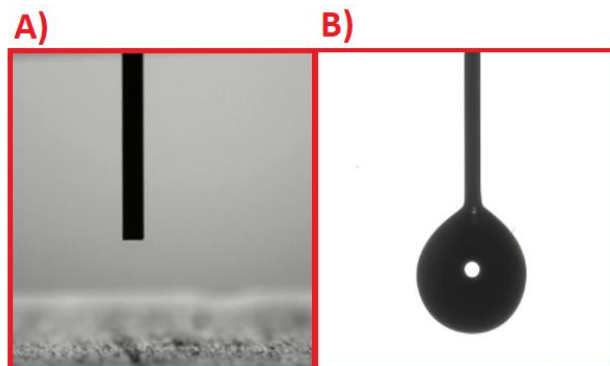
Embolo hule de la jeringa.



Nota. La figura presenta el émbolo de una jeringa de insulina. El seguimiento del desplazamiento desde la posición 1 hasta la posición 2 se llevó a cabo utilizando el sistema óptico telecéntrico, previamente calibrado. Este procedimiento se repitió en varias ocasiones con el fin de asegurar que el volumen de la gota generada se mantuviera constante.

Figura 44

Aguja sin punta.

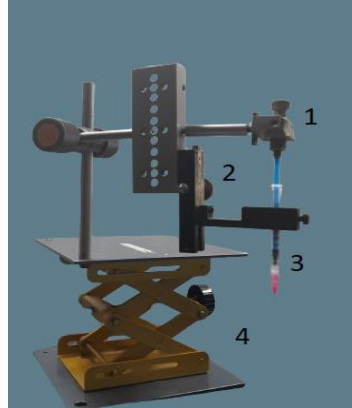


Nota. A) Aguja de la jeringa sin punta, B) gota producida por la jeringa.

A continuación, se presenta el sistema de inyección con el que se pudo obtener gotas de volumen $V = 1 \pm 0.0048 [\mu L]$.

Figura 45

Sistema de inyección.



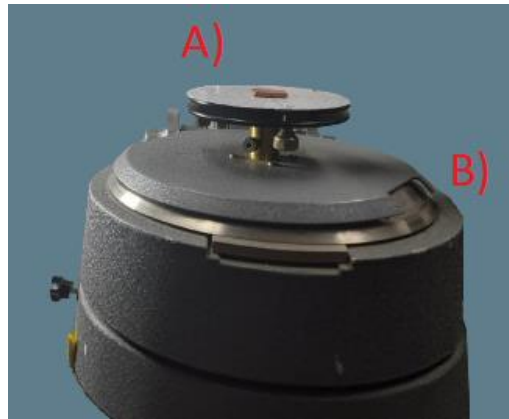
Nota. El sistema de inyección consta de: 1-plataforma de desplazamiento adaptada, riel de desplazamiento, 3 jeringa, 4-plataforma elevada.

1.18 Ensamble del dispositivo para medir ángulo de contacto

Para garantizar una correcta colocación de la muestra, fue indispensable disponer de una plataforma estable. Con este propósito, se empleó la base de un goniómetro, ya que proporciona una superficie capaz de rotar y nivelarse con precisión, lo cual facilita el ajuste fino de la posición de la muestra. Adicionalmente, se incorporaron soportes adecuados para asegurar la fijación estable de las cámaras utilizadas en el sistema.

Figura 46

Base del goniómetro.



Nota. La base del goniómetro. A) plataforma de nivelación de la muestra, B) plataforma de rotación.

Una vez que todas las partes del sistema estuvieron listas, se procedió al ensamblaje completo del montaje experimental. Se utilizaron dos cámaras: la primera, proporciona una vista superior de la gota y está instalada sobre un riel ajustable que permite modificar su altura según sea necesario. La segunda cámara ofrece una vista transversal de la gota, desde donde se realiza la medición del ángulo de contacto. La base del goniómetro, utilizada como plataforma de soporte, permite nivelar y rotar la muestra en un rango de 360° , lo que posibilitó realizar mediciones del ángulo de contacto en intervalos de 10° . Finalmente, el software ImageJ fue empleado para calcular el ángulo de contacto, mientras que un segundo monitor mostraba en tiempo real la vista superior de la gota.

Figura 47

Sistema óptico telecéntrico para medir ángulo de contacto.



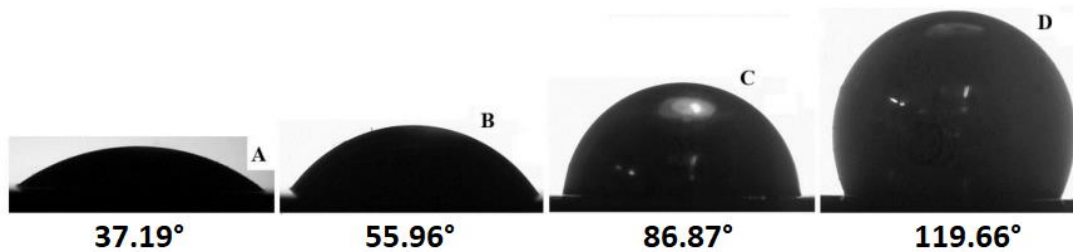
Nota. El sistema óptico para medir ángulo de contacto consta de: A) cámara que registra la vista superior de la gota; B) soporte de la cámara, este soporte puede desplazar la cámara en dirección vertical; C) base del goniómetro; D) cámara que registra la gota para medir el AC; E) computador.

1.19 Calibración del sistema óptico telecéntrico para medir ángulo de contacto

Los instrumentos utilizados para la medición del ángulo de contacto, como el PGX+ de Industrial Physics y el analizador de forma de gota KRÜSS modelo DSA100, incorporan mecanismos de calibración diseñados para garantizar la precisión de las mediciones. Estos mecanismos, por lo general, consisten en una plataforma de acrílico con un orificio central donde se posiciona un balín de acero, de forma que solo la mitad de su volumen quede expuesta, simulando así una gota con un ángulo de contacto de 90° . Este enfoque permite establecer un punto de referencia confiable para la validación del sistema óptico. En línea con esta metodología, Schuster (2018) empleó hemisferios metálicos como patrones de referencia con el fin de verificar la exactitud de su sistema de medición.

Figura 48

Imágenes patrones de calibración.

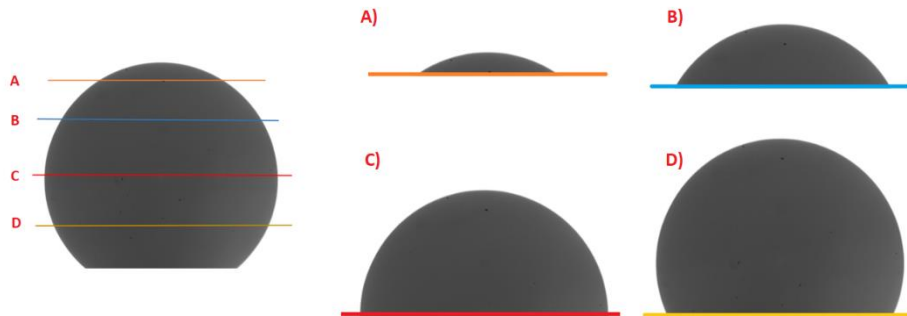


Nota. Imágenes de calibración estándar A, B, C y D. Adaptado de Park et al. (2019)

Como complemento a esta metodología, se llevó a cabo una calibración adicional mediante el análisis de una imagen de un balón con un diámetro de 2,4 mm, utilizando la ecuación que describe la circunferencia respectivamente. Sobre dicha figura se trazaron cuatro líneas secantes a distintas alturas, simulando así diferentes tipos de mojabilidad. De este modo, la porción visible en la parte superior del balón representó diversas configuraciones de gotas, permitiendo asociar cada una con un tipo específico de ángulo de contacto, que se conoce teóricamente, como se muestra en la Figura 48.

Figura 49

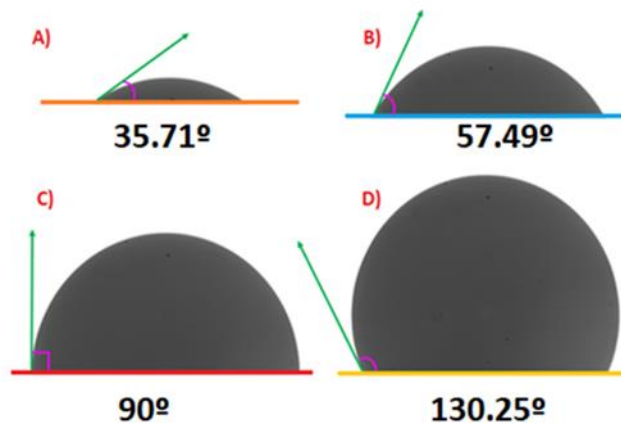
Construcción patrones de calibración.



Para cada una de las imágenes analizadas, se determinó de forma matemática el ángulo generado entre la recta tangente y la recta secante trazadas sobre la superficie del balín.

Figura 50

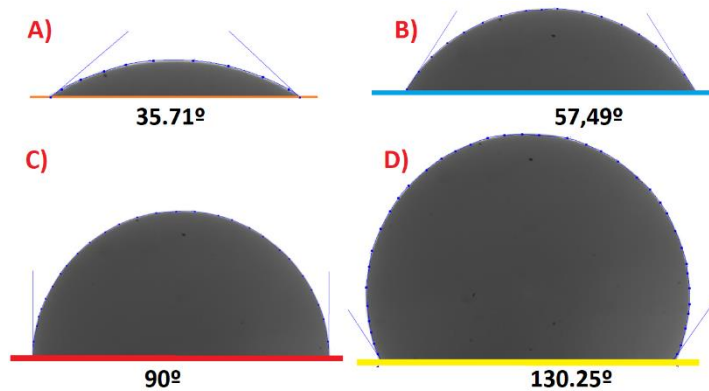
Ángulos de los patrones de calibración.



Una vez obtenidos los ángulos teóricos correspondientes a cada imagen, se realizó la medición del ángulo de contacto experimental y se definieron los pasos necesarios para minimizar la diferencia con el valor teórico. Es decir, este procedimiento permitió realizar los ajustes necesarios al software de medición del ángulo de contacto para minimizar el error determinístico.

Figura 51

Ángulos medidos de los patrones de calibración.



Nota. Los ángulos se midieron utilizando el software ImageJ.

1.20 Validación del sistema óptico telecéntrico para medir ángulo de contacto

La validación del equipo se llevó a cabo en un entorno controlado, con presión, temperatura y humedad constantes (ver Figura 52). Mantener estas condiciones estables fue fundamental para evitar influencias externas que pudieran alterar las mediciones del ángulo de contacto. De este modo, se garantizó que los resultados obtenidos reflejaran exclusivamente la interacción entre el líquido y la superficie, asegurando así la precisión y confiabilidad del proceso de medición.

Figura 52*Higrómetro*

1.20.1 Elección del material

El material que mejor se ajustó a los requerimientos del estudio fue el silicio, debido a que posee una superficie plana, baja rugosidad y es químicamente homogéneo. Con el fin de obtener una caracterización más detallada de su topografía, la muestra fue analizada mediante el microscopio de interferometría de luz blanca del laboratorio GOTS. Esta técnica permitió una evaluación precisa de las características superficiales del sustrato, garantizando la fiabilidad de las mediciones posteriores.

Figura 53

Topografía sustrato de Silicio.



1.20.2 Elección del líquido

El agua representa uno de los reactivos fundamentales en el ámbito de laboratorio, dada su amplia aplicación en diversos procesos y soluciones. Más allá de su participación esencial en reacciones químicas y biológicas, desempeña un rol clave en el estudio del comportamiento de mojado sobre superficies, fenómeno directamente relacionado con el ángulo de contacto y la interacción entre sólidos y líquidos. Para garantizar la precisión y confiabilidad en este tipo de análisis, es indispensable utilizar agua con un nivel mínimo de impurezas, ya que la presencia de contaminantes puede modificar significativamente las propiedades de mojabilidad. Por esta razón, en el desarrollo de este experimento se empleó agua de Tipo I, que cumple con los más altos estándares de pureza.

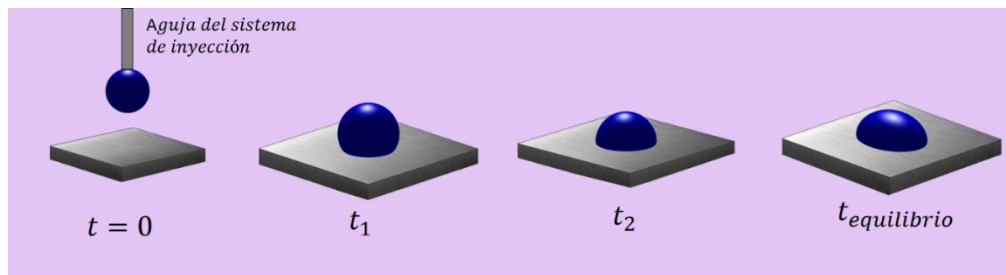
1.20.3 Generación de la gota de agua Tipo I

Mediante el sistema de inyección, se dosificó una gota de 1 [μL] de agua Tipo I mediante un giro de 36° del tornillo. Una vez formada la gota en la punta de la jeringa, se procedió a descender cuidadosamente la plataforma elevadora del sistema hasta que la gota entrara en

contacto con la superficie. A continuación, la plataforma fue bajada lentamente para permitir que la gota quedara depositada sobre la superficie, adoptando la configuración de gota sésil. Se esperó un tiempo de 30[s] para que la gota alcanzara su estado de equilibrio. Después de este tiempo, se tomó una imagen que fue usada para medir el ángulo de contacto.

Figura 54

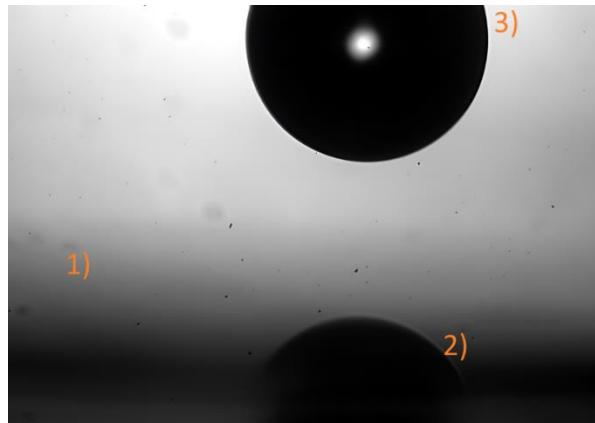
Formación de la gota sésil.



Nota. Al depositar una gota sobre una superficie, esta experimenta inicialmente una expansión, seguida de una ligera retracción hasta alcanzar un estado de equilibrio. Este comportamiento es consecuencia del balance entre las fuerzas interfaciales que actúan sobre la gota, tales como la tensión superficial y las interacciones entre el líquido y el sólido.

Figura 55

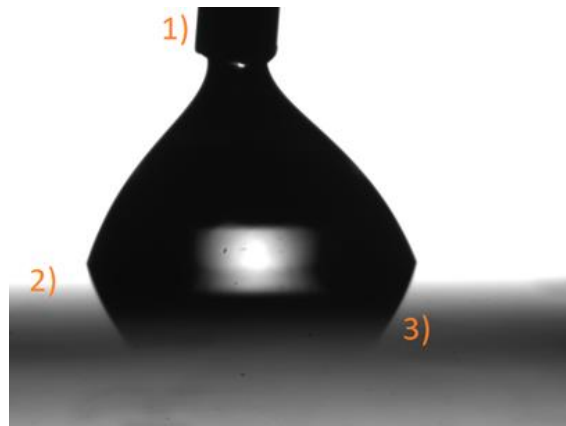
Dosificación de una gota de 1 μL de agua Tipo I.



Nota. La imagen está formada por: 1) superficie, 2) reflejo de la gota, 3) gota generada por el sistema de inyección.

Figura 56

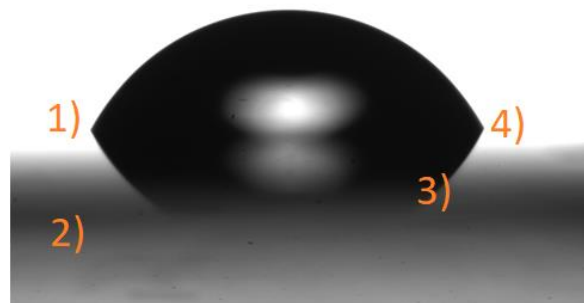
Posicionamiento de la gota sobre la superficie.



Nota. Proceso de deposición de la gota sobre la superficie, 1) aguja sistema de inyección, 2) gota, 3) superficie

Figura 57

Gota sésil en equilibrio



Nota. Gota sésil (agua Tipo I-Silicio), 1) punto triple izquierdo, 2) Silicio, 3) reflejo de la gota de agua Tipo I, 4) punto triple derecho.

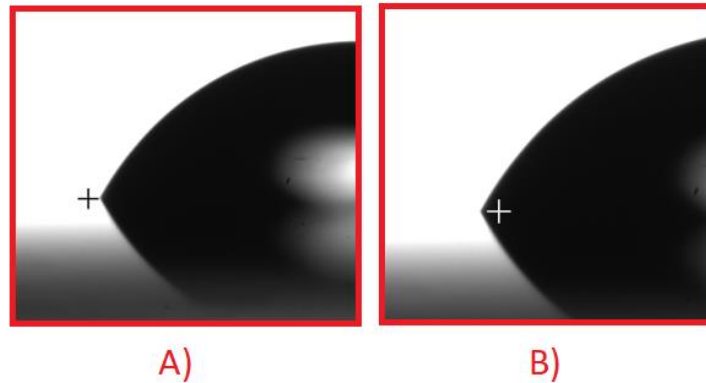
1.20.4 Medición de ángulo de contacto para el sistema silicio-agua

Una vez que la gota alcanza el equilibrio sobre la superficie, se procede a la medición del ángulo de contacto. Para ello, se empleó el software ImageJ, un programa de código abierto ampliamente utilizado en el ámbito académico, que dispone de herramientas específicas para este tipo de análisis.

La imagen capturada se carga en el programa, donde se realiza un procesamiento que permite trazar con precisión el contorno de la gota. El procedimiento inicia con la selección manual del punto triple izquierdo. Luego, se marcan diez puntos a lo largo del perfil de la gota para definir su curvatura, finalizando en el punto triple derecho (ver Figura 58)

Figura 58

Ubicación del punto triple usando la cruz guía del software ImageJ.

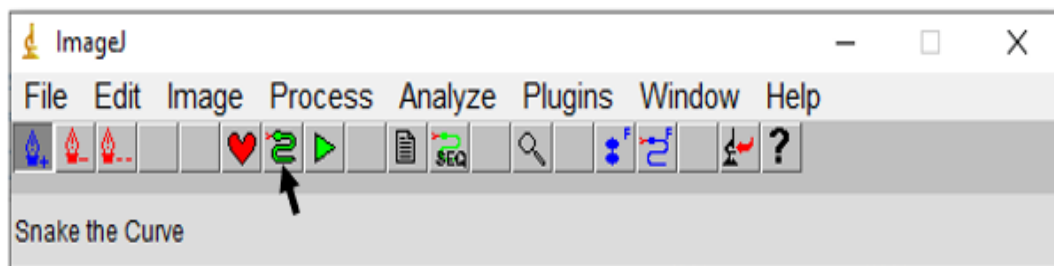


Nota. Análisis de la imagen capturada por ImageJ: A) la cruz del cursor se muestra en color negro cuando se posiciona sobre una región clara de la imagen, B) la cruz del cursor se muestra en blanco cuando se encuentra en una región oscura. Cuando el cursor se encuentra exactamente sobre el punto triple, la cruz se visualiza parcialmente en blanco y negro, lo cual indica que se ha ubicado correctamente en esta región de transición.

Posteriormente, se seleccionó la opción “Snake the curve”, lo que permitió que la aplicación generara automáticamente un mayor número de puntos a lo largo del contorno de la gota. Esta función mejora la definición del perfil y, en consecuencia, permite calcular el ángulo de contacto con mayor exactitud y precisión (ver Figura 59).

Figura 59

Panel de software ImageJ usando el plugin DropSnake

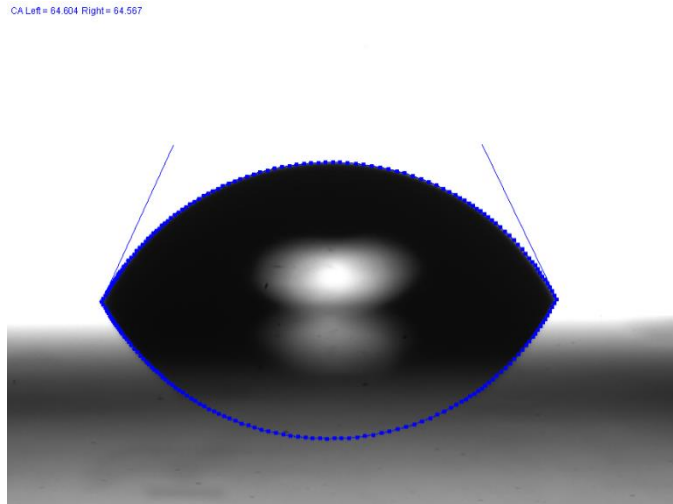


Nota. Esta imagen muestra la opción Snake the curve

Una vez marcado el punto triple izquierdo, se procede a trazar manualmente el contorno de la gota hasta alcanzar el punto triple derecho. Al hacer doble clic sobre este último punto, el programa calcula y muestra automáticamente los valores de ángulo de contacto en el lado izquierdo al igual que en el derecho, como se muestra a continuación (ver Figura 60).

Figura 60

Imagen gota sésil analizada con ImageJ.



En la siguiente tabla se presentan los valores de ángulo de contacto del sistema silicio-agua obtenidos mediante ImageJ.

Tabla 6

Ángulo de contacto sistema silicio-agua.

Ángulo de contacto izquierdo	64.604 ± 0.031 [mm]
Ángulo de contacto derecho	64.567 ± 0.031 [mm]
Ángulo de contacto promedio	64.585 ± 0.031 [mm]

Metodología experimental

La presente metodología experimental fue diseñada con el fin de obtener mediciones precisas y reproducibles del ángulo de contacto de gotas depositadas sobre una superficie sólida. Para ello, se integraron diversos sistemas e instrumentos que permitieron controlar las condiciones del experimento y capturar imágenes de alta resolución para su análisis. Esta sección describe los procedimientos, equipos y técnicas utilizados durante la implementación del experimento, garantizando así la fiabilidad de los resultados.

1.21 Sustrato

En este estudio se empleó aluminio como material de sustrato debido a su amplio uso en la industria, motivado por sus destacadas propiedades físicas y mecánicas. El aluminio es un material liviano, con una dureza moderada (aproximadamente 2.75 en la escala de Mohs) y una energía superficial cercana a $840 \text{ mJ}/\text{m}^2$ (Trayma, s.f.). Su baja densidad, alta conductividad térmica y excelente resistencia a la corrosión lo convierten en una opción ideal en los sectores aeronáutico, automotriz y de empaques. Además, su capacidad de ser reciclado sin pérdida significativa de propiedades lo posiciona como una alternativa sostenible y eficiente en procesos industriales.

1.22 Preparación de probetas de aluminio para aplicación del modelo de Kubiak

Para aplicar el modelo propuesto por Kubiak, que describe el comportamiento de superficies químicamente homogéneas con rugosidad anisotrópica, fue necesario inducir dicha textura en las probetas de aluminio. Para ello, se utilizó una esmeriladora manual (ver Figura 61), un equipo diseñado para el lijado y desbaste de materiales, equipada con cuatro estaciones que permiten el uso secuencial de lijas de diferente número de grano: 120, 600, 1200 y 1500.

Figura 61

Esmeriladora manual de 4 estaciones.



Nota. Este equipo se encuentra en el laboratorio de metalografía de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

El proceso consistió en lijar cada muestra de manera progresiva, comenzando con un número de grano más grueso y avanzando hasta alcanzar el grano final deseado. En cada cambio de estación, la muestra fue girada 90° antes de continuar con el lijado, lo que permitió generar una textura superficial con direccionalidad controlada. Esta rotación sistemática es fundamental para incluir la anisotropía en la rugosidad superficial, condición esencial para cumplir con los supuestos del modelo de Kubiak y representar de forma precisa la interacción entre la gota y la superficie texturizada.

Figura 62

Probetas de aluminio.



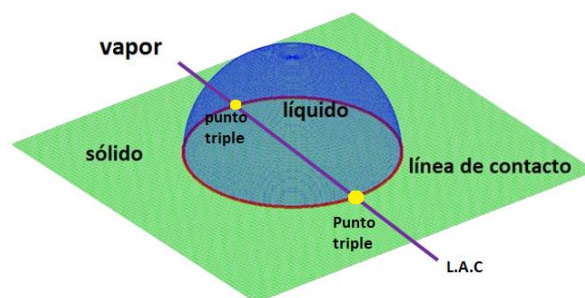
Nota. Imagen de la superficie resultante, evidenciando la textura direccional obtenida tras el proceso de lijado.

1.23 Rotación de las probetas y la medida de ángulo de contacto

Dado que la textura superficial de las probetas es anisotrópica, se midió el ángulo de contacto en función de la rotación de la muestra. Esto permitió que la cámara capturara distintas zonas de contacto entre la gota y la superficie. En cada posición angular, se identificaron los puntos triples situados a la izquierda y a la derecha de la gota, los cuales representan los vértices de los ángulos de contacto izquierdo y derecho, respectivamente. La línea que une estos puntos, denominada Línea de Ángulo de Contacto (L.A.C), es perpendicular al eje óptico del sistema y funciona como una secante sobre la línea de contacto (ver Figura 63). Por esta razón, al rotar la muestra, cambian los puntos triples visibles y, en consecuencia, también varía el ángulo de contacto observado.

Figura 63

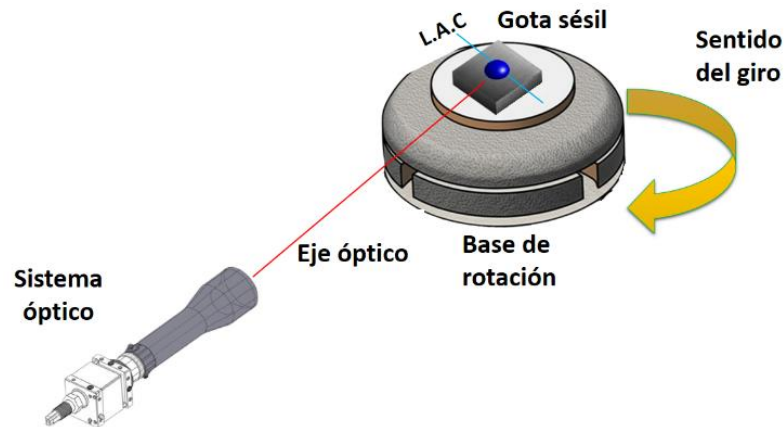
Componentes del ángulo de contacto.



Nota. La línea de contacto se define como el contorno que forma la base de la gota en el momento en que entra en contacto con la superficie. Cada punto de este contorno representa un punto triple, y, en consecuencia, puede asociarse a un valor distinto de ángulo de contacto.

Figura 64

Sistema de rotación de las probetas para la medida de ángulo de contacto.



1.23.1 Procedimiento de rotación de la probeta y medida del ángulo de contacto

Inicialmente, se orientó la dirección de la textura superficial de la probeta de forma paralela al eje óptico del sistema, fijando la base de rotación en 0° (ver Figura 65). Desde esta configuración, se capturó una imagen de la gota depositada y se procedió a medir el ángulo de contacto mediante el software ImageJ. Posteriormente, se repitió el procedimiento rotando la probeta en incrementos de 30° (ver Figura 66), obteniendo imágenes y valores de ángulo de contacto en cada posición, con el fin de analizar la influencia de la anisotropía superficial en la medida de ángulo de contacto.

Figura 65

Ubicación inicial de la probeta de aluminio.

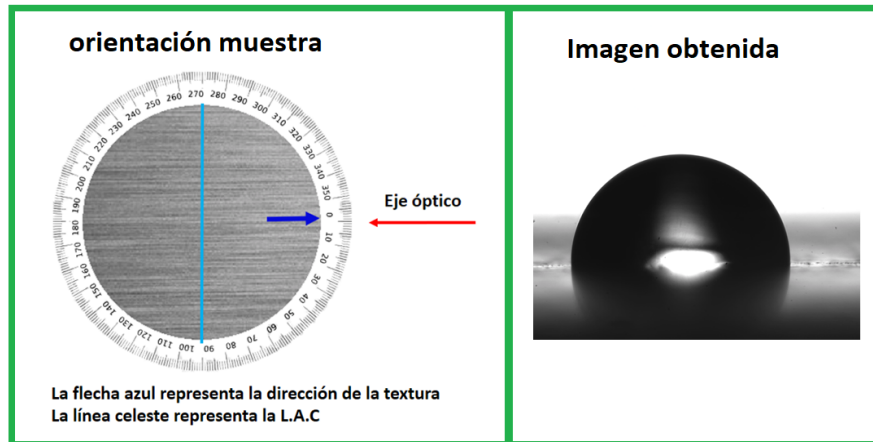
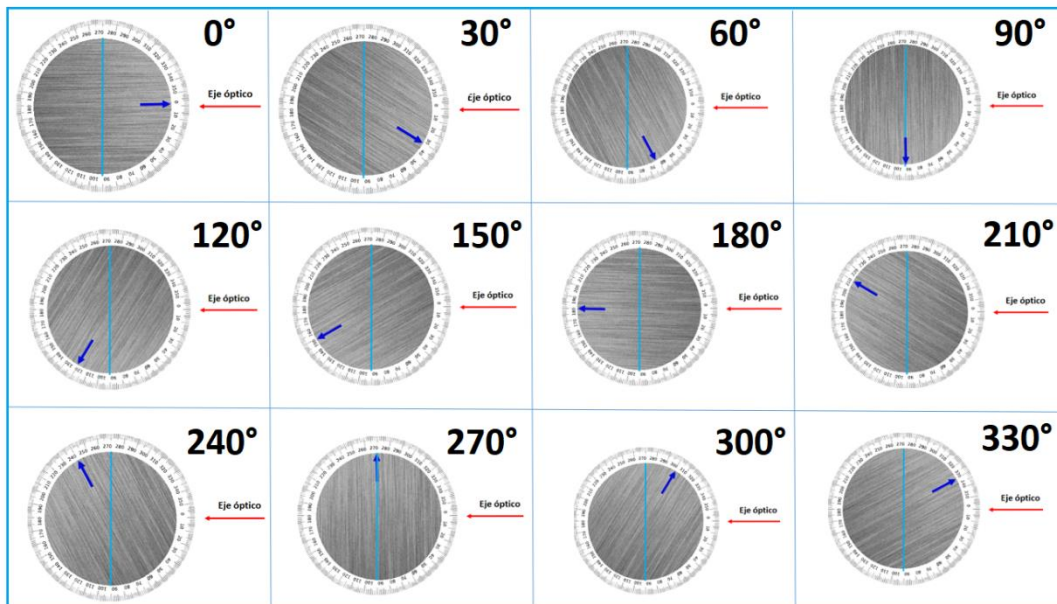


Figura 66

Rotación de la probeta de aluminio.

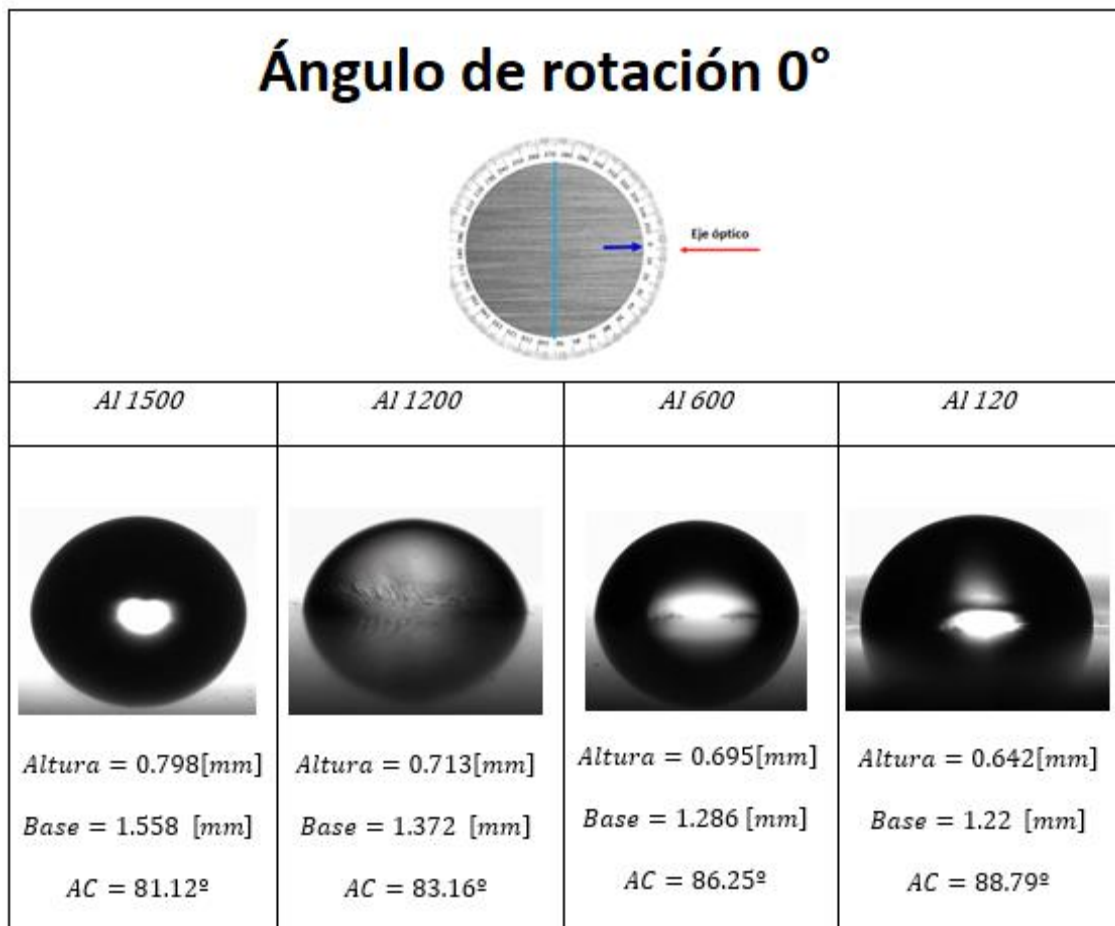


Nota. La imagen anterior la flecha azul muestra la orientación de la textura y la posición inicial de de la muestra, se observa como va cambiando con cada ángulo de rotación.

Con el incremento de la rugosidad superficial, se observa una variación en la forma de la gota y en los valores del ángulo de contacto, incluso manteniendo constante el ángulo de rotación. A continuación, la Figura 67 muestra cómo varía el perfil de la gota al aumentar la rugosidad, considerando dos orientaciones representativas: 0° , correspondiente a la vista paralela a la dirección de la textura, y 90° , correspondiente a la vista perpendicular a esta.

Figura 67

Variación del perfil de la gota en función de la rugosidad superficial.



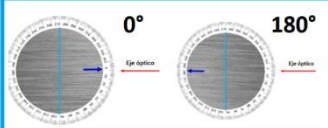
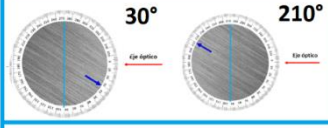
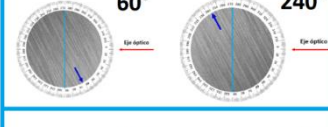
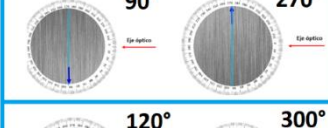
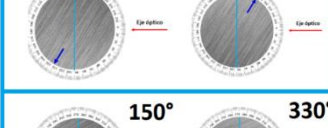

Nota. Imágenes obtenidas para 0° de cada probeta con su respectiva gota

Al rotar el sistema, la línea de ángulo de contacto (L.A.C) se mantiene fija, mientras que en cada rotación esta línea corta diferentes secciones de la línea de contacto. Dado que el sistema

presenta simetría geométrica, existen pares de ángulos que comparten la misma L.A.C., como ocurre en 0° y 180° , o con 90° y 270° . Por ello, los valores medidos del ángulo de contacto en estos pares resultaron muy similares. Para representar estos resultados de manera más consistente, se calcularon los promedios entre cada ángulo y su opuesto, obteniendo así seis pares de datos representativos (ver Figura 68).

Figura 68

Pares de ángulos de rotación.

	0° 180°	Ángulo de rotación 0° y 180°
	30° 210°	
	60° 240°	Ángulo de rotación 60° y 240°
	90° 270°	
	120° 300°	Ángulo de rotación 120° y 300°
	150° 330°	

Una vez obtenidos los valores del ángulo de contacto para cada imagen, se procedió a calcular el promedio correspondiente a cada condición. Los resultados se presentan en la Tabla 7, la columna de la izquierda representa el ángulo de rotación de la muestra, mientras la de la derecha, muestra el valor promedio del ángulo de contacto, calculado a partir de las imágenes correspondientes.

Tabla 7

Datos experimentales para aluminio tratado con lija 1500.

Ángulo de rotación [°]	Ángulo de contacto Al 1500[°]
0-180	81.12
30-210	79.74
60-240	80.53
90-270	82.24
120-300	81.59
150-330	80.94

Datos experimentales del ángulo de contacto en función de la rugosidad

En esta sección se presentan los resultados experimentales correspondientes a la medición del ángulo de contacto en función del ángulo de rotación para cada una de las probetas con diferente rugosidad superficial. Estos datos permiten observar cómo la orientación de la muestra, respecto a la dirección de la textura, influye en la magnitud del ángulo de contacto. Esta información es fundamental para comprender el comportamiento de la mojabilidad en superficies con rugosidad anisotrópica. Los valores presentados en la corresponden a las mediciones del ángulo de contacto en función del ángulo de rotación de la muestra, permitiendo analizar cómo la orientación de la superficie influye en la mojabilidad del sistema.

Tabla 8

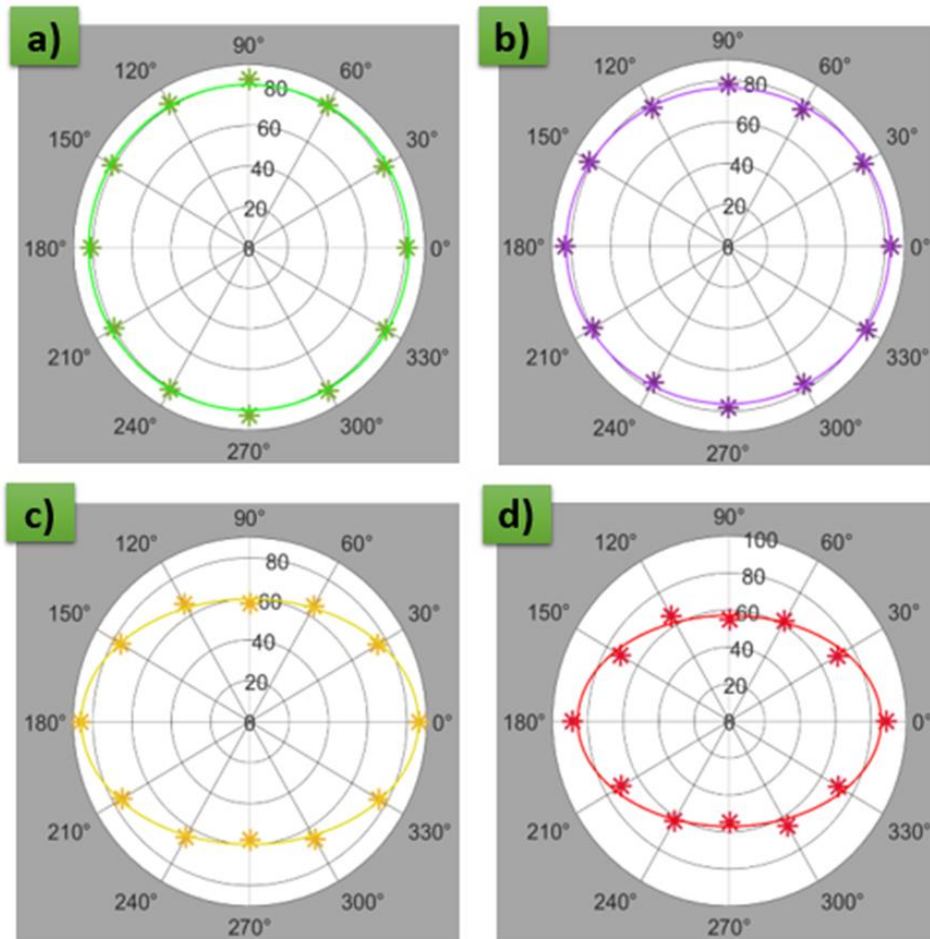
Influencia de la orientación superficial en el ángulo de contacto de cada probeta de aluminio.

Ángulo de rotación	Al 1500	Al 1200	Al 600	Al 120
0°-180°	81.12°	83.16°	86.25°	88.76°
30°-210°	79.74°	79.62°	76.16°	70.54°
60°-240°	80.53°	76.16°	65.02°	62.35°
90°-270°	82.24°	78.23°	57.61°	54.74°
120°-300°	81.59°	77.12°	66.38°	65.54°
150°-330°	80.94°	81.59°	75.9°	71.23°

Para analizar los datos eliminando la influencia directa de la rotación de la probeta, se representaron en coordenadas polares. En la Figura 69, la coordenada radial r corresponde a los valores del ángulo de contacto, mientras que la coordenada angular θ representa el ángulo de rotación de la muestra.

Figura 69

Influencia de la orientación superficial en el ángulo de contacto: representación en coordenadas polares



Nota. La imagen muestra los valores de ángulos de contacto medidos para lijas de número de grano A) 1500, B) 1200, C) 600, D) 120

Al representar el ángulo de contacto en función de la rotación de la muestra mediante coordenadas polares, se observa un patrón elíptico cuya forma varía con la rugosidad superficial. En superficies con baja rugosidad, la gráfica tiende a un contorno más circular, lo que indica un comportamiento más isotrópico. Sin embargo, a medida que la rugosidad aumenta, la elipse se alarga en dirección horizontal (paralela a la textura) y se estrecha en la dirección vertical (perpendicular a la textura), evidenciando un incremento en la anisotropía de la mojabilidad.

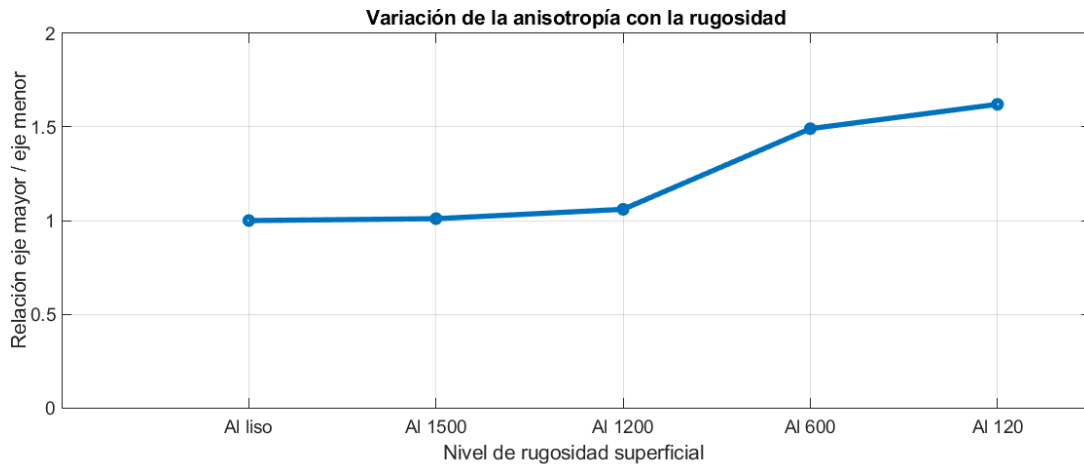
Esta evolución elíptica refleja que la orientación superficial influye significativamente en la magnitud del ángulo de contacto: este es mayor cuando la gota se alinea con la dirección de la textura y menor cuando se encuentra perpendicular a ella. El grado de alargamiento de la elipse puede considerarse un indicador tanto cualitativo como cuantitativo del efecto de la rugosidad sobre la anisotropía del sistema sólido-líquido.

Con el fin de cuantificar el grado de anisotropía observado en las gráficas polares del ángulo de contacto, se calculó la relación entre el eje mayor y el eje menor de cada elipse obtenida para cada una de las probetas. Esta razón geométrica se consideró como un índice de anisotropía de mojabilidad y se graficó en función de la rugosidad superficial (ver Figura 70).

Los resultados muestran una tendencia creciente, lo que indica que, a medida que aumenta la rugosidad, se intensifica la anisotropía del sistema. Específicamente, las superficies más rugosas presentan una mayor diferencia entre los valores máximos y mínimos del ángulo de contacto según la orientación, reflejando una fuerte dependencia direccional de la mojabilidad.

Figura 70

Índice de anisotropía de mojabilidad según nivel de rugosidad.



1.24 Evaluación topográfica para la extracción de los parámetros R_{LO} y R_{mr}

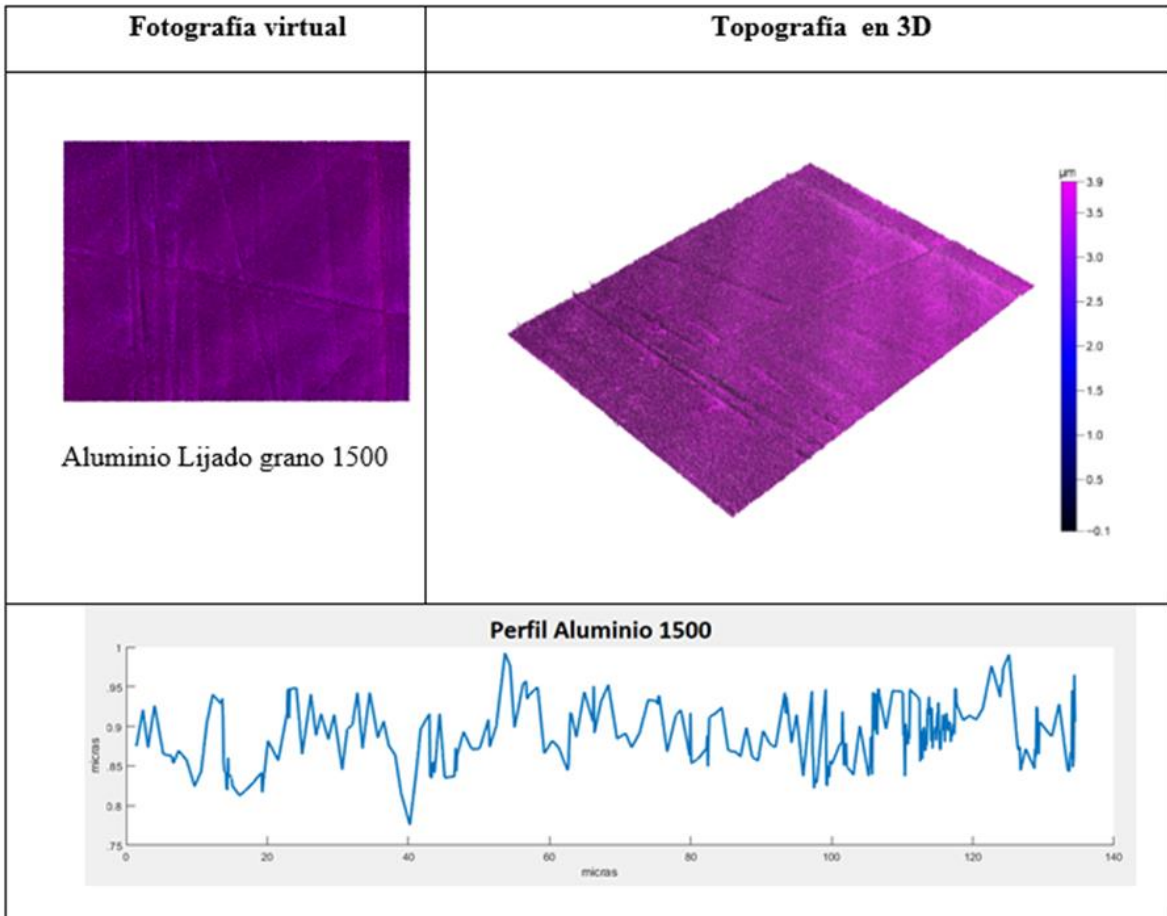
Con el objetivo de complementar el análisis del comportamiento del ángulo de contacto, se realizó la caracterización topográfica de cada una de las probetas mediante la reconstrucción tridimensional de sus superficies. Esta reconstrucción 3D permite visualizar con mayor precisión las características topográficas asociadas a la rugosidad, tales como la orientación, la distribución de alturas y la anisotropía de la textura.

El análisis topográfico es fundamental no solo para comprender cómo las variaciones físicas de la superficie influyen en la mojabilidad, sino también para extraer perfiles de rugosidad representativos que permitan calcular los parámetros requeridos por el modelo de Kubiak, específicamente R_{LO} (porcentaje de longitud desarrollada del perfil) y R_{mr} (relación del material, indica el porcentaje de contacto efectivo entre el líquido y el sólido), los cuales están directamente vinculados a la predicción teórica del ángulo de contacto sobre superficies rugosas.

A continuación, se presenta la reconstrucción topográfica de cada probeta, elaborada a partir de los datos obtenidos mediante el barrido con el microscopio de interferencia de luz blanca.

Figura 71

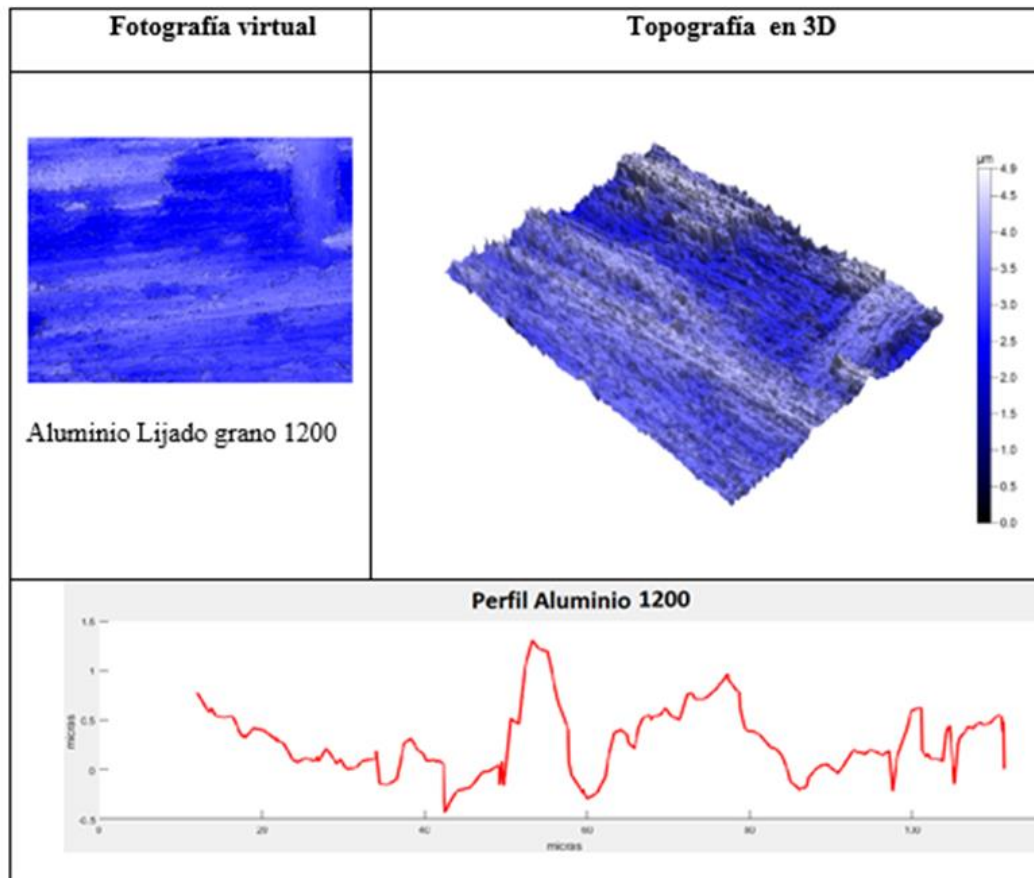
Topografía aluminio tratado con lija 1500.



Nota. Se presenta el perfil de rugosidad del Al-1500, perfil hecho trazando la diagonal creciente sobre la imagen virtual.

Figura 72

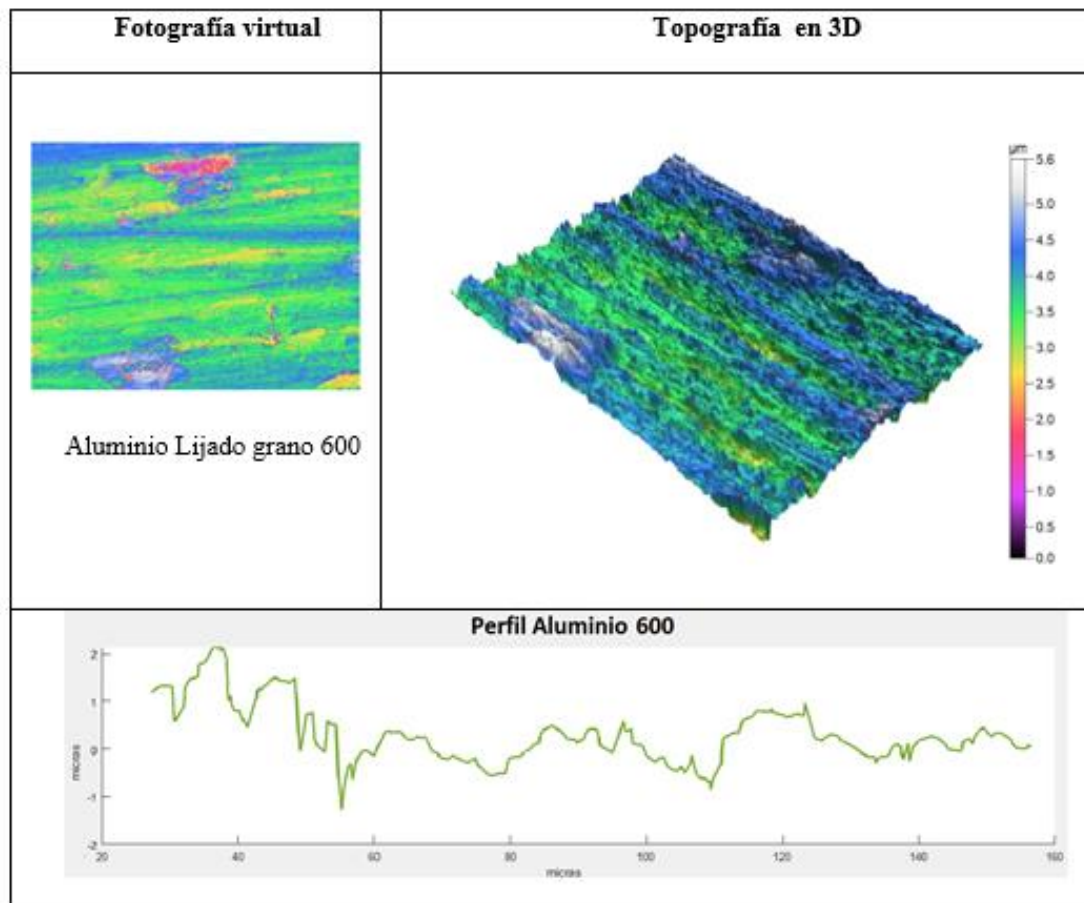
Topografía aluminio tratado con lija 1200.



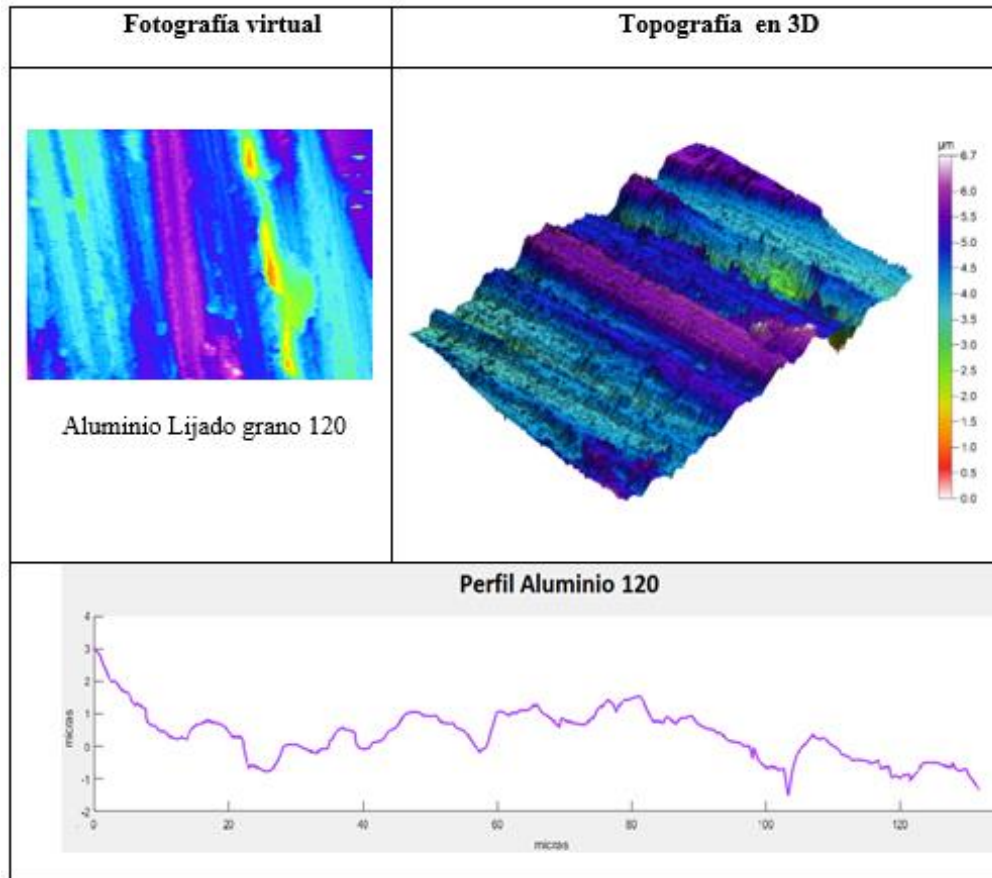
Nota. Se presenta el perfil de rugosidad del Al-1200, perfil hecho trazando la diagonal creciente sobre la imagen virtual.

Figura 73

Topografía aluminio tratado con lija 600



Nota. Se presenta el perfil de rugosidad del Al-600, perfil hecho trazando la diagonal creciente sobre la imagen virtual.

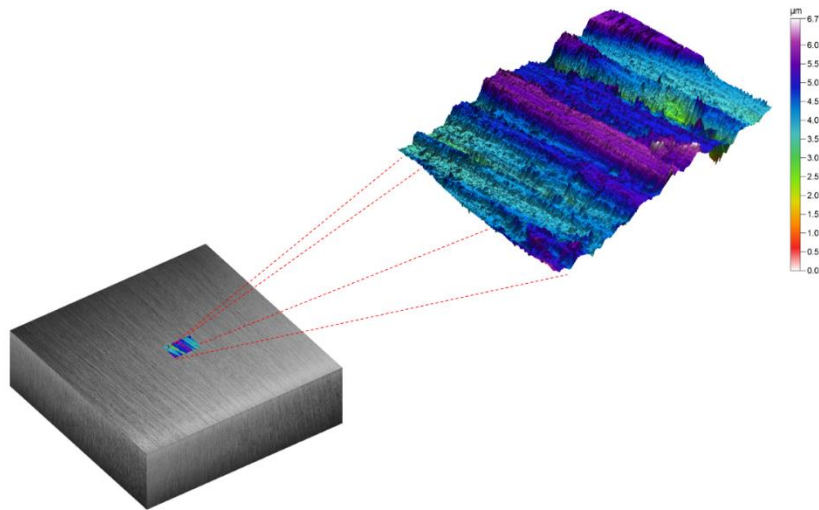
Figura 74*Topografía aluminio tratado con lija 120*

Nota. Se presenta el perfil de rugosidad del Al-120, perfil hecho trazando la diagonal creciente sobre la imagen virtual.

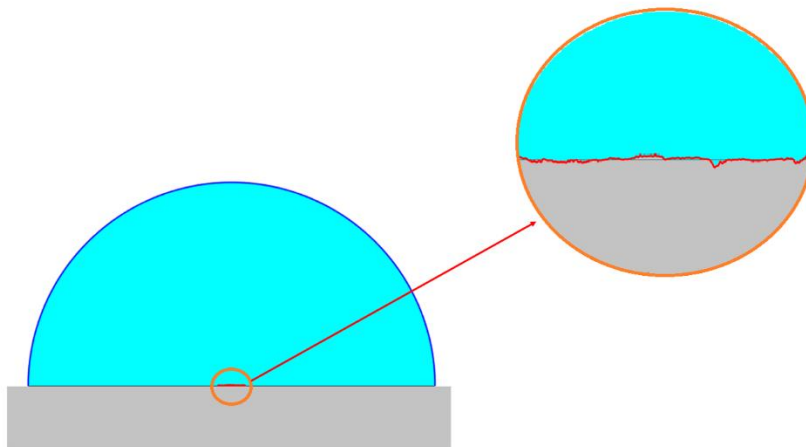
El microscopio realizó un barrido sobre la muestra, abarcando una región de 131,815 μm x 98,835 μm . Dado que la base de la gota es considerablemente mayor que el área analizada, es necesario optimizar el proceso de extracción de los parámetros R_{Lo} y R_{mr} , de manera que estos representen adecuadamente toda la superficie.

Figura 75

Relación superficie de la probeta y región barrida del microscopio.

**Figura 76**

Perfil de la gota sésil en comparación con el perfil de rugosidad obtenido con la región barrida del microscopio.



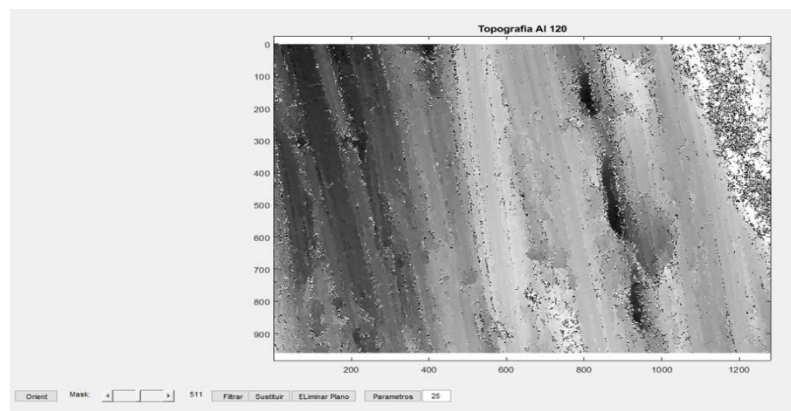
La extracción de los parámetros topográficos se llevó a cabo mediante una aplicación desarrollada en MATLAB, la cual permite cargar la micrografía correspondiente a una probeta. Esta herramienta incorpora un proceso de filtrado que elimina puntos de discontinuidad y datos aislados que no representan la topografía real de la superficie.

Tras aplicar este proceso de limpieza, se obtiene una imagen más depurada, con menor ruido y menos anomalías, lo que mejora la calidad del perfil para el cálculo de los parámetros. Para compensar posibles errores locales, el programa realiza un análisis estadístico a partir de múltiples cortes transversales sobre la superficie, permitiendo obtener valores más representativos de los parámetros requeridos.

Posteriormente, la imagen se rota digitalmente en intervalos definidos, con el fin de evaluar la evolución de los parámetros R_{Lo} y R_{mr} en función del ángulo de rotación de cada probeta. Este procedimiento permite establecer una relación directa entre la orientación de la textura y la mojabilidad modelada.

Figura 77

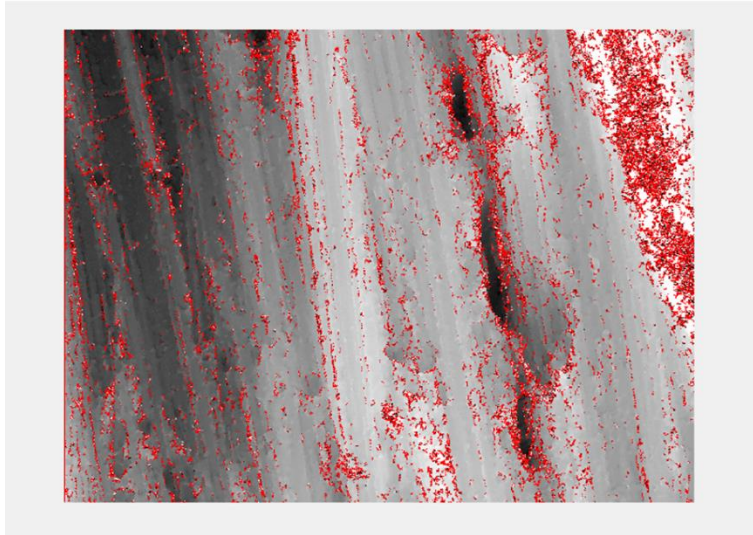
Micrografía de la probeta Al-120 en MATLAB.



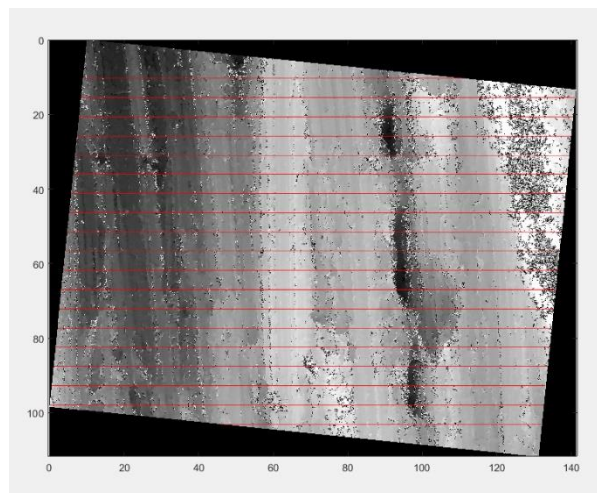
Nota. En esta ventana se selciona el valor de corte para hallar el parametro R_{mr} , el artículo sugiere que se haga el corte a 25 % .

Figura 78

Proceso de eliminación de los puntos aislados y puntos de discontinuidad.

**Figura 79**

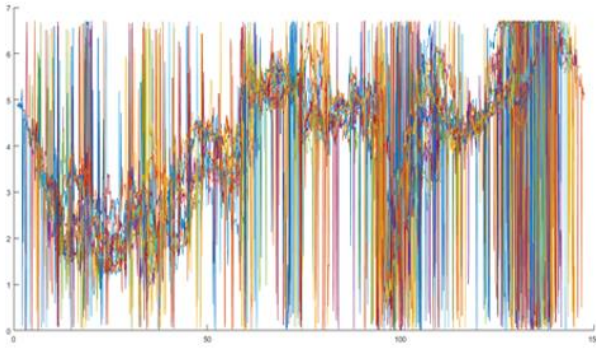
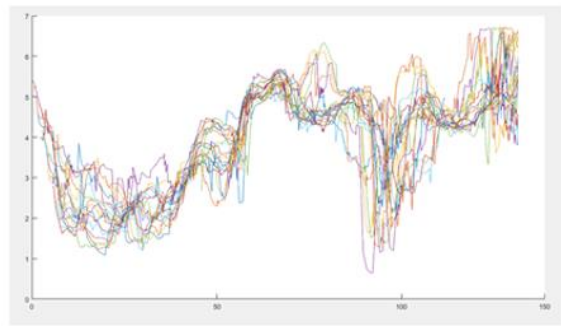
Rotación de la micrografía y trazado de múltiples cortes para extraer los perfiles de rugosidad en la dirección de rotación.



Nota. Micrografía del Al-120 orientada con el ángulo de rotación de la probeta a 0°.

Figura 80

Perfiles de rugosidad del Al-120 a 0°.

Perfiles de rugosidad sin filtrar**Perfiles de rugosidad filtrado**

Nota. Perfiles de rugosidad de cada corte hechos a la micrografía del Al-120

Con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva del modelo propuesto por Kubiak, se calcularon los valores teóricos del ángulo de contacto utilizando los parámetros topográficos obtenidos previamente para cada probeta. En este análisis, se emplearon los valores de R_{Lo} y R_{mr} extraídos de las reconstrucciones topográficas, considerando la orientación angular correspondiente a cada rotación de la muestra.

Dado que los ángulos de contacto modelados inicialmente no coincidían con los valores experimentales, se ajustó la altura a partir de la cual se calcula el parámetro R_{mr} , con el objetivo de lograr una mejor correspondencia entre los resultados teóricos y los datos medidos. Para este ajuste se realizaron dos pruebas específicas: una con la muestra orientada a 0° y otra a 90° de rotación, ya que estos ángulos representan direcciones clave en la textura superficial. En particular, son los casos donde la anisotropía es más notoria y la rugosidad superficial presenta contrastes significativos, lo que los convierte en condiciones representativas para validar el modelo.

Tabla 9

Ajuste de datos experimentales y modelados del ángulo de contacto (orientación 0°).

Ángulo de rotación 0°	R_{Lo}	R_{mr}	% de corte	Ángulo modelado	Ángulo medido
Al 1500	7.94	80.08	25	81.13	88.32
Al 1200	6.24	72.05	25	83.14	76.47
Al 600	6.81	50	25	86.65	86.54
Al 120	7.53	42.91	25	89.18	88.98

Tabla 10

Ajuste de datos experimentales y modelados del ángulo de contacto (orientación 90°).

Ángulo de rotación 90°	R_{Lo}	R_{mr}	% de corte	Ángulo modelado	Ángulo medido
Al 1500	16.22	80.38	25	82.2	86.71
Al 1200	16.6	802	25	78.18	78.22
Al 600	40.61	92.3	25	57.56	96.82
Al 120	52.7	82.12	25	55.7	98.29

Al analizar los valores de los parámetros R_{Lo} y R_{mr} , junto con el porcentaje de corte utilizado para su cálculo, se detectó una inconsistencia en los resultados. Para resolver este problema, se modificó el procedimiento mediante el desarrollo de una función que permite estimar

el porcentaje de zona de aire por debajo del nivel de corte especificado; de este valor se deduce el porcentaje de material. El porcentaje de corte (% Corte) se mide desde la base hacia la parte superior a lo largo del eje Z.

El uso adecuado de la función requiere seguir un orden específico: primero se orienta la imagen topográfica, luego se ajusta el deslizador para suprimir picos, se aplica el filtrado para verificar su efectividad, y finalmente se sustituye el perfil corregido. Este procedimiento garantiza que la máscara de datos se genere correctamente. Una vez completado este proceso, se suprime el plano medio de la superficie y se procede al cálculo de los parámetros topográficos.

A partir de este proceso, se obtuvieron los valores necesarios para aplicar el modelo de Kubiak y calcular el ángulo de contacto teórico. A continuación, se presentan las tablas con los resultados experimentales y modelados para distintas probetas, junto con sus respectivas gráficas comparativas. Estas representaciones permiten evaluar el grado de ajuste entre los valores medidos y los estimados por el modelo, así como observar la influencia de la rugosidad superficial y la orientación angular en la mojabilidad del sistema.

1.25 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 0° - 180° de rotación

La Tabla 11 muestra los valores del ángulo de contacto medido experimentalmente para distintas probetas con diferentes niveles de rugosidad superficial, todas evaluadas a una orientación de 0° - 180° de rotación. Junto a estos datos, se presentan los ángulos de contacto modelados a partir de los parámetros topográficos obtenidos para esta misma orientación, calculados a partir de los perfiles de rugosidad correspondientes a esa misma dirección de rotación.

Tabla 11

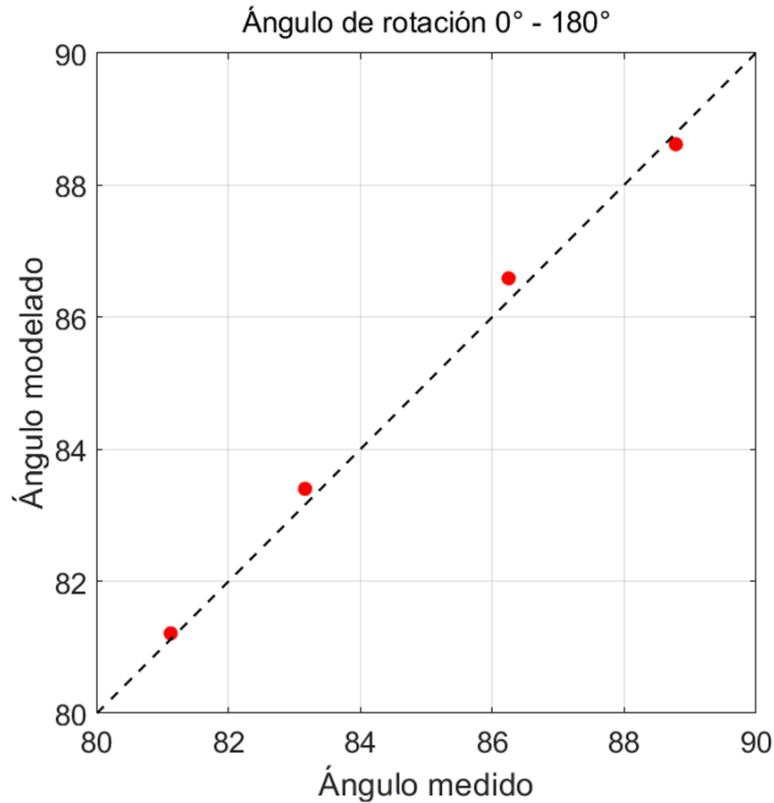
Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 0°-180°).

Ángulo de rotación 0°-180°	R_{Lo}	R_{mr}	% de aire	Ángulo modelado	Ángulo medido
Al 1500	7.94	90.98	3.3	81.22	81.12
Al 1200	6.24	89.42	5.39	83.4	76.47
Al 600	6.81	84.52	4.43	86.59	86.25
Al 120	7.53	81.15	4.15	88.62	88.79

La Figura 81 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los modelados, permitiendo evaluar la precisión del modelo.

Figura 81

Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 0°-180°).



1.26 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 30°- 210° de rotación

La Tabla 12 muestra los valores del ángulo de contacto medido experimentalmente para distintas probetas con diferentes niveles de rugosidad superficial, todas evaluadas a una orientación de 30°- 210° de rotación. Junto a estos datos, se presentan los ángulos de contacto modelados a

partir de los parámetros topográficos obtenidos para esta misma orientación, calculados a partir de los perfiles de rugosidad correspondientes a esa misma dirección de rotación.

Tabla 12

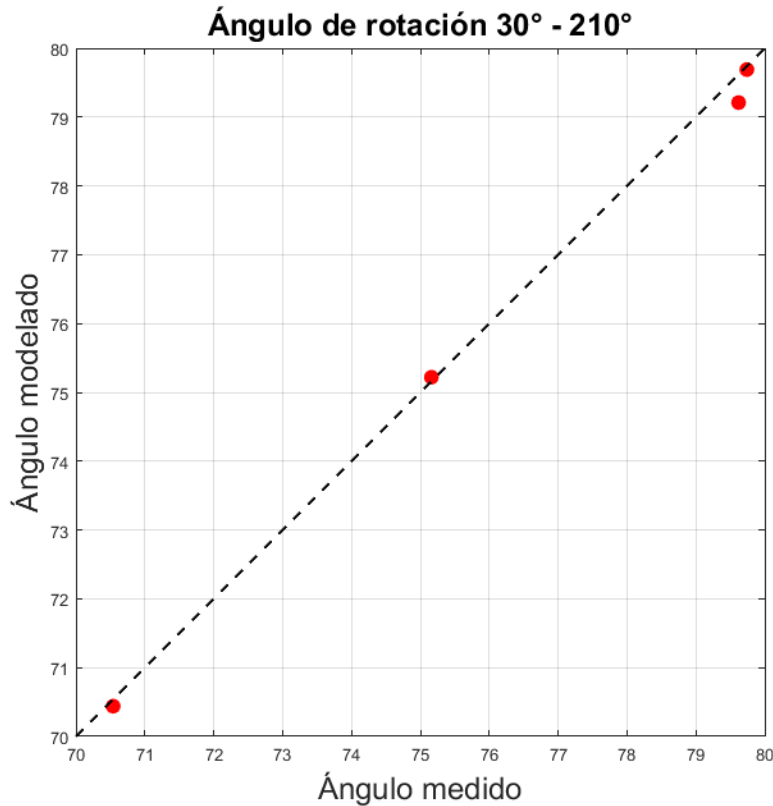
Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 30°-210°)

Ángulo de rotación	R_{Lo}	R_{mr}	% de aire	Ángulo modelado	Ángulo medido
30°-210°					
Al 1500	9.84	91.46	3.45	79.69	79.74
Al 1200	11.85	90.44	3.26	79.21	79.62
Al 600	12.1	95.41	4.03	75.22	75.16
Al 120	28.26	88.67	4.61	70.44	70.54

La Figura 82 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los modelados, permitiendo evaluar la precisión del modelo.

Figura 82

Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 30°-210°).



1.27 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 60°- 240° de rotación

La Tabla 13 muestra los valores del ángulo de contacto medido experimentalmente para distintas probetas con diferentes niveles de rugosidad superficial, todas evaluadas a una orientación de 60°- 240° de rotación. Junto a estos datos, se presentan los ángulos de contacto modelados a partir de los parámetros topográficos obtenidos para esta misma orientación, calculados a partir de los perfiles de rugosidad correspondientes a esa misma dirección de rotación.

Tabla 13

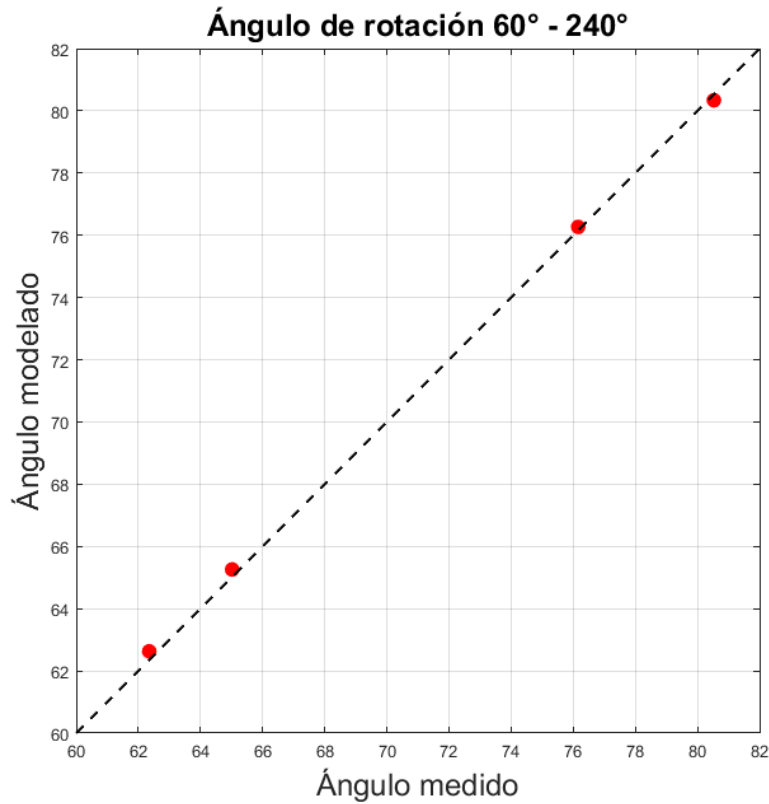
Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial. (orientación 60°-240°)

Ángulo de rotación	R_{Lo}	R_{mr}	% de aire	Ángulo modelado	Ángulo medido
60°-240°					
Al 1500	14.56	86.86	3.32	80.34	80.53
Al 1200	27.24	82.85	5.24	76.27	76.16
Al 600	27	95.17	1.61	65.26	65.02
Al 120	31.16	94.83	2.81	62.63	62.35

La Figura 83 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los modelados, permitiendo evaluar la precisión del modelo.

Figura 83

Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 60°-240°).



1.28 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 90°- 270° de rotación

La Tabla 14 muestra los valores del ángulo de contacto medido experimentalmente para distintas probetas con diferentes niveles de rugosidad superficial, todas evaluadas a una orientación de 90°- 270° de rotación. Junto a estos datos, se presentan los ángulos de contacto modelados a

partir de los parámetros topográficos obtenidos para esta misma orientación, calculados a partir de los perfiles de rugosidad correspondientes a esa misma dirección de rotación.

Tabla 14

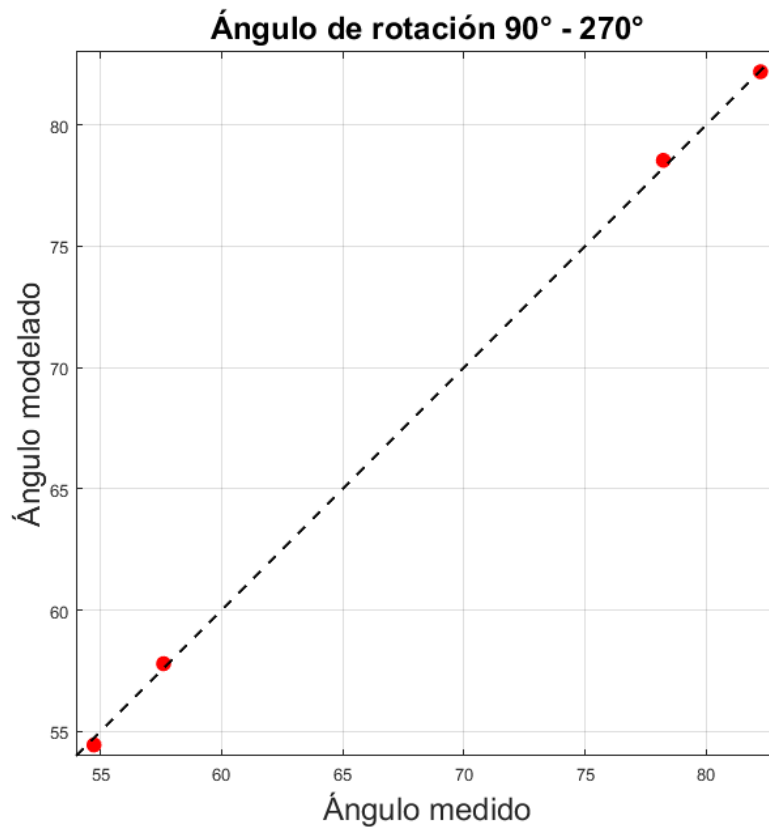
Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial. (orientación 90°-270°).

Ángulo de rotación	R_{Lo}	R_{mr}	% de aire	Ángulo modelado	Ángulo medido
90°-270°					
Al 1500	16.22	83.28	4.59	82.19	80.53
Al 1200	16.6	87.59	3.33	76.27	76.16
Al 600	40.61	92.89	2.08	65.26	65.02
Al 120	52.7	88.24	4.02	62.63	62.35

La Figura 84 Figura 83 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los modelados, permitiendo evaluar la precisión del modelo.

Figura 84

Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 90°-270°).

**1.29 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 120°- 300° de rotación**

La Tabla 15 muestra los valores del ángulo de contacto medido experimentalmente para distintas probetas con diferentes niveles de rugosidad superficial, todas evaluadas a una orientación

de 120°- 300° de rotación. Junto a estos datos, se presentan los ángulos de contacto modelados a partir de los parámetros topográficos obtenidos para esta misma orientación, calculados a partir de los perfiles de rugosidad correspondientes a esa misma dirección de rotación.

Tabla 15

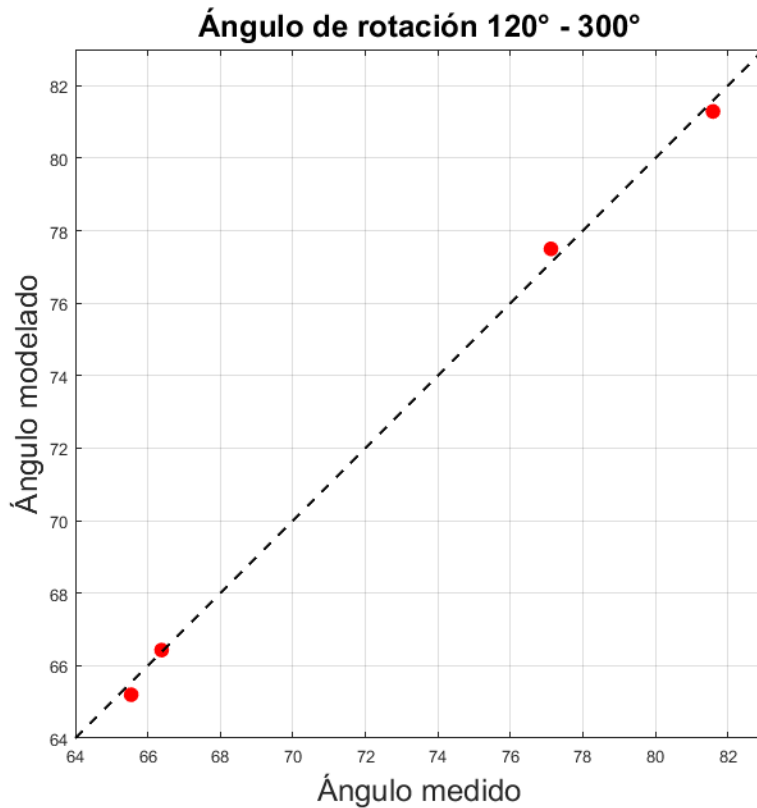
Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 120°- 300°).

Ángulo de rotación	R_{Lo}	R_{mr}	% de aire	Ángulo modelado	Ángulo medido
120°-300°					
Al 1500	12.24	87.41	3.18	81.29	81.59
Al 1200	21.86	85.05	4.17	77.5	77.12
Al 600	26.17	94.53	2.47	66.43	66.38
Al 120	31.16	92.21	3.01	65.2	65.54

La Figura 85 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los modelados, permitiendo evaluar la precisión del modelo.

Figura 85

Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 120°- 300°).



1.30 Influencia de la rugosidad en la medición del ángulo de contacto a 150°- 330° de rotación

La Tabla 16 muestra los valores del ángulo de contacto medido experimentalmente para distintas probetas con diferentes niveles de rugosidad superficial, todas evaluadas a una orientación de 150°- 330° de rotación. Junto a estos datos, se presentan los ángulos de contacto modelados a

partir de los parámetros topográficos obtenidos para esta misma orientación, calculados a partir de los perfiles de rugosidad correspondientes a esa misma dirección de rotación.

Tabla 16

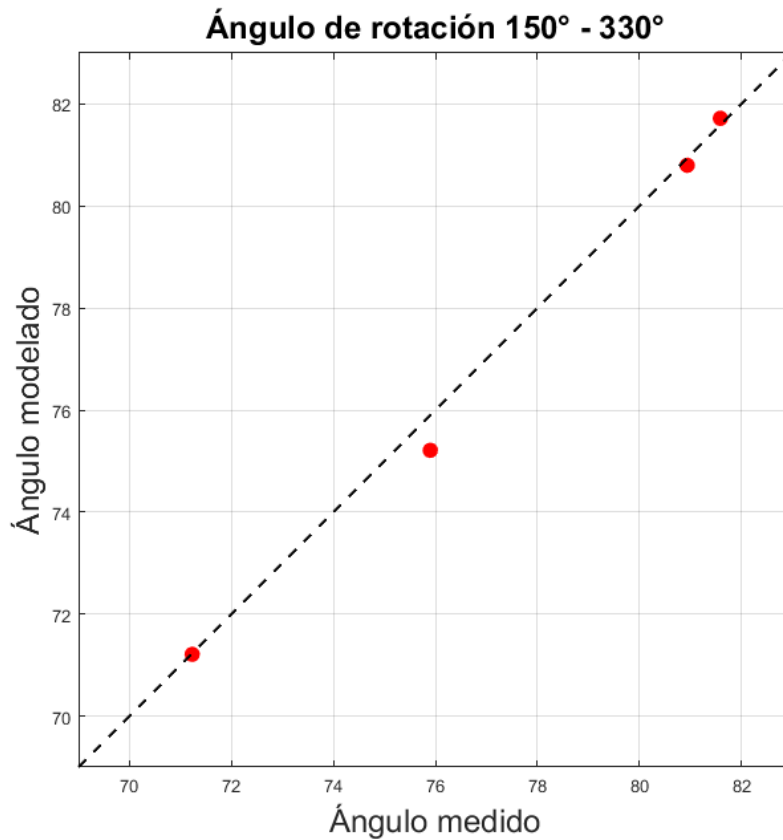
Valores experimentales y modelados del ángulo de contacto en función de la rugosidad superficial (orientación 150°- 330°).

Ángulo de rotación	R_{Lo}	R_{mr}	% de aire	Ángulo modelado	Ángulo medido
150°-330°					
Al 1500	8.45	91.02	3.48	80.88	80.94
Al 1200	10.29	88.38	3.52	81.72	81.59
Al 600	13.4	94.32	3.94	75.21	75.9
Al 120	26.17	89.28	4.37	71.21	71.23

La Figura 86 muestra el ajuste entre los valores experimentales y los modelados, permitiendo evaluar la precisión del modelo.

Figura 86

Ajuste de valores experimentales y teóricos del ángulo de contacto según la rugosidad (orientación 150°- 330°).

**Conclusiones**

Se logró construir y calibrar con éxito un goniómetro de bajo costo para la medición del ángulo de contacto mediante el método de la gota séstil en equilibrio. El sistema desarrollado demostró ser fácil de operar y capaz de obtener mediciones precisas, gracias a la incorporación de una lente telecéntrica que elimina errores por perspectiva y distorsión en la imagen de la gota. A

pesar de su alta precisión, el costo total de implementación fue significativamente inferior al de los equipos comerciales disponibles, lo que convierte a este instrumento en una alternativa accesible y funcional para estudios de mojabilidad y caracterización de superficies.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que el porcentaje de aire presente en la medición tiene un impacto directo en la forma de la esfera, incrementando la presión ejercida y, por consiguiente, el ángulo de contacto. Este comportamiento es particularmente notable en superficies con mayor rugosidad. En contraste, en topografías con baja rugosidad, el efecto del % de aire es mínimo, lo que se refleja en una mayor concordancia entre los valores medidos experimentalmente y los calculados teóricamente.

Estos hallazgos sugieren que el ajuste del % de aire, como se plantea en este trabajo, podría representar un método experimental viable para estimar el volumen real de aire que ejerce presión desde las cavidades de una superficie rugosa hacia la esfera. Esta propuesta abre una línea interesante de investigación futura, orientada a entender con mayor precisión el papel del aire atrapado en interfaces sólido-líquido, especialmente en materiales con micro y nanoestructuras superficiales.

Con el propósito de cuantificar el grado de anisotropía presente en la distribución del ángulo de contacto, se propuso en esta tesis un índice de anisotropía de mojabilidad, definido como la relación entre el eje mayor y el eje menor de las elipses obtenidas a partir de las gráficas polares de ángulo de contacto para cada probeta. Este índice, desarrollado por los autores de este trabajo, fue graficado en función de la rugosidad superficial con el fin de analizar su evolución.

Los resultados obtenidos muestran una tendencia creciente del índice con respecto al aumento de rugosidad, lo que evidencia que superficies más rugosas presentan una mayor variación del ángulo de contacto según la orientación. Este comportamiento confirma una

intensificación de la anisotropía del sistema, donde la mojabilidad adquiere un carácter direccional dependiente de la textura superficial.

Recomendaciones

Se recomienda la construcción de una estructura complementaria al instrumento para medir ángulo de contacto, que permita incorporar nuevas configuraciones de medición. Esta debería incluir una plataforma inclinable, con el fin de evaluar el ángulo de contacto de avance y retroceso, lo cual es fundamental para el análisis de mojabilidad dinámica. Además, se sugiere integrar un soporte móvil para el lente telecéntrico, que permita adaptar el sistema a diferentes configuraciones ópticas y facilite, por ejemplo, la medición de tensión superficial mediante métodos indirectos. Finalmente, se propone desarrollar una configuración experimental basada en el uso de una balanza de Wilhelmy, que permita calcular el ángulo de contacto a partir de la fuerza necesaria para extraer una lámina sumergida en un líquido, ampliando así las capacidades del sistema hacia métodos de medición por fuerza.

Se recomienda aplicar el índice de anisotropía de mojabilidad propuesto en este trabajo a otros materiales y patrones de rugosidad, con el fin de validar su utilidad como herramienta comparativa en estudios de caracterización superficial y comportamiento de mojabilidad en sistemas sólidos con texturas direccionales.

Se recomienda utilizar el modelo de Kubiak en conjunto con el cálculo del parámetro R_{mr} según la metodología propuesta en esta tesis. Para mejorar la representatividad del modelo, se sugiere además que la región de análisis topográfico seleccionada sea notablemente mayor que el

área ocupada por la gota, de modo que se garantice una caracterización más robusta y estadísticamente significativa de la rugosidad superficial que influye en la mojabilidad.

Referencias Bibliográficas

- Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1967). *Physical chemistry of surfaces* (Vol. 150, p. 180). New York: Interscience publishers.
- De Groot, P. (2015). Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. *Advances in Optics and Photonics*, 7(1), 1-65.
- Jung, Y. C., & Bhushan, B. (2006). Contact angle, adhesion and friction properties of micro-and nanopatterned polymers for superhydrophobicity. *Nanotechnology*, 17(19), 4970.
- Lévy, É. (1992). *Diccionario Akal de física* (Vol. 7). Ediciones Akal.
- Lyklema, J. (2005). *Fundamentals of interface and colloid science: soft colloids* (Vol. 5). Elsevier.
- Michael, D. H., & Williams, P. G. (1977). The equilibrium and stability of sessile drops. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 354(1676), 127–136. <https://doi.org/10.1098/rspa.1977.0060>
- Norros, I. (1995). On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(6), 953-962. <https://doi.org/10.1109/49.400651>
- Park, J. (2019). A study on the contact angles of a water droplet on smooth and rough solid surfaces. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 91, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.10.012>
- Quére, D. (2008). Wetting and roughness. *Annual Review of Materials Research*, 38, 71–99. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.38.060407.132434>

- Ruiz-Cabello, F. J. M. (2009). *Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómenos de mojado*. Editorial de la Universidad de Granada.
- Schuster, A.Y., & Rosenberger, M. R. (2018). Construction and calibration of a goniometer to measure contact angles and calculate the surface free energy in solids with uncertainty analysis. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 87, 205-215.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.10.012>
- Whyman, G. (2008). The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon. *Chemical Physics Letters*, 450(4-6), 355-359.
- Wilcoxon, F. (1992). Individual comparisons by ranking methods. En *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution* (pp. 196-202). Springer.
- Wu,S.(2017).Polymer Interface and Adhesion. En *Routledge eBooks*.
<https://doi.org/10.1201/9780203742860>
- Young, T. (1805). III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65–87.