



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Mejora de las propiedades hidrófugas del uniforme de infantes
de marina*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro José Albacete Artacho

DIRECTORES: Jorge Feijoo Conde

Jesús del Val García

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Mejora de las propiedades hidrófugas del uniforme de infantes
de marina*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como principal objetivo mejorar las propiedades hidrofóbicas e hidrorrepelentes del tejido empleado actualmente en los uniformes de la Infantería de Marina Española, a fin de obtener una prenda novedosa capaz de conservar el calor e impedir la entrada de agua y humedad del medio exterior.

Los recientes avances en nanotecnología han permitido entre otras muchas aplicaciones, modificar mediante tratamientos químicos y físicos la superficie e incluso la estructura interna de un tejido para otorgarle nuevas propiedades, capaces de mejorar el comportamiento hidrofóbico de la prenda en cuestión.

La aplicación de nanopartículas o la modificación de la estructura de un tejido a nivel nanométrico, son uno de los nuevos campos de estudio de la nanotecnología. En el presente estudio se evalúa la eficacia de cuatro nano recubrimientos hidrofugantes de diferente composición química, comparando las propiedades hidrofóbicas que pueden llegar a conferir al tejido del uniforme de campaña de los infantes de marina. Además, se analiza la capacidad hidrofóbica que aporta a la tela la generación de una microrugosidad superficial hidrorrepelente mediante diferentes tipos de láser.

Finalmente, se evalúa la combinación de ambos tratamientos, químico y físico. Para ello se seleccionan aquellos que mejores resultados ofrezca, analizando la eficacia de hidrofugación a través de medidas de ángulos de contacto y en algunos tratamientos, concretamente los químicos, se evalúa la penetrabilidad y durabilidad de los mismos frente a la acción de agentes externos.

Como conclusión principal de este proyecto, se confirmó la eficacia del tratamiento químico como técnica fundamental de mejora hidrofuga y por el contrario se rechazó el tratamiento físico de micro-texturizado láser por la escasa mejora experimentada y el deterioro inducido sobre la tela procesada.

PALABRAS CLAVE

Hidrorrepelente, Hidrofóbico, Hidrofugante, Nanotecnología, Microrugosidad.

AGRADECIMIENTOS

Sirvan estas palabras para agradecer a todas las personas que de una manera u otra han dado impulso a mi proceso de formación y crecimiento personal, y que de forma directa desde las aulas o indirecta desde la distancia, han contribuido a forjar en mi una personalidad perseverante capaz de superar los retos planteados y los objetivos tanto académicos como personales que han movido mi vida

En primer lugar, y como no podría ser de otra manera, mis primeras palabras de agradecimiento van especialmente dirigidas a mi familia, por el soporte moral ofrecido y sobre todo por su paciencia e insuperable capacidad de comprensión.

A mi hermana, Lidia Albacete Artacho, por su complicidad, tenacidad y actitud abierta a prestar siempre toda su ayuda con el mejor esfuerzo y positividad posible. Expresar toda mi gratitud y admiración por su constancia y ejemplo de superación permanente en la persecución diaria de sus objetivos y aspiraciones en la vida.

A mi padre, Juan Carlos Albacete Fernández, que representa la figura de referencia de la cual parte mi carrera militar, mi inclinación por las Fuerzas Armadas y el servicio a España. Quiero mostrar mis agradecimientos más sinceros por la educación recibida y su postura desinteresada a ofrecerme toda su ayuda siempre que la situación lo ha requerido.

A mi madre, Ana María Artacho del Pino, que con su esfuerzo, cuidado atento y dedicación incansable ha hecho posible mi evolución y desarrollo personal, por lo que mis palabras de agradecimiento más profundas van dirigidas a ella, como persona a la que debo todo lo que soy y lo que tengo. Sin ella nada de lo que he conseguido a lo largo de estos años hubiera sido posible.

En segundo y último lugar, agradecer al personal académico su labor docente, en especial a mis tutores: Don Jorge Feijoo Conde y Don Jesús del Val García.

Agradecer a ambos su trabajo, esfuerzo y dedicación, a pesar de las dificultades y contratiempos sobrevenidos que ha traído consigo la situación de pandemia en la que se ha visto envuelto este Trabajo de Fin de Grado, con motivo del COVID-19.

A mi tutor Don Jorge Feijoo Conde por su disponibilidad y ayuda durante estos meses. Gracias por su espíritu trabajador y el compromiso demostrado todo este tiempo, ayudándome independientemente del día o la hora.

Por último, quería agradecer al profesor Don Jesús del Val García su ayuda desinteresada en numerosos momentos del trabajo, actuando como enlace de unión entre la Universidad de Vigo y los equipos de laboratorio empleados en gran parte de este trabajo, por las dificultades de acceso y restricciones impuestas por la pandemia. Sin su ayuda parte de este trabajo habría resultado imposible llevarla a cabo.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Contenido | 1 |
| Índice de Figuras | 4 |
| Índice de Tablas..... | 8 |
| 1 introducción y objetivos | 13 |
| 1.1 Motivación | 13 |
| 1.2 Objetivos | 14 |
| 1.3 Organización de la memoria | 14 |
| 2 Estado del arte | 17 |
| 2.1 Antecedentes | 17 |
| 2.2 Problemas del uniforme de infantería de marina | 17 |
| 2.3 Explicación de las propiedades de mojado y ángulos de contacto de los sustratos | 19 |
| 2.3.1 Influencia de la microrugosidad superficial en la hidrofobicidad e hidrorrepelencia..... | 21 |
| 2.4 Necesidad de implantar propiedades hidrofóbicas en la ropa..... | 22 |
| 2.5 Métodos y ejemplos de estudio | 23 |
| 2.5.1 Ejemplos de estudio..... | 23 |
| 2.5.2 Métodos de estudio | 25 |
| 2.6 Técnicas para mejorar las propiedades hidrofóbicas | 27 |
| 2.6.1 Producción de nanocomposites..... | 27 |
| 2.6.2 Recubrimientos y películas | 27 |
| 2.6.3 Incorporación de membranas con características nanoscópicas | 31 |
| 3 Desarrollo del TFG..... | 35 |
| 3.1 Etapas del desarrollo del TFG..... | 35 |
| 3.2 Técnicas a desarrollar..... | 37 |
| 3.2.1 Recubrimientos químicos | 37 |
| 3.2.2 Texturizado láser | 37 |
| 3.3 Materiales empleados..... | 38 |
| 3.3.1 Uniforme de Infantería de Marina | 38 |
| 3.3.2 Productos químicos nanohidrofugantes | 39 |
| 3.3.3 Equipos láser empleados..... | 41 |
| 3.4 Metodología | 44 |
| 3.4.1 Tratamiento químico..... | 44 |
| 3.4.2 Tratamiento físico | 54 |
| 3.4.3 Tratamiento conjunto..... | 58 |

| | |
|---|-----|
| 4 Resultados | 59 |
| 4.1 Análisis químico | 59 |
| 4.1.1 Consumo | 59 |
| 4.1.2 Materia seca | 62 |
| 4.1.3 Grados de polimerización | 65 |
| 4.1.4 Ángulos de contacto | 68 |
| 4.1.5 Análisis microscópico..... | 69 |
| 4.1.6 Ciclos térmicos | 72 |
| 4.1.7 Penetrabilidad | 77 |
| 4.1.8 Desorción | 78 |
| 4.2 Análisis físico..... | 80 |
| 4.2.1 Patrones de texturización | 80 |
| 4.2.2 Evaluación y análisis de resultados | 85 |
| 4.3 Análisis conjunto..... | 89 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras | 93 |
| 5.1 Conclusiones | 93 |
| 5.2 Líneas futuras en la Infantería de Marina Española..... | 94 |
| 5.3 Propuestas de mejora | 94 |
| 6 Bibliografía..... | 95 |
| Anexo I: Material de laboratorio | 98 |
| Anexo II: Tablas y resultados de las mediciones | 101 |
| 6.1 Consumos 1ª aplicación | 101 |
| 6.2 Consumos 2ª aplicación | 102 |
| 6.3 Consumos 3ª aplicación | 103 |
| 6.4 Materia seca 1ª aplicación:..... | 105 |
| 6.5 Materia seca 2ª aplicación..... | 106 |
| 6.6 Materia seca 3ª aplicación..... | 107 |
| 6.7 Materia seca global | 109 |
| 6.8 Grados de Polimerización 1ª aplicación..... | 110 |
| 6.9 Grados de Polimerización 2ª aplicación..... | 112 |
| 6.10 Grados de Polimerización 3ª aplicación..... | 113 |
| 6.11 Ángulos de contacto..... | 115 |
| 6.12 Ciclos térmicos..... | 116 |
| 6.13 Desorción | 126 |
| 6.14 Potencias asociadas al amperaje y las frecuencias del láser de CO ₂ | 128 |

| | |
|---|-----|
| Anexo III: Composición y propiedades de los productos | 130 |
| 6.15 Nikwax Cotton Proof | 130 |
| 6.16 Tecnadis Coatex | 131 |
| 6.17 Hendlex Carbon Protect | 132 |
| 6.18 Nasiol | 132 |
| Anexo IV: Fichas técnicas..... | 133 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1 Comparación de tejidos [1]..... | 13 |
| Figura 1-2 Ángulo de contacto superficie Omnifóbica [1] | 14 |
| Figura 2-1 Desembarco anfibio | 18 |
| Figura 2-2 Trajes NBQR con capa exterior hidrofóbica | 18 |
| Figura 2-3 Esquema ángulo de contacto e interfases [3]..... | 19 |
| Figura 2-4 Ángulo de contacto hidrofóbico e hidrofílico [3] | 20 |
| Figura 2-5 Superficie Omnifóbica [22] | 21 |
| Figura 2-6 Tipos de mojado [4]..... | 21 |
| Figura 2-7 Esquema de las fases de humectación en superficies reales con cierta rugosidad mediante los modelos de Wenzel (a), Cassie-Baxter (b) y Nagayama & Zhang (c) [2] | 21 |
| Figura 2-8 Mejora de propiedades de los productos textiles [5] | 23 |
| Figura 2-9 Superficie hidrófoba de la hoja de la flor de Loto [5] | 24 |
| Figura 2-10 Mecanismo de tejido autolimpiable basado en el efecto del Loto [5] (a) gota deslizándose sobre la superficie de una planta. (b) gota deslizándose sobre una hoja de Loto..... | 24 |
| Figura 2-11 Microrugosidad de la piel del Collémbolo [1]..... | 25 |
| Figura 2-12 Perfil Hidrofóbico de la piel del Collémbolo [1]..... | 25 |
| Figura 2-13 Goniómetro digital..... | 25 |
| Figura 2-14 Imagen digital del método de la gota yacente [3]..... | 26 |
| Figura 2-15 Superficie hidrofóbica con nanocomposites (izquierda). Estructura nanométrica del nanocomposite (derecha) [6]..... | 27 |
| Figura 2-16 Esquema de producción de un sistema de impregnación directa | 28 |
| Figura 2-17 Esquema simplificado del proceso de impregnación, secado, curado [5] | 28 |
| Figura 2-18 Representación de un proceso de ensamblaje por capas [5]..... | 29 |
| Figura 2-19 Esquema del proceso sol-gel [10]..... | 30 |
| Figura 2-20 Cámara reactor de plasma [11] | 31 |
| Figura 2-21 Recubrimiento mediante tratamiento de plasma [5]..... | 31 |
| Figura 2-22 Incorporación de membrana de Gore-Tex® con nanopartículas de carbono [5] | 32 |
| Figura 3-1 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del C y el O | 38 |
| Figura 3-2 Gota recién aplicada (izquierda) y parcialmente absorbida 10 segundos después de la primera aplicación (derecha)..... | 39 |
| Figura 3-3 Ejemplo muestra para análisis químico (izquierda) y muestra para análisis físico (derecha) | 39 |
| Figura 3-4 Nikwax Cotton Proof..... | 40 |
| Figura 3-5 Tecnadis Coatex..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 3-6 Hendlex Carbon Protect..... | 41 |
| Figura 3-7 Nasiol..... | 41 |
| Figura 3-8 Estación de marcado láser Rofin Powerline E: infrarrojo 1, verde 2, ultravioleta 3 [13] | 42 |
| Figura 3-9 Láser de CO ₂ [13] | 42 |
| Figura 3-10 Láser de Picosegundos [13]..... | 42 |
| Figura 3-11 Esquema simplificado de las estaciones láser [14]..... | 43 |
| Figura 3-12 Microscopio SEM. Universidad de de Vigo C.A.C.T.I [13] | 46 |
| Figura 3-13 Ejemplo simplificado de un microscopio SEM [21] | 48 |
| Figura 3-14 Sistema completo de medición de ángulos de contacto..... | 49 |
| Figura 3-15 Software uEye Cockpit | 50 |
| Figura 3-16 Cámara EO Edmund Optics | 50 |
| Figura 3-17 Programa ImageJ | 50 |
| Figura 3-18 Estufa, proceso secado..... | 52 |
| Figura 3-19 Frigorífico, proceso hielo-deshielo..... | 53 |
| Figura 3-20 Estación de trabajo del láser de CO ₂ y ajuste de parámetros del software de procesamiento | 55 |
| Figura 3-21 Software de procesamiento láser IR | 55 |
| Figura 3-22 Esquema de barrido [14] [13]..... | 56 |
| Figura 3-23 Láser de picosegundos en funcionamiento y superficie texturizada | 56 |
| Figura 3-24 Medición de ángulos con el Gionómetro Ossila..... | 57 |
| Figura 4-1 Gráfica de consumos 1 ^a aplicación..... | 60 |
| Figura 4-2 Gráfica de consumos 3 ^a aplicación global | 61 |
| Figura 4-3 Evolución de consumos entre aplicaciones | 61 |
| Figura 4-4 Segunda aplicación del Hendlex en las telas | 62 |
| Figura 4-5 Gráfica de la materia seca 1 ^a aplicación | 63 |
| Figura 4-6 Gráfica de la materia seca 3 ^a aplicación global | 64 |
| Figura 4-7 Evolución de la materia seca durante las tres aplicaciones | 65 |
| Figura 4-8 Gráfica de los grados de polimerización 1 ^a aplicación | 66 |
| Figura 4-9 Gráfica de los grados de polimerización 3 ^a aplicación global | 67 |
| Figura 4-10 Evolución global de los grados de polimerización durante las tres aplicaciones | 68 |
| Figura 4-11 Ángulo de contacto del Tecnadis en la 1 ^a aplicación (izquierda) y en la última (derecha) | 69 |
| Figura 4-12 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Tecnadis a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del C, Si y el O..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-13 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Nasiol a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del C, O y en menor medida F y Si..... | 71 |
| Figura 4-14 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Hendlex a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del Si y F en las zonas donde hay una mayor concentración de producto..... | 71 |
| Figura 4-15 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Hendlex a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del Si y F en las zonas donde hay una mayor concentración de producto..... | 72 |
| Figura 4-16 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 5 ciclos de secado para las cuatro muestras empleadas | 73 |
| Figura 4-17 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 10 ciclos de secado | 74 |
| Figura 4-18 Evolución de los ángulos de contacto en los ciclos de sales: 1: inicial; 2: tras 5 ciclos y 3: tras 10 ciclos | 74 |
| Figura 4-19 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 5 ciclos de enfriamiento para las cuatro umestras empleadas | 75 |
| Figura 4-20 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 10 ciclos de enfriamiento | 76 |
| Figura 4-21 Evolución de los ángulos de contacto en los ciclos hielo-dehielo: 1: inicial; 2: tras 5 ciclos y 3: tras 10 ciclos | 76 |
| Figura 4-22 Ángulo de 143° del anverso (izquierda) y ángulo de 142,65° del reverso (derecha).... | 78 |
| Figura 4-23 Ángulo de 143,11° del anverso (izquierda) y ángulo de 142,42° del reverso (derecha) | 78 |
| Figura 4-24 Curva de secado de las muestras sometidas a calentamiento | 79 |
| Figura 4-25 Curvas de secado de las muestras sometidas a enfriamiento..... | 79 |
| Figura 4-26 Resultados de los ensayos del láser IR | 81 |
| Figura 4-27 Resultados de los ensayos del láser UV | 82 |
| Figura 4-28 Resultados de los ensayos realizados sobre la 1ª muestra con solape al 0 % | 83 |
| Figura 4-29 Resultados de los ensayos realizados sobre la 2ª muestra con solape al -40 %..... | 84 |
| Figura 4-30 Resultados del láser de CO ₂ | 84 |
| Figura 4-31 Medición del ángulo de contacto de la muestra tratada con el láser UV | 85 |
| Figura 4-32 Ángulos de contacto obtenidos con el láser UV | 86 |
| Figura 4-33 Ángulos de contacto obtenidos con el láser de picosegundos | 87 |
| Figura 4-34 Medición del ángulo de contacto en la muestra tratada con el láser de picosegundos . | 87 |
| Figura 4-35 Perfil nanométrico de la muestra tratada con el láser de picosegundos | 88 |
| Figura 4-36 Procesado mediante láser de picosegundos (izquierda) y muestra texturizada sometida a ensayos de medición de ángulos de contacto (derecha)..... | 89 |
| Figura 4-37 Medición de ángulos de contacto para la superficie procesada con el láser UV | 89 |
| Figura 4-38 Ángulos de contacto conseguidos con el láser de picosegundos en el ensayo 03 (derecha) y el ensayo 19 (izquierda) | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4-39 Ángulo de contacto conseguido con el láser UV en el ensayo 13 | 90 |
| Figura A1-0-1 Báscula analítica Blauscal | 98 |
| Figura A1-0-2 Vaso de precipitado | 98 |
| Figura A1-0-3 Pala de disolución..... | 98 |
| Figura A1-0-4 Micro pipeta | 99 |
| Figura A1-0-5 Estufa de secado | 99 |
| Figura A1-0-6 Frigorífico con congelador | 99 |
| Figura A1-0-7 Crisol | 100 |
| Figura A1-0-8 Recipiente | 100 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2-1 Ángulos de contacto..... | 20 |
| Tabla 2-2 Medidas obtenidas por software [3]..... | 26 |
| Tabla 2-3 Ángulos de contacto de diferentes sustratos [3] | 26 |
| Tabla 3-1 Datos técnicos del equipo Rofin Powerline E [13]..... | 43 |
| Tabla 3-2 Datos técnicos del equipo Rofin Synrad 48-2 [13]..... | 43 |
| Tabla 3-3 Datos técnicos del equipo Rofin Powerline Pico [13] | 43 |
| Tabla 4-1 Consumos 1ª aplicación | 59 |
| Tabla 4-2 Consumos obtenidos de cada una de las tres aplicaciones realizadas. Además, se muestra el consumo global obtenido después de las tres aplicaciones realizadas y el incremento experimentado entre realizar una única aplicación a realizar tres aplicaciones..... | 60 |
| Tabla 4-3 Materia seca 1ª aplicación..... | 63 |
| Tabla 4-4 Materia seca polimerizada tras cada una de las tres aplicaciones realizadas. Además, se muestra la materia seca global que queda en el tejido tras las tres aplicaciones y el incremento experimentado al comparar una aplicación con la realización de tres..... | 64 |
| Tabla 4-5 Grados de polimerización 1ª aplicación..... | 66 |
| Tabla 4-6 Grados de polimerización alcanzado en cada una de las aplicaciones realizadas. Además, se muestran el grado de polimerización alcanzado tras las tres aplicaciones, así como el incremento experimentado al comparar una única aplicación con tres consecutivas..... | 67 |
| Tabla 4-7 Comparación final de parámetros tras 1 aplicación y tras tres aplicaciones (global) | 68 |
| Tabla 4-8 Resumen de resultados de las tres aplicaciones | 69 |
| Tabla 4-9 Variación de los ángulos de contacto durante los ciclos térmicos..... | 73 |
| Tabla 4-10 Variación de pesos durante los ciclos térmicos | 73 |
| Tabla 4-11 Penetrabilidad en sales | 77 |
| Tabla 4-12 Penetrabilidad en hielo-deshielo | 77 |
| Tabla 4-13 Valores límite del láser IR | 80 |
| Tabla 4-14 Combinación de parámetros introducidos en el láser IR | 80 |
| Tabla 4-15 Valores límite del láser UV..... | 81 |
| Tabla 4-16 Combinación de parámetros introducidos en el láser UV | 81 |
| Tabla 4-17 Valores límite del láser de picosegundos..... | 82 |
| Tabla 4-18 Combinación de parámetros del primer ensayo del láser de picosegundos..... | 83 |
| Tabla 4-19 Combinación de parámetros del segundo ensayo del láser de picosegundos | 83 |
| Tabla 4-20 Resultados de las mediciones de ángulos de los ensayos | 90 |
| Tabla A2-0-1 Consumos iniciales Tecnadis..... | 101 |
| Tabla A2-0-2 Consumos iniciales Nasiol..... | 101 |
| Tabla A2-0-3 Consumos iniciales Hendlex..... | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tabla A2-0-4 Consumos iniciales Nikwax | 102 |
| Tabla A2-0-5 Consumos 2ª aplicación Tecnadis..... | 102 |
| Tabla A0-6 Consumos 2ª aplicación Nasiol | 103 |
| Tabla A0-7 Consumos 2ª aplicación Hendlex | 103 |
| Tabla A0-8 Consumos 2ª aplicación Nikwax..... | 103 |
| Tabla A2-0-9 Consumos finales Tecnadis | 104 |
| Tabla A2-0-10 Consumos finales Nasiol | 104 |
| Tabla A2-0-11 Consumos finales Hendlex | 104 |
| Tabla A2-0-12 Consumos finales Nikwax | 104 |
| Tabla A2-0-13 Materia seca 1ª aplicación de Tecnadis | 105 |
| Tabla A2-0-14 Materia seca 1ª aplicación de Nasiol | 105 |
| Tabla A2-0-15 Materia seca 1ª aplicación de Hendlex | 106 |
| Tabla A2-0-16 Materia seca 1ª aplicación de de Nikwax | 106 |
| Tabla A2-0-17 Materia seca 2ª aplicación Tecnadis | 106 |
| Tabla A2-0-18 Materia seca 2ª aplicación Nasiol | 107 |
| Tabla A2-0-19 Materia seca 2ª aplicación Hendlex | 107 |
| Tabla A2-0-20 Materia seca 2ª aplicación Nikwax | 107 |
| Tabla A2-0-21 Materia seca 3ª aplicación Tecnadis | 108 |
| Tabla A2-0-22 Materia seca 3ª aplicación Nasiol | 108 |
| Tabla A2-0-23 Materia seca 3ª aplicación Hendlex | 108 |
| Tabla A2-0-24 Materia seca 3ª aplicación Nikwax | 109 |
| Tabla A2-0-25 Materia seca global del Tecnadis..... | 109 |
| Tabla A2-0-26 Materia seca global del Nasiol..... | 109 |
| Tabla A2-0-27 Materia seca global del Hendlex..... | 110 |
| Tabla A2-0-28 Materia seca global del Nikwax..... | 110 |
| Tabla A2-0-29 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Tecnadis..... | 111 |
| Tabla A2-0-30 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Nasiol..... | 111 |
| Tabla A2-0-31 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Hendlex | 111 |
| Tabla A2-0-32 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Nikwax | 112 |
| Tabla A2-0-33 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Tecnadis..... | 112 |
| Tabla A2-0-34 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Nasiol..... | 112 |
| Tabla A2-0-35 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Hendlex | 113 |
| Tabla A2-0-36 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Hendlex | 113 |
| Tabla A2-0-37 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Tecnadis..... | 113 |
| Tabla A2-0-38 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Nasiol..... | 114 |
| Tabla A2-0-39 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Hendlex | 114 |

| | |
|--|-----|
| Tabla A2-0-40 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Nikwax | 114 |
| Tabla A2-0-41 Resultados de los ángulos de contacto de la 1ª aplicación | 115 |
| Tabla A2-0-42 Resultados de los ángulos de contacto de la 2ª y 3ª aplicación | 116 |
| Tabla A2-0-43 Resultados de los ángulos de contacto de los primeros 5 ciclos..... | 116 |
| Tabla A2-0-44 Imágenes ángulo de contacto primer ensayo térmico..... | 120 |
| Tabla A2-0-45 Pesos después del primer ensayo de sales y hielo-deshielo..... | 121 |
| Tabla A2-0-46 Resultados de los ángulos de contacto de los últimos 10 ciclos..... | 122 |
| Tabla A2-0-47 Imágenes ángulo de contacto segundo ensayo térmico | 125 |
| Tabla A2-0-48 Pesos después del segundo ensayo de sales y hielo-deshielo | 126 |
| Tabla A2-0-49 Pesos iniciales de los ensayos de hielo-deshielo y sales..... | 126 |
| Tabla A2-0-50 Pesos de las muestras de referencia | 127 |
| Tabla A2-0-51 Proceso de secado | 127 |
| Tabla A2-0-52 Proceso de desorción | 128 |
| Tabla A2-0-53 Equivalencias de potencia del láser de CO ₂ | 129 |
| Tabla A3-0-1 Composición del Nikwax | 130 |
| Tabla A3-0-2 Propiedades físicas y químicas del Nikwax..... | 131 |
| Tabla A3-0-3 Propiedades físicas y químicas del Tecnadis | 131 |
| Tabla A3-0-4 Composición del Nasiol..... | 132 |
| Tabla A3-0-5 Propiedades físicas y químicas del Nasiol..... | 132 |

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

Este Trabajo de Fin de Grado surge como respuesta a la inevitable necesidad de crear tejidos aislantes capaces de repeler el agua y la humedad de los uniformes para poder proporcionar a los infantes de marina unas condiciones de trabajo lo más cómodas y seguras posibles.

Durante los últimos años el número de estudios destinados a la investigación y mejora de tejidos hidrorrepelentes ha experimentado un crecimiento exponencial, en el que se observa una preocupación cada vez mayor no solo por el confort térmico al actuar como aislante contra la humedad, sino también por la protección que el infante de marina requiere frente a agentes contaminantes que pueden estar presentes en los escenarios de conflicto donde opera.

Dicha protección es posible mediante la aplicación de aditivos químicos hidrofóbicos con componentes tensioactivos que repelen y disuelven la suciedad, al mismo tiempo que permiten reducir la humectación y el mojado de la superficie por efecto del agua y otros compuestos químicos en estado líquido (Figura 1-1). Esto permite proteger al infante y minimizar el riesgo de hipotermia mientras lleva a cabo misiones en ambientes húmedos durante períodos de tiempo prolongados. [1]

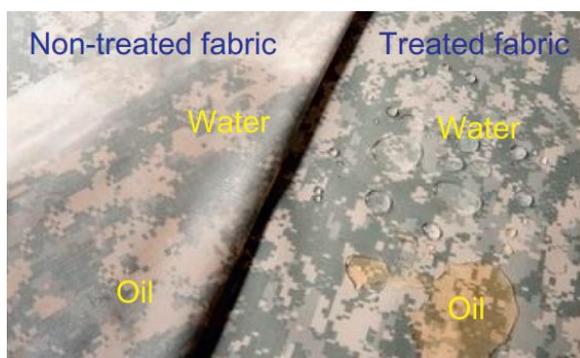


Figura 1-1 Comparación de tejidos [1]

Asimismo, numerosos estudios confirman que los líquidos con baja tensión superficial son difíciles de repeler y tienden a extenderse mojando así la mayoría de superficies [1] [2]. Para hacer frente a este tipo de líquidos, resulta necesario crear una capa de rugosidad adicional modificando la capa ya existente, cuya rugosidad puede ser alterada a través de diversos métodos, entre los cuales será objeto de estudio de este trabajo el método físico de texturizado láser. Gracias a este método se consiguen nanoestructuras cuyo ángulo de contacto con la superficie líquida impide el avance de la misma (Figura

1-2), dando paso a un nuevo concepto de superficie hidrorrepelente conocida como superficie omnifóbica que posee la capacidad de resistir la humedad de numerosos tipos de líquidos con tensiones superficiales diferentes.

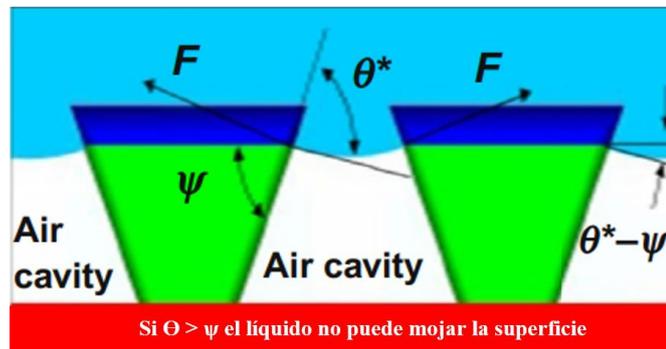


Figura 1-2 Ángulo de contacto superficie Omnifóbica [1]

1.2 Objetivos

El objetivo principal que se persigue en el presente trabajo no es más que realizar un estudio riguroso y un análisis detallado sobre los cambios que experimenta el tejido del uniforme de Infantería de Marina en sus propiedades hidrorrepelentes ante la aplicación de diferentes tratamientos químicos y físicos. Para ello se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- Aplicación de productos químicos a fin de crear una barrera protectora entre la superficie del tejido y la gota de agua, o bien conseguir la polimerización de dichos productos para combatir la humedad.
- Selección del producto más óptimo en lo que a duración, penetrabilidad y efectividad del tratamiento se refiere.
- Modificación nanométrica del tejido a través de la texturización física, sometiendo una muestra del uniforme a la exposición de diferentes tipos de láser con parámetros de trabajo variables.
- Análisis químico, físico y conjunto de ambas técnicas.

1.3 Organización de la memoria

El presente trabajo se estructura en los siguientes grandes bloques:

- Un bloque inicial de introducción y objetivos en el que se expone la motivación que ha impulsado la realización de este proyecto. Para ello, se introduce al lector el contexto en el que se desenvuelve actualmente la industria textil, en cuanto a la mejora continua de las propiedades de sus productos, concretamente en todo lo referente a hidrofobicidad e hidrorrepelencia como atributo de vital importancia para la uniformidad de campaña del infante de marina. Se destaca además, la importancia que representa para la industria y las Fuerzas Armadas el estudio del comportamiento hidrofóbico de los tejidos en presencia de métodos químicos de impregnación y procedimientos físicos de modificación nanométrica de superficies. Todo ello, introduciendo los objetivos a alcanzar a lo largo del proyecto y la finalidad última del mismo en cuanto a la selección argumentada del método más adecuado para otorgar al uniforme de infantería de marina la capacidad hidrorrepelente más óptima posible.
- Un segundo bloque consistente en una revisión del estado del arte, que comienza con una breve descripción del panorama actual al que se enfrenta el sector textil, en la búsqueda de tejidos con capacidades mejoradas para cubrir necesidades diversas, siendo la hidrofobicidad uno de los atributos más perseguidos por el infante de marina. En relación a este apartado se

tratan los problemas específicos que afectan a la uniformidad del infante en el desarrollo diario de sus funciones, dando a conocer no solo la necesidad de confort y repelencia al agua, sino también la necesidad de protección y autolimpieza de los tejidos ante ambientes tóxicos ricos en contaminantes químicos en estado líquido. A continuación se desarrolla de forma clara y concisa la explicación de las propiedades de mojado de los materiales y el concepto del ángulo de mojado, como cualidad de estudio fundamental en la que se basará todo este proyecto para evaluar la efectividad o ineficacia de los tratamientos hidrofóbicos realizados. Una vez expuestos los conceptos anteriores se justificará de forma razonada las necesidades de implantar propiedades hidrofóbicas en la vestimenta diaria del infante de marina, para posteriormente plantear los ejemplos de la naturaleza que han servido como punto de partida de la investigación hidrofóbica, seguido de los métodos que hacen posible su estudio, en el que se tratará por su gran relevancia el método de la gota yacente. Finalmente, este bloque dedicado al estado del arte concluye con un desarrollo de los métodos industriales que imprimen a los productos textiles las características hidrofóbicas deseadas para finalizar con una explicación introductoria de las técnicas de tratamiento tanto físico como químico que se van a aplicar a nivel experimental sobre una muestra del uniforme y que por tanto constituyen el núcleo central de este trabajo.

- Tercer bloque intermedio, en el que se presenta de forma genérica el material de trabajo empleado y la metodología experimental que se va a seguir para abordar este proyecto. Con la metodología adecuada será posible comprender la interacción polimérica entre la fibra y el producto y la evolución de las propiedades hidrofugas a lo largo del tiempo según la composición química de cada producto. Así pues, en este bloque se expone la motivación del tratamiento químico, así como las posibilidades que ofrece y cómo se ha estructurado el mismo, explicando los tipos de análisis y herramientas de estudio que se han acometido. En este bloque se detallan claramente los tipos de técnicas de análisis químico, para la comprensión total del concepto y la finalidad del mismo, especificando en cada proceso su estructura, forma de llevarlo a cabo y posibles mejoras que se esperan de cada uno de ellos. De igual manera que ocurre con el análisis químico, se relata la estructura y el desarrollo del análisis físico basado en el texturizado láser, diseñado para la modificación nanométrica de la rugosidad del tejido y mejora de su comportamiento hidrofóbico en presencia de agua y humedad. A lo largo del apartado de análisis físico, se dará una explicación concisa de lo que consisten los procesos físicos de barrido y texturizado láser, escasamente utilizados hoy en día en el ámbito textil, para lograr su correcta comprensión y poder introducir qué tipo de láser se ha empleado, características, propiedades técnicas y como la aplicación de este en superficies textiles puede influir positivamente en el comportamiento hidrofugo de la gota.
- Cuarto bloque de resultados y discusión. En este bloque se analizarán los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos realizados, procediendo a la discusión y correlación de los mismos. Se exponen en primer lugar los resultados relativos a los tratamientos químicos evaluados. A continuación se analizan los resultados obtenidos tras el texturizado de la tela con diferentes tipos de láser y diferentes parámetros de operación. Finalmente se analiza la eficacia del tratamiento conjunto.
- Quinto bloque centrado en detallar las principales conclusiones alcanzadas en este estudio así como en proponer futuras líneas de investigación que pueden surgir a partir de las conclusiones alcanzadas en este estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes

En la actualidad la gran mayoría de empresas textiles hacen frente a un problema común que suele afectar negativamente a la calidad de sus productos y que supone un campo de estudio de gran interés no solo desde el punto de vista comercial sino también militar.

Dicho problema no es más que la humedad y todos sus efectos negativos sobre la comodidad y funcionalidad de los tejidos.

Para paliar estos efectos han surgido en los últimos años numerosos estudios sobre el comportamiento hidrofóbico de los materiales, centrados principalmente en el ámbito textil y llevados a cabo tanto por departamentos de I+D+i de las empresas implicadas como por centros de investigación de diversos países.

Estos estudios pretenden combinar la capacidad hidrofóbica, para repeler las partículas líquidas, con otras funcionalidades igualmente importantes como son el peso de la tela, el confort térmico y fisiológico, la capacidad de lavado y la durabilidad del tratamiento repelente empleado, aspecto sumamente importante para aplicaciones de carácter militar [1].

En función de la importancia que confiera el fabricante a cada una de las consideraciones anteriormente nombradas, se obtienen diferentes tejidos con aplicaciones diversas, ya sea para la fabricación de ropa deportiva, uniformes de trabajo, equipamiento para el ocio y el tipo de ropa que dada su repercusión en el ámbito militar será tratada en mayor detalle: el uniforme de la Infantería de Marina Española cuya profesión exige unos requerimientos técnicos y de calidad especialmente elevados.

2.2 Problemas del uniforme de infantería de marina

Son muchas las actividades y trabajos que requieren una uniformidad adecuada con propiedades específicas que permitan al usuario desarrollar sus funciones de manera segura y eficaz (equipos de protección individual EPI para personal sanitario, trajes ignífugos para bomberos, trajes de neopreno para buceadores etc...), pero es sin duda la profesión militar la que requiere una uniformidad que reúna las características y solicitudes más exigentes. Esto es debido a dos grandes problemas que los infantes de marina afrontan diariamente:

- Frío y humedad: La carrera militar es por excelencia una de las profesiones más expuestas a las inclemencias meteorológicas y a las condiciones más extremas de frío y humedad. Asimismo la condición de infante de marina acrecenta aún más si cabe, la exposición continua al agua y la humedad ya que entre sus principales cometidos tiene como misión

fundamental la realización de desembarcos y operaciones anfibia combinadas (Figura 2-1), en las que la ropa inevitablemente se moja y retiene humedad. Es por ello que el uso de un uniforme con propiedades hidrofóbicas, capaces de evitar la humedad y las filtraciones de agua, constituye un bien de primera necesidad. La adquisición de uniformes hidrorepelentes supone para el infante de marina una mejora indudable en sus condiciones de trabajo debido a que además de proporcionar confort térmico al mantener la ropa seca, previene de hipotermias y enfriamientos excesivos a la persona que porta el traje.



Figura 2-1 Desembarco anfibio

- Suciedad y contaminación química: En el campo de batalla o durante el adiestramiento es inevitable que el infante acumule suciedad en abundancia e incluso agentes tóxicos derivados de la guerra química/ biológica [1]. No solamente la suciedad asociada al adiestramiento en escenarios hostiles con barro, fango o polvo supone una preocupación para el infante, sino que además debe adaptar su vestimenta a otro tipo de suciedad mucho más preocupante que se presenta en forma de componentes químicos capaces de atravesar tejidos y comprometer la salud de la persona afectada. Por esta razón resulta de vital importancia dotar a las unidades de uniformes con tratamientos y revestimientos hidrofóbicos que actúen como capa protectora entre el agente tóxico y el individuo (Figura 2-2) y que además le permitan realizar acciones de descontaminación y autolavado con seguridad.



Figura 2-2 Trajes NBQR con capa exterior hidrofóbica

2.3 Explicación de las propiedades de mojado y ángulos de contacto de los sustratos

En el presente capítulo se tratará de explicar de forma clara y precisa el comportamiento de las partículas líquidas sobre la superficie de un sustrato genérico y como sus propiedades fisicoquímicas pueden llegar a ejercer influencia sobre el comportamiento hidrofóbico o hidrofílico de dichas partículas. Para estudiar cómo se desarrolla cualquier proceso de mojado y qué limitaciones presenta se analizarán en mayor detalle las propiedades de mojado y ángulos de contacto de los sustratos.

Para caracterizar la interacción entre un líquido y la superficie del sólido que moja, el método más fiable se basa en la medición del ángulo de contacto entre sus respectivas interfaces, que define lo que se conoce como humectabilidad, cuya medición representa el parámetro con el que es posible determinar el grado de hidrofobicidad que posee la superficie estudiada en presencia de un líquido. Cuando la gota no es capaz de penetrar a través del sólido o no puede expandirse a lo largo de su superficie, queda retenida sobre ella formando un ángulo entre la interfaz líquido/sólido y la interfaz líquido/vapor, denominado ángulo de contacto (Figura 2-3). Si el ángulo de contacto medido es elevado, la humectabilidad del sólido será baja lo que significa que presenta buenas cualidades hidrofóbicas y por lo tanto es capaz de repeler la humedad, en cambio si se trata de un ángulo pequeño, la humectabilidad es alta y sus propiedades en lugar de ser hidrofóbicas serán hidrofílicas, es decir, no será capaz de aislar la humedad del medio y el líquido mojará con facilidad la superficie. En ningún caso interesa que la humectabilidad del tejido tratado sea alta teniendo en cuenta el objeto de estudio de este trabajo, que no es más que lograr una superficie textil lo más hidrorrepelente posible.

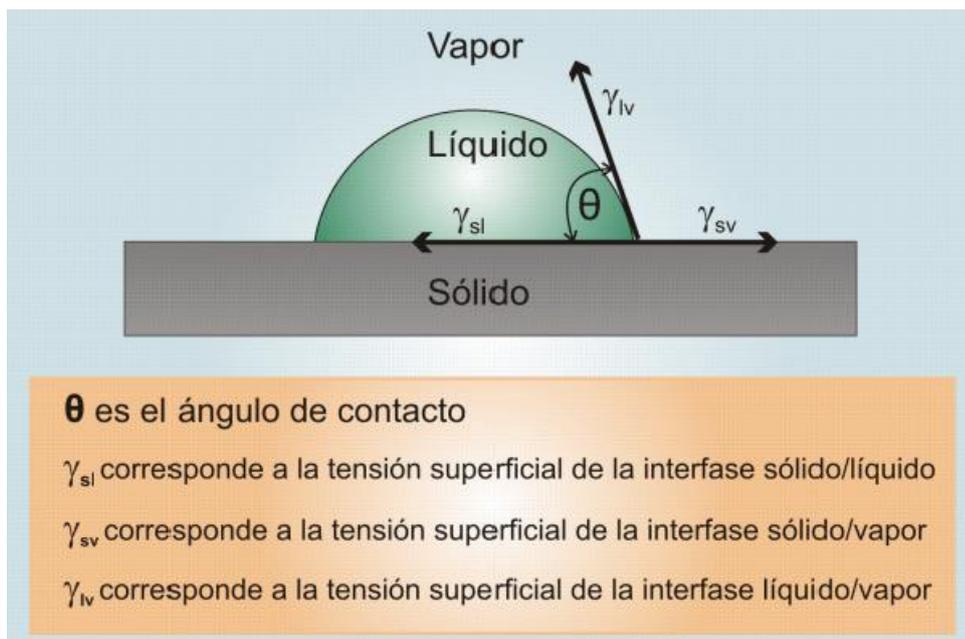


Figura 2-3 Esquema ángulo de contacto e interfaces [3]

El ángulo de contacto se puede relacionar con las tensiones superficiales existentes entre las diferentes fases del sistema (sólido, líquido, aire) a través de la ecuación de Young sobre la mojabilidad (μ). Esta ecuación sirve para caracterizar las interacciones de adhesión y cohesión entre la gota y el sólido, a partir del balance entre las tensiones superficiales en la triple interfase sólido-líquido-vapor, y determinar así la energía superficial por unidad de área [3].

$$\cos \mu = \cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}}$$

dónde θ es el ángulo de contacto e γ_{sv} , γ_{sl} , γ_{lv} son las tensiones superficiales de la interfase sólido-aire, sólido-líquido y líquido-aire respectivamente.

Según esta ecuación, se dice que el mojado es perfecto cuando μ es igual a 1, es decir $\theta = 0^\circ$. Por el contrario, no existe mojado si $\mu = -1$, es decir $\theta = 180^\circ$. En casos intermedios, donde la mojabilidad se encuentra entre -1 y 1 ($-1 < \mu < 1$), se considera que la superficie es hidrofóbica cuando la gota forma un ángulo de contacto θ mayor de 90° (esto ocurre si $\gamma_{sv} < \gamma_{sl}$), en cambio si es menor de 90° ($\gamma_{sv} > \gamma_{sl}$) es hidrofílica. De acuerdo a lo anterior, para que una superficie hidrofílica se convierta en hidrofóbica es necesario reducir la tensión superficial sólido-vapor, de forma que sea inferior a la tensión superficial sólido-líquido.

Cuando se cumple la condición de superficie hidrofóbica, la adhesividad, mojabilidad y la energía superficial son bajas, cuyo efecto es el comportamiento deseado para generar tejidos hidropelentes que rechacen la gota, mientras que en el caso hidrofílico la mojabilidad, adhesividad y energía superficial serán altas (Figura 2-4), siendo este precisamente el comportamiento a evitar.

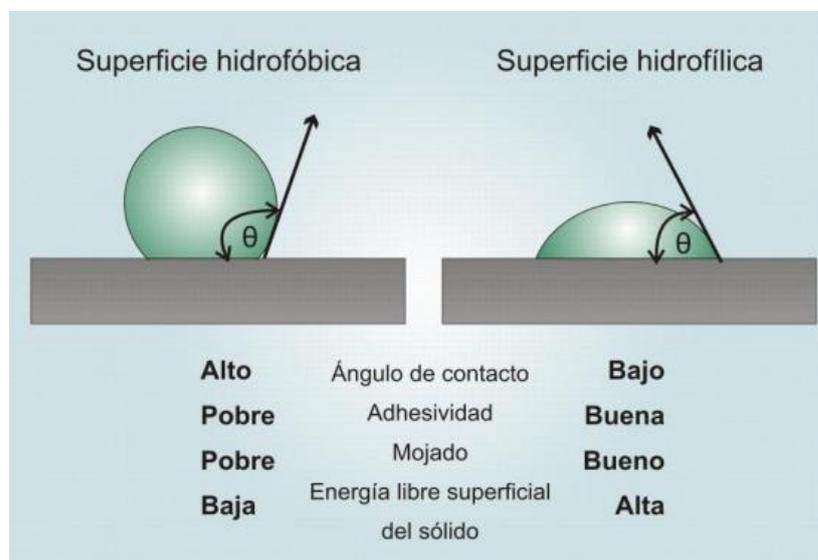


Figura 2-4 Ángulo de contacto hidrofóbico e hidrofílico [3]

Asimismo, tal y como indica la Tabla 2-1, los ángulos de contacto se pueden clasificar según su amplitud en los siguientes tipos de mojado:

| Ángulo de contacto | Tipo de mojado |
|----------------------------------|-----------------|
| $\Theta = 0^\circ$ | Mojado completo |
| $0 < \Theta < 90^\circ$ | Hidrofílico |
| $90^\circ < \Theta < 150^\circ$ | Hidrofóbico |
| $150^\circ < \Theta < 180^\circ$ | Omnifóbico |
| $\Theta = 180^\circ$ | Secado completo |

Tabla 2-1 Ángulos de contacto

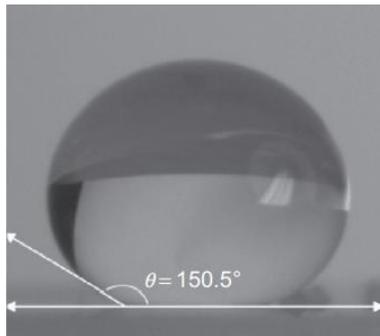


Figura 2-5 Superficie Omnifóbica [22]

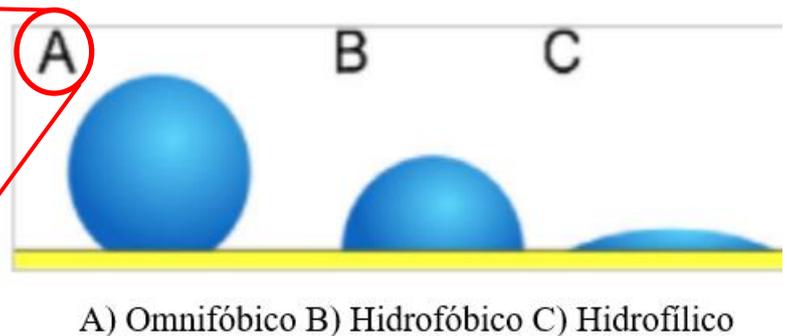


Figura 2-6 Tipos de mojado [4]

2.3.1 Influencia de la microrugosidad superficial en la hidrofobicidad e hidropelencia

El ángulo de contacto obtenido mediante la ecuación de Young (el cual se puede definir, tal y como se aprecia en la Figura 2-5, como la tangente a la interfaz líquido-fluido con la superficie del sólido, en el punto de contacto de las tres fases, hacia el lado de la fase líquida) es un ángulo de contacto estático o ideal aplicable a superficies lisas, homogéneas, no porosas y químicamente inertes. En superficies reales con una cierta rugosidad, heterogeneidad y con una cierta química superficial, es necesario considerar más parámetros a fin de determinar el ángulo de contacto real [2]

En estos casos reales, no basta con determinar el ángulo estático antes mencionado, sino que es necesario determinar el ángulo de contacto dinámico. Para la determinación de este ángulo es necesario tener en cuenta fenómenos de histéresis existentes entre el ángulo de avance y el de retroceso de la gota, que tienen lugar durante un proceso de adición y retirada de líquido presente en la gota. A medida que se añade líquido se produce un avance de la línea de contacto y el ángulo de contacto alcanza un valor máximo (es lo que se conoce como ángulo de contacto de avance) mientras que durante la retirada de volumen se produce un retroceso de la línea de contacto y una disminución del ángulo registrado (ángulo de retroceso). La diferencia entre ambos ángulos nos dará la histéresis del ángulo de contacto, a partir de la cual determinaremos la mayor o menor hidrofobicidad de la superficie (mayor hidrofobicidad a menor histéresis).

Los fenómenos de mojado que tienen lugar en superficies reales, se pueden explicar atendiendo a los siguientes modelos teóricos:

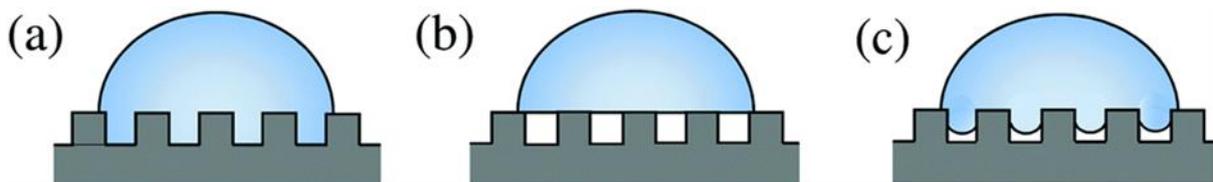


Figura 2-7 Esquema de las fases de humectación en superficies reales con cierta rugosidad mediante los modelos de Wenzel (a), Cassie-Baxter (b) y Nagayama & Zhang (c) [2]

- Modelo de Wenzel (Figura 2-7 a). Este modelo, válido solamente para superficies rugosas y homogéneas, considera que el fluido penetra totalmente en la rugosidad de la superficie, no existiendo burbujas de aire atrapadas entre el sólido y el líquido. Esto se debe a que Wenzel considera que las superficies rugosas se presentan a escala microscópica, por lo que a este nivel la contribución de la energía superficial del sólido es mayor de la esperada.
- Modelo de Cassie-Baxter (Figura 2-7 b). En este modelo se considera que el líquido no es capaz de penetrar en las imperfecciones de la superficie, apoyándose la gota en las puntas de las asperezas y dejando aire entre el sólido y el líquido. Este modelo considera de manera conjunta el modelo propuesto por Wenzel (para superficies homogéneas rugosas) y un modelo propuesto exclusivamente por Cassie (para superficies heterogéneas lisas).

- Modelo de Nagayama y Zhang (Figura 2-7 c). Este modelo propone un estado de mojado intermedio, conocido como humectación mixta o estado de humectación parcial, que existe entre los estados de Wenzel y Cassie-Baxter. El estudio de este nuevo modelo se centra en el proceso de transición forzada de humectación dinámica, es decir, el paso del secado completo (Cassie-Baxter) al mojado total de la superficie (Wenzel), acompañada de un ángulo de contacto dependiente del tiempo que ocurre bajo estímulos externos, mostrando una gran dependencia con la fuerza impulsora que proporciona la energía de activación suficiente para superar la barrera de transición entre ambos estados, es decir, la transición de humectación no ocurrirá espontáneamente y se mantendrá un estado de humectación independiente del tiempo para una gota en condiciones de equilibrio.

En definitiva se puede concluir que en sistemas reales no es común obtener un único ángulo de contacto, sino que lo habitual es un intervalo de ángulos de contacto dando lugar a fenómenos de histéresis entre el ángulo de avance y retroceso.

2.4 Necesidad de implantar propiedades hidrofóbicas en la ropa

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, la necesidad de implantar propiedades hidrofóbicas en los uniformes de Infantería de Marina es una realidad inexorable, ante la cual las unidades y centros del ejército deben tomar acción para cubrir las necesidades de seguridad, confort y auto limpieza de sus militares en activo.

No obstante esta necesidad patente en las Fuerzas Armadas, se hace extensible a numerosas profesiones con cierto índice de riesgo y peligrosidad que la industria textil debe satisfacer teniendo en cuenta que se trata de una necesidad de considerable peso económico dentro del sector textil a nivel mundial.

Los materiales generados en este aspecto son tejidos producidos en masa que están presentes en nuestro día a día en la ropa y prendas de trabajo que la población mundial demanda en cantidades masivas y con requerimientos de calidad cada vez mayores. Por otra parte, estamos siendo testigos de un acelerado desarrollo científico y tecnológico que afecta a multitud de campos de la ingeniería, como es el caso de la nanotecnología. La industria textil no puede permanecer ajena a esta nueva revolución industrial, y la demanda creciente de tejidos con propiedades mejoradas ha dado paso a la necesidad de fabricar productos nuevos con propiedades hidrofóbicas optimizadas a través de la nanotecnología. Para ello, ha sido necesario desarrollar nuevos métodos de estudio que permitan integrar esta tecnología innovadora con la actividad industrial, considerando que actualmente todas las industrias textiles siguen procesos de manufactura muy similares, basados en la manufactura tradicional, que se apoya en el uso de copos de fibra como materia prima a partir de la cual se obtienen los hilos que posteriormente se tejen entre sí para conseguir la tela con la que se confecciona la prenda final [5].

Actualmente la mayoría de estudios hidrofóbicos están encaminados a la mejora de las propiedades aislantes e hidropelentes de las fibras y tejidos. En este sentido, el reciente desarrollo de la nanotecnología en los últimos años ha aportado un número creciente de herramientas y métodos de estudio que permiten mejorar las prestaciones de los tejidos, haciéndolos aislantes, auto lavables y resistentes al agua y la humedad. Gran parte de estos métodos se basan en la modificación física de la superficie del tejido, mientras que otros se orientan a la deposición química de partículas nanométricas a fin de mejorar una gran variedad de atributos (Figura 2-8), entre los que podrían destacarse conforme a los objetivos de este proyecto, la hidrofobicidad, además del confort térmico que ello implica, sumado a la repelencia al aceite u otros compuestos como propiedad necesaria que confiere la capacidad de auto limpiado de la prenda para la protección contra agentes tóxicos.



Figura 2-8 Mejora de propiedades de los productos textiles [5]

2.5 Métodos y ejemplos de estudio

A lo largo de este apartado se expondrán algunos de los ejemplos en los que se inspira el estudio hidrofóbico de los materiales y las técnicas más relevantes para llevarlo a cabo y otorgar a los productos textiles las características hidrófugas o hidrorrepelentes, en el mejor de los casos, deseadas.

2.5.1 Ejemplos de estudio

Los ejemplos de estudio en los que se basa la investigación hidrofóbica, se apoyan como la gran mayoría de estudios científicos, en casos reales presentes en la naturaleza motivados por la necesidad de aislar al organismo de la humedad y cualquier agente externo.

Los dos casos más evidentes se encuentran en el comportamiento hidrofóbico de la flor de Loto y la piel del Collémbolo, un insecto gregario de reducido tamaño que habita en los suelos de casi todo el planeta.

Las hojas de la flor de Loto son ampliamente conocidas por repeler de manera natural las gotas de agua que deslizan sobre su superficie sin llegar a mojarla, característica que inspiró varios años atrás el estudio de sus propiedades. En el intento de imitar superficies naturales hidrorrepelentes, se descubrió que la rugosidad a escala nanométrica de la superficie de esta planta, permitía frenar el paso del agua debido a que los picos de su superficie rugosa al entrar en contacto con el líquido, formaban microcavidades en las que quedaban confinadas pequeñas masas de aire capaces de sostener dicho líquido y evitar que este penetrara y mojara la superficie [1]

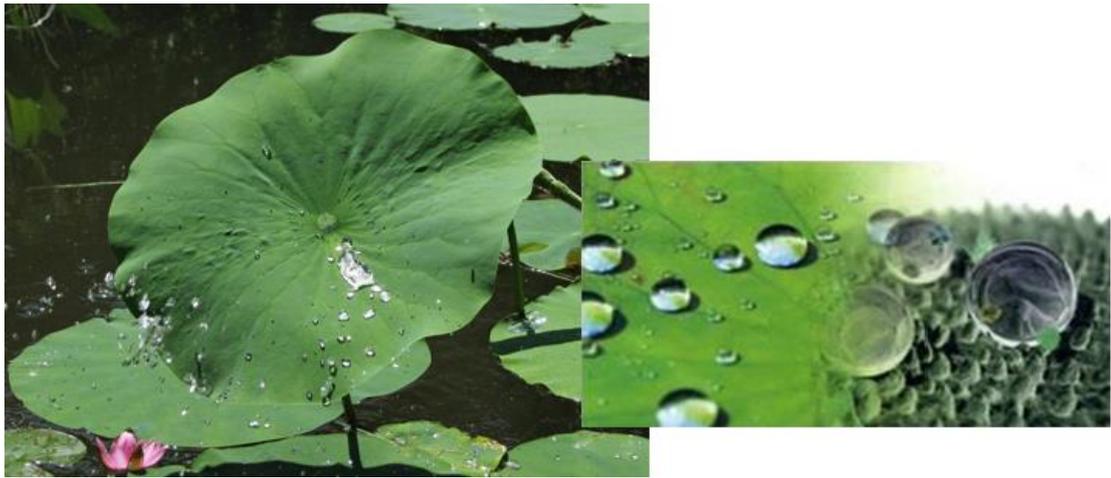


Figura 2-9 Superficie hidrófoba de la hoja de la flor de Loto [5]

Por otra parte, la capacidad de facilitar no solo la hidrorrepelencia, sino también el deslizamiento de las gotas de agua y su eliminación, es otra característica de sumo interés, motivada por la micro rugosidad superficial de la planta, que sirve como modelo de referencia para la creación de superficies autolavables muy útiles para las tareas de descontaminación en ambientes de guerra química, que como bien se había comentado en capítulos anteriores, constituye uno de los problemas a los que se enfrenta la uniformidad del infante de marina y que gracias a esta innovación en el perfil de los tejidos hidrorrepelentes puede ser solucionado.

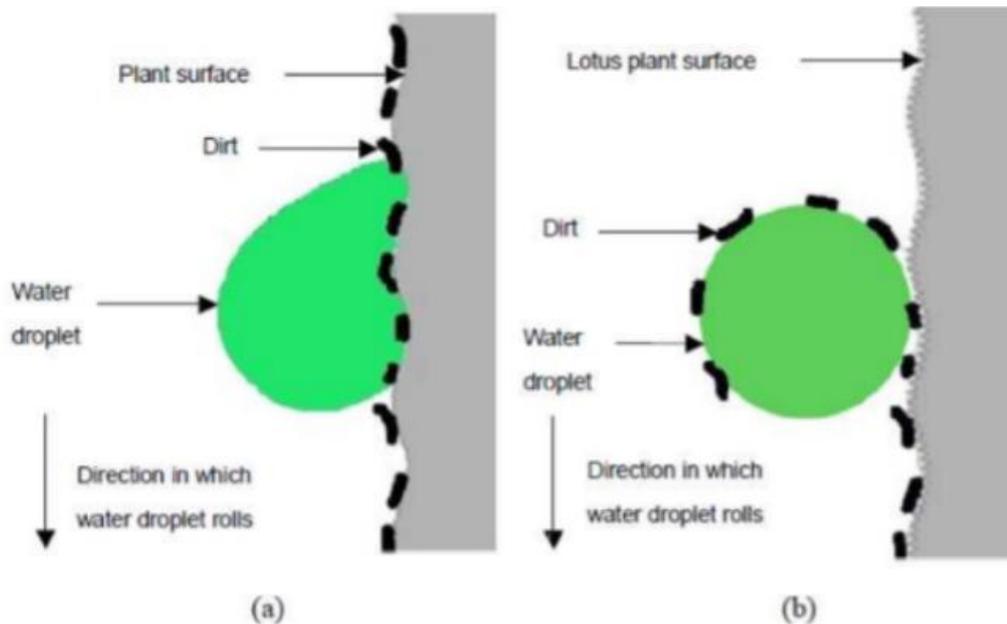


Figura 2-10 Mecanismo de tejido autolimpiable basado en el efecto del Loto [5] (a) gota deslizándose sobre la superficie de una planta. (b) gota deslizándose sobre una hoja de Loto

Del mismo modo en el caso del insecto Collémbolo, la microrugosidad de su piel posee un perfil característico con picos en forma de plataformas que generan una cobertura hidrorrepelente perfecta para sostener el líquido sobre las bolsas de aire comprendidas entre los espacios libres de dichas microestructuras.

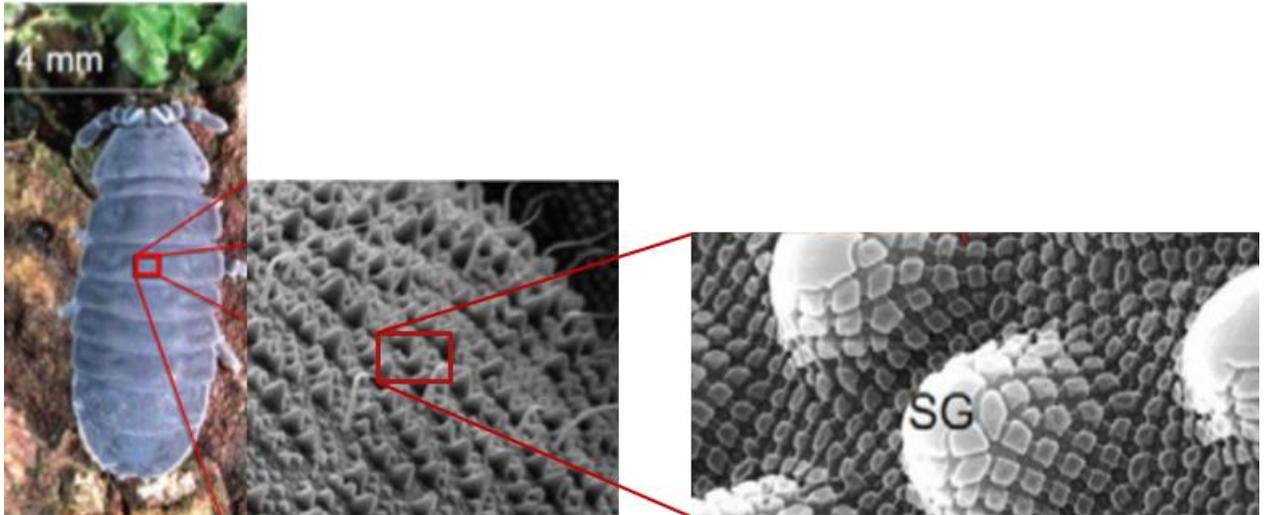


Figura 2-11 Microrugosidad de la piel del Collémbolo [1]

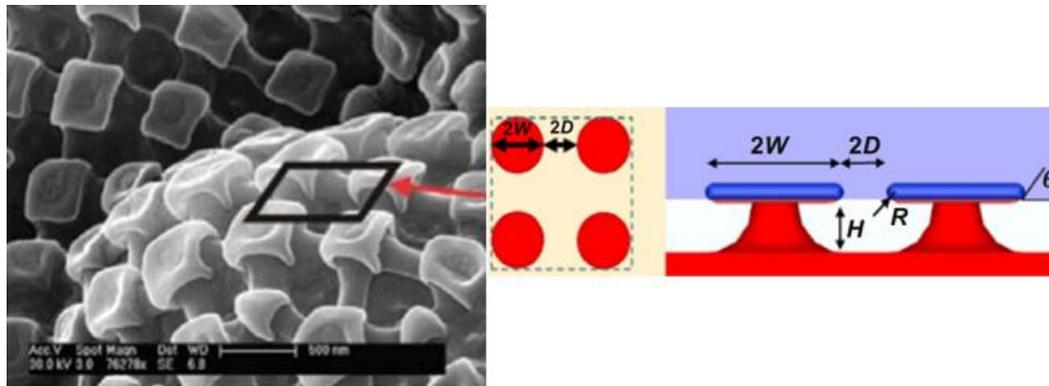


Figura 2-12 Perfil Hidrofóbico de la piel del Collémbolo [1]

2.5.2 Métodos de estudio

El método más empleado para determinar la humectabilidad y por tanto el grado de hidrofobicidad de cualquier superficie, se basa en la medición del ángulo de contacto mediante la técnica de la gota yacente. Para ello se emplea un instrumento llamado goniómetro (Figura 2-13), que realiza mediciones estáticas y dinámicas de los ángulos que forman las dos interfaces utilizando líquidos con tensiones superficiales diferentes, todas ellas previamente conocidas.



Figura 2-13 Goniómetro digital

Inicialmente se deposita una gota de cualquiera de los líquidos seleccionados, para llevar a cabo el promedio de varias medidas sucesivas de los ángulos que se forman tanto en la zona de contacto de la derecha de la gota como izquierda, mediante un goniómetro digital que almacena las imágenes de los ángulos obtenidos, para posteriormente ser procesadas a través de un software específico.

Los promedios de los ángulos resultantes, expresan el grado de humectabilidad de la superficie y con ello la hidrofobicidad del material en función de la amplitud de los ángulos obtenidos.

A continuación, se adjuntan varias imágenes de un estudio hidrofóbico real, en las que se puede apreciar la captura digital de una gota sobre una superficie estática (Figura 2-14), así como una tabla que recoge las características geométricas procesadas por ordenador para diferentes instantes de tiempo (Tabla 2-2) y otra tabla adicional en la que se muestran los ángulos de contacto obtenidos en sustratos diferentes (Tabla 2-3), bajo unas condiciones de temperatura ambiente constantes.

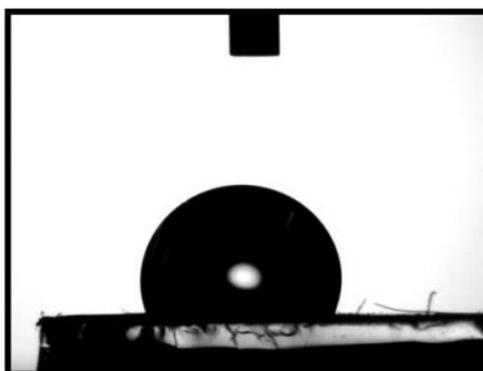


Figura 2-14 Imagen digital del método de la gota yacente [3]

| Archivo | Edición | Formato | Ver | Ayuda | | | | | |
|---------|---------|----------|----------|--------|------|--------|-------|-------|--------|
| No. | Time | Theta(L) | Theta(R) | Mean | Dev. | Height | width | Area | Volume |
| 1 | 0.000 | 110.79 | 112.88 | 111.83 | 1.05 | 1.854 | 2.696 | 16.81 | 8.86 |
| 2 | 4.942 | 110.63 | 112.81 | 111.72 | 1.09 | 1.852 | 2.697 | 16.79 | 8.85 |
| 3 | 9.961 | 110.62 | 112.76 | 111.69 | 1.07 | 1.850 | 2.697 | 16.77 | 8.83 |
| 4 | 14.94 | 110.53 | 112.73 | 111.63 | 1.10 | 1.848 | 2.697 | 16.75 | 8.82 |
| 5 | 19.96 | 110.46 | 112.58 | 111.52 | 1.06 | 1.846 | 2.697 | 16.72 | 8.80 |
| 6 | 24.94 | 110.35 | 112.51 | 111.43 | 1.08 | 1.844 | 2.697 | 16.70 | 8.78 |
| 7 | 29.94 | 110.35 | 112.41 | 111.38 | 1.03 | 1.842 | 2.697 | 16.66 | 8.76 |
| 8 | 34.94 | 110.14 | 112.38 | 111.26 | 1.12 | 1.840 | 2.696 | 16.63 | 8.73 |
| 9 | 39.96 | 110.11 | 112.34 | 111.23 | 1.11 | 1.838 | 2.697 | 16.61 | 8.72 |
| 10 | 44.95 | 110.10 | 112.18 | 111.14 | 1.04 | 1.836 | 2.696 | 16.59 | 8.70 |
| 11 | 49.94 | 109.90 | 112.22 | 111.06 | 1.16 | 1.834 | 2.696 | 16.57 | 8.69 |
| 12 | 54.94 | 109.87 | 112.23 | 111.05 | 1.18 | 1.833 | 2.697 | 16.55 | 8.67 |

Tabla 2-2 Medidas obtenidas por software [3]

| Au | Angulo de contacto |
|------|--------------------|
| NSa | 51,7 ± 0,3 |
| MS1 | 97,5 ± 0,1 |
| NSnb | 95,6 ± 0,3 |

| Cu | Angulo de contacto |
|-----|--------------------|
| NSa | 98,6 ± 0,1 |
| MS1 | 90,1 ± 0,1 |

| PBCA | Angulo de contacto |
|------|--------------------|
| NSa | 78,1 ± 0,1 |
| MS1 | 83,7 ± 0,1 |
| MSg | 82,8 ± 0,2 |

Tabla 2-3 Ángulos de contacto de diferentes sustratos [3]

2.6 Técnicas para mejorar las propiedades hidrofóbicas

Las propiedades hidrofóbicas de cualquier superficie textil pueden verse mejoradas mediante la alteración química o física a nivel nanométrico de las fibras que componen el tejido. Estas pueden modificar sus características por medio de las siguientes técnicas [5]:

2.6.1 Producción de nanocomposites

Tiene como finalidad incorporar nanomateriales a las fibras de los tejidos para incrementar su capacidad hidrofóbica y aislante. Se emplea un polímero fundido al que se le añade el nanomaterial en su proceso de extrusión como materia prima para la producción de la fibra [5]. Actualmente el nanomaterial de relleno más extendido en la producción textil son los nanotubos de carbono, que combinados con el polímero extrusionado permiten obtener fibras con propiedades térmicas e hidrofóbicas mejoradas [6].

La combinación fibra-polímero es lo que se conoce como nanocomposites (Figura 2-15) que además de sus capacidades hidrofóbicas optimizadas, presentan capacidades permanentes de autolavado gracias a su nanoestructura repelente que evita la adhesión de suciedad y humedad sobre su superficie y facilitan la limpieza de la misma sin apenas sufrir degradación.

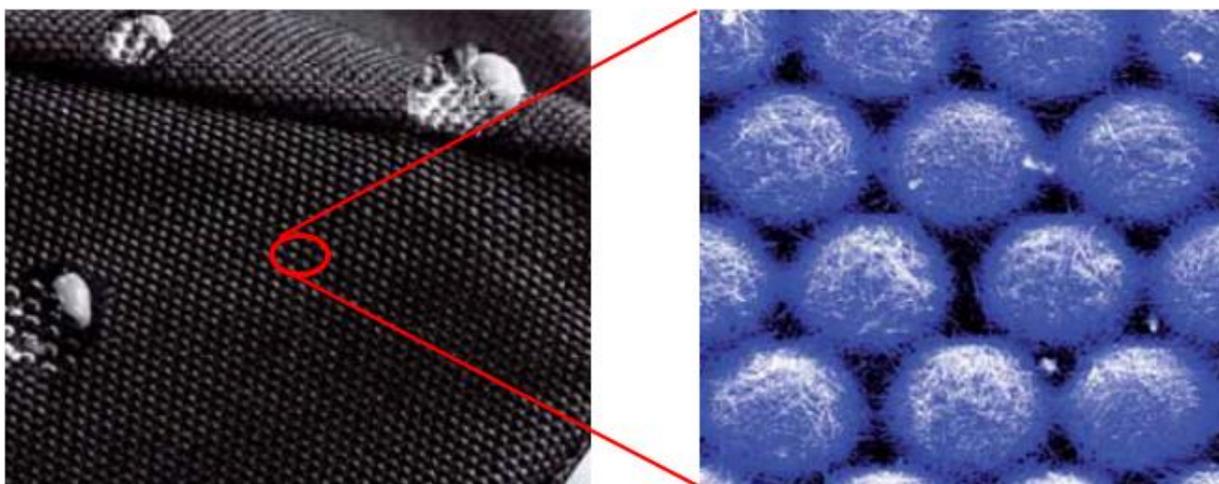


Figura 2-15 Superficie hidrofóbica con nanocomposites (izquierda). Estructura nanométrica del nanocomposite (derecha) [6]

2.6.2 Recubrimientos y películas

Otra forma de incorporar propiedades hidrorrepelentes a los tejidos es aplicar nanomateriales mediante películas protectoras y recubrimientos que pueden añadirse sobre la prenda ya confeccionada o bien sobre los hilos con los que se teje la ropa. El recubrimiento puede actuar directamente como capa protectora de aislamiento o en su lugar ser la capa transportadora con la se depositan los nanomateriales sobre la superficie que se desea tratar [5]

Los principales métodos de aplicación de nano recubrimientos y películas protectoras son los siguientes:

2.6.2.1 Método directo de impregnación

Se trata de un proceso en mojado en el que un recipiente contiene la disolución de nanopartículas con propiedades hidrofóbicas. Inicialmente la tela se estira y se hace pasar por el recipiente para que esta se impregne del recubrimiento protector. A continuación dos cilindros presionan el tejido para eliminar el exceso de líquido y finalmente una cámara, bajo unas condiciones de presión y temperatura

controladas, seca y asegura una buena reticulación y adhesión de las nanopartículas a la superficie de la tela [7].

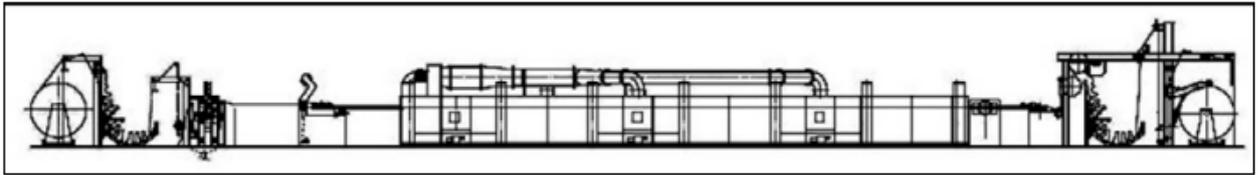


Figura 2-16 Esquema de producción de un sistema de impregnación directa

2.6.2.2 Método de impregnación, secado y curado (Pad-dry-cure method)

La prenda de igual manera que en el método de impregnación directa, se hace pasar por una serie de baños con soluciones de nanopartículas y se seca a continuación, pero adicionalmente es sometida a un proceso de curación bajo condiciones de presión y temperatura determinadas [7].

La tela es bañada en una disolución líquida con nanopartículas hidrofóbicas, para posteriormente aplicarle presión a través de dos rodillos que estiran el tejido y eliminan la disolución sobrante. El tejido una vez recubierto pasa a una cámara de secado y finalmente a otra de curado que permite mejorar la impregnación y la reticulación nanométrica de las partículas [8].

A la hora de aplicar este tipo de método, las consideraciones más importantes a tener en cuenta son la capacidad de absorción de la fibra con la que está confeccionada la tela, así como el contenido de sólidos que puedan existir en la disolución, ya que ha de ser lo más líquida posible y estar libre de componentes sólidos que puedan dificultar la impregnación del recubrimiento.

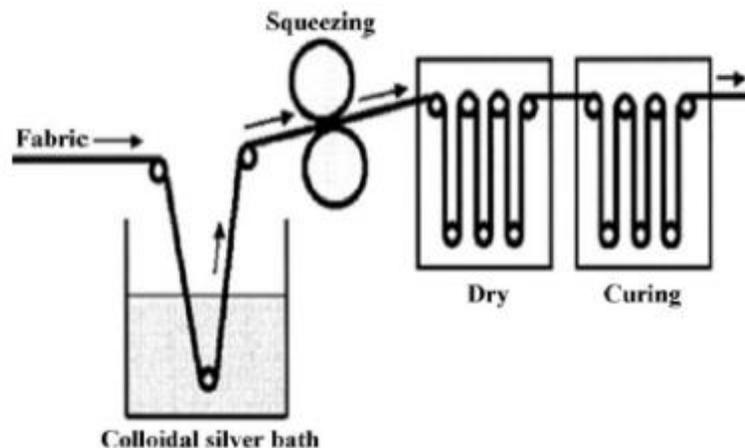


Figura 2-17 Esquema simplificado del proceso de impregnación, secado, curado [5]

2.6.2.3 Ensamblaje por capas (Layer by layer assembly)

Consiste en la creación de varias películas protectoras de nanomaterial mediante interacciones electrostáticas. Se basa en la adsorción alterna de nanopartículas formadas por deposición electrolítica de polímeros con carga opuesta (polielectrolitos). El sustrato se sumerge en una serie de soluciones de polielectrolitos opuestamente cargados, de manera que se consigue el ensamblaje de capas alternantes, cargadas positiva y negativamente, que se van apilando sucesivamente sobre la superficie del sustrato [5].

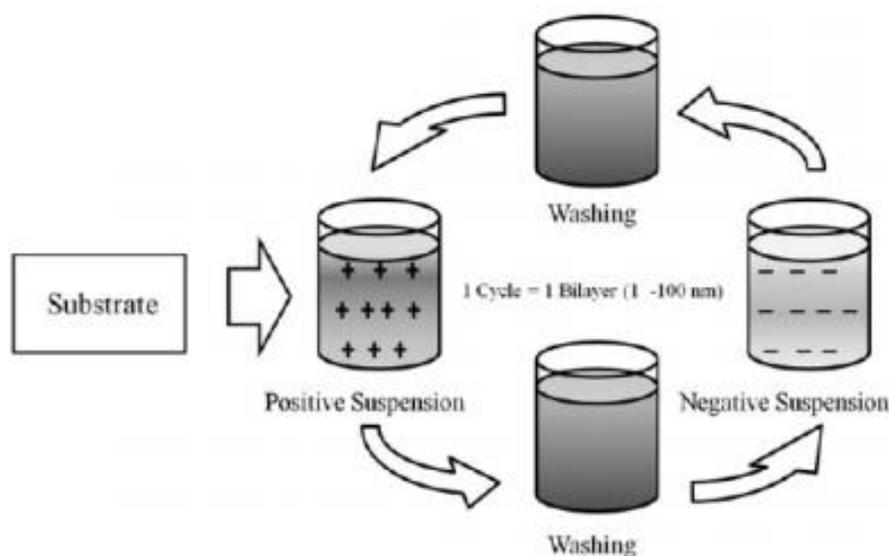


Figura 2-18 Representación de un proceso de ensamblaje por capas [5]

El ensamblaje por capas o también conocido autoensamble electrostático, suele realizarse mediante la deposición de nanocapas de polielectrolito combinado con sílice. El tejido resultante adquiere propiedades hidrofóbicas optimizadas que aumentan cuanto mayor sea el número de capas agregadas. La superficie textil obtenida adquiere un excelente comportamiento hidrofóbico además de capacidad de auto lavado [9].

2.6.2.4 Proceso Sol-Gel

Se basa en una reacción que tiene lugar en dos pasos (hidrólisis y condensación), a temperaturas cercanas a la ambiental. Se parte de una suspensión de partículas coloidales de alcóxidos semi-metálicos en un medio líquido denominado sol, para obtener recubrimientos inorgánicos o híbridos orgánicos – inorgánicos a medida que tiene lugar la hidrólisis y condensación de este sol para formar una red porosa tridimensional formada por interconexiones de partículas sólidas en un medio líquido que queda inmovilizado por la fase sólida denominada gel [10].

A medida que avanza el proceso de secado y se elimina la fase líquida es posible obtener un xerogel (cuando el secado se produce a temperaturas inferiores a los 100°C), o un aerogel cuando el secado tiene lugar a altas temperaturas, produciéndose una densificación del material conducente a un cristal totalmente compacto.

Las propiedades estructurales de los materiales obtenidos así como su morfología se ve influenciada por diversos parámetros tales como disolución de alcóxidos semi-metálicos, para obtener recubrimientos inorgánicos o híbridos orgánicos – inorgánicos.

El control de los parámetros de la reacción, como la acidificación del pH que hace que la reacción de condensación se vea favorecida frente a la hidrólisis, temperatura (que influye en la formación de un xerogel o un aerogel), relación agua: alcóxido (baja cantidad de agua implica que la hidrólisis sea incompleta), naturaleza y estructura de alcóxidos, tiempo de reacción y concentración de precursores, determina la morfología y estructura de la red de óxidos que forma el recubrimiento.

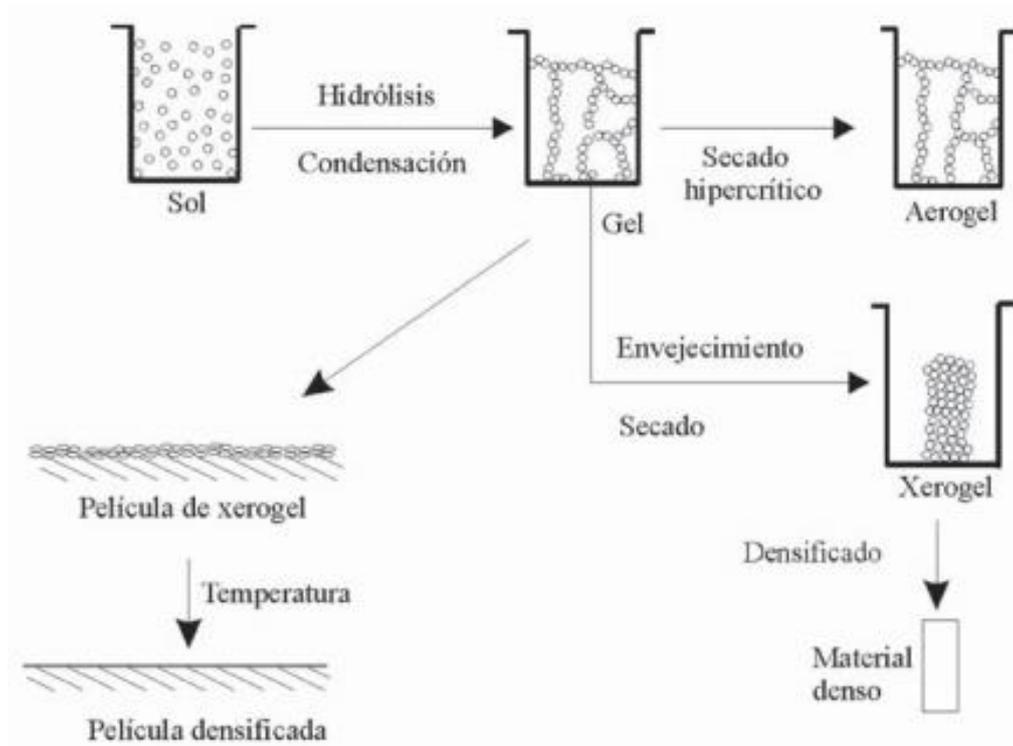


Figura 2-19 Esquema del proceso sol-gel [10]

2.6.2.5 Tratamiento de plasma

Se trata de una técnica novedosa para dotar a los tejidos de funcionalidades y propiedades mejoradas a través de plasma polimerizado como sustituto a los procedimientos químicos convencionales que suelen ser tratamientos de durabilidad escasa propensos a restar confort térmico, ya que tienden a absorber los productos de impregnación nanométrica en detrimento de la transpirabilidad de la prenda [5].

Es por ello que el tratamiento de plasma se presenta como alternativa a los tratamientos químicos de superficies textiles, debido a que permite agregar pequeños grupos de nanomoléculas sobre distintos tipos de sustratos mediante la polimerización por plasma, sin prácticamente alterar el resto de propiedades. El cuarto estado de la materia, o plasma, no es más que un gas ionizado de naturaleza orgánica a partir del cual tiene lugar la polimerización y deposición de capas finas de recubrimiento con propiedades de alta repelencia al agua y transpirabilidad, que además puede ser combinada con otras técnicas de recubrimiento de tejidos [11].

Los procesos de tratamiento con plasma se llevan a cabo en reactores cerrados en condiciones de vacío, mediante la tecnología de plasma a baja presión (Figura 2-20). Bajo estas condiciones de vacío, presión reducida y con la ayuda un arco eléctrico, se genera una corriente de gas parcialmente ionizado a alta temperatura, conocido como plasma, que se aplica directamente sobre un gas inerte en suspensión que contiene el material de impregnación hidrorrepelente, para proyectarlo sobre el sustrato a recubrir [5].



Figura 2-20 Cámara reactor de plasma [11]

Al poner en contacto los gases orgánicos con el plasma, se producen productos similares a los polímeros y estos se adhieren a la superficie de los sustratos que se encuentren dentro de la cámara de reacción, que en el caso de la producción textil será la fibra del tejido a confeccionar (Figura 2-21).

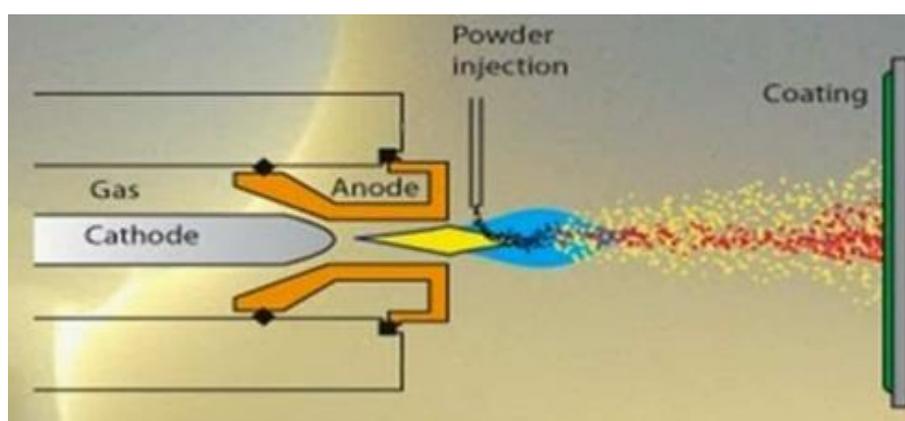


Figura 2-21 Recubrimiento mediante tratamiento de plasma [5]

La utilización de recubrimientos y películas a través del plasma representa una técnica versátil que permite emplear diferentes tipos de nanopartículas independientemente de la fibra utilizada. El recubrimiento resultante que queda aplicado sobre la superficie del tejido, es de espesor muy fino (inferior a una micra), el cual no interfiere sobre otras propiedades de la prenda y permite la sucesión de numerosos ciclos de lavado permanentes gracias a la capacidad de adhesión y resistencia de la capa protectora [5].

2.6.3 Incorporación de membranas con características nanoscópicas

Es posible incorporar membranas con alguna característica nanoscópica de interés hidrofóbico e hidrorrepelente para la prenda, combinando capas de tejido tratados o no hidrofobicamente, con una capa intermedia de separación entre ambas, tal y como se puede apreciar en la Figura 2-22:

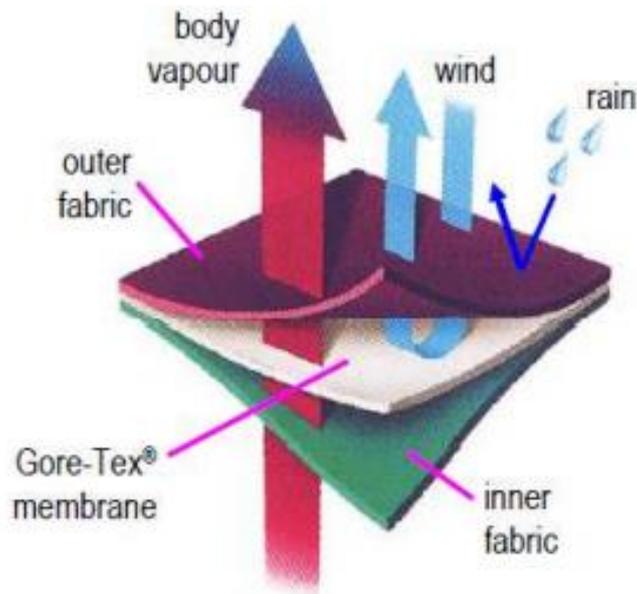


Figura 2-22 Incorporación de membrana de Gore-Tex® con nanopartículas de carbono [5]

Las membranas en industria textil son definidas como barreras semipermeables que actúan como separación física entre dos fases. La introducción de membranas en la confección de cualquier tejido confiere excelentes propiedades hidrorrepelentes que pueden verse potenciadas en caso de someterlas previamente a tratamientos hidrofóbicos ya conocidos.

El proceso de separación de membranas consiste en intercalar una capa física de separación entre dos capas de tejido mediante el método de inversión de fases que constituye una de las técnicas más utilizadas para la fabricación de membranas poliméricas porosas, las cuales se obtienen a través de la precipitación de una solución polimérica sobre la superficie del sustrato que se desea introducir como capa de separación, para posteriormente someterlo a un proceso de inmersión en un baño de solución no disolvente [12].

El hecho de incorporar una membrana porosa, gracias a la precipitación de la solución polimérica, aporta transpirabilidad sin perder la capacidad de aislamiento hidrofóbico, ya que permite la disipación de calor en un sentido mientras que impide el paso de la humedad en el sentido opuesto.

El siguiente diagrama representa el proceso de producción de una prenda textil con nanomembranas impermeables. Tal y como muestra la Figura 2-22, se van agregando en diferentes puntos del proceso características nanoscópicas en forma de nanocomposites, nanorecubrimientos o nanomembranas [5].

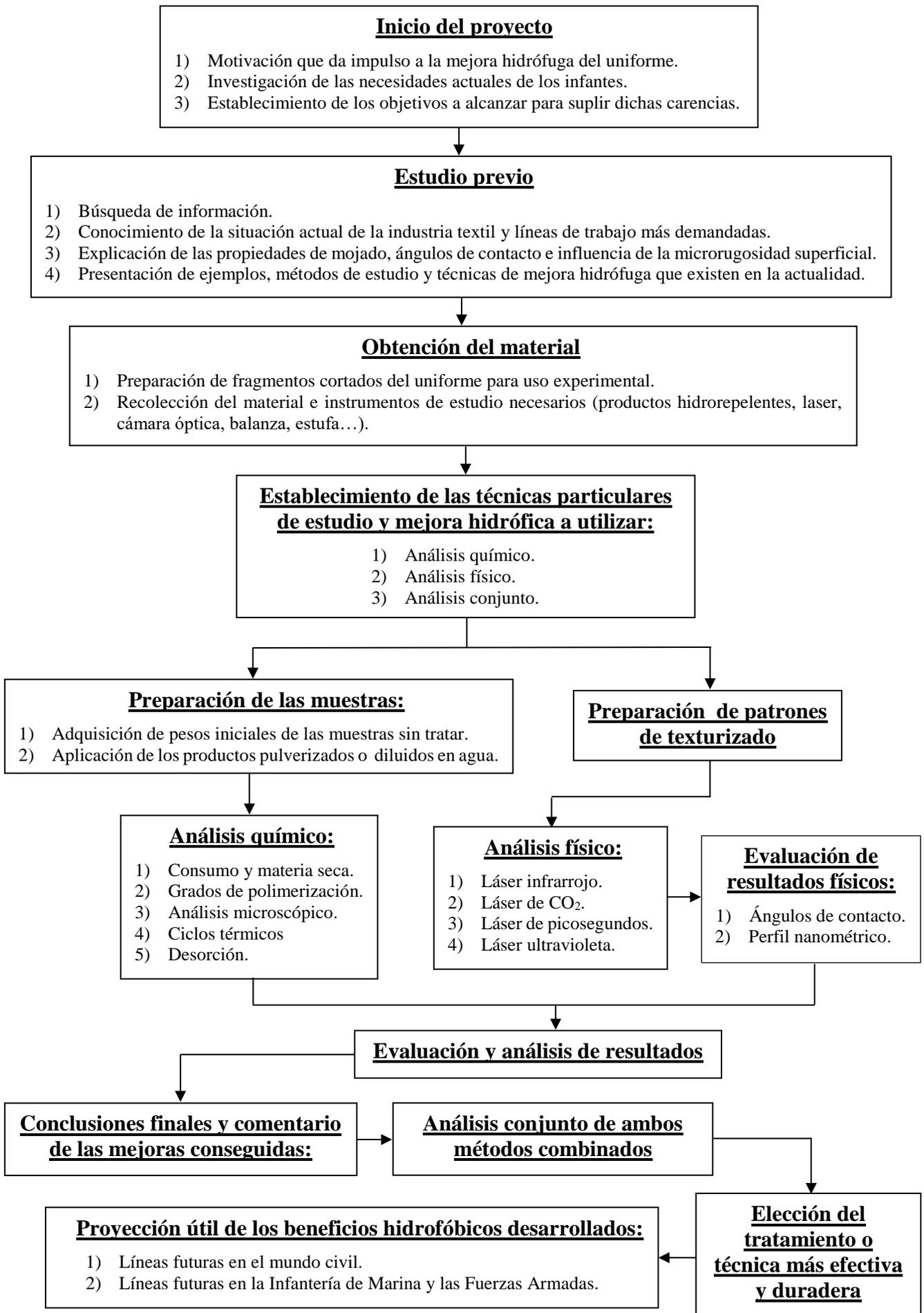
3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Etapas del desarrollo del TFG

El procedimiento de elaboración y desarrollo de este trabajo se ha dividido en las siguientes etapas:

- Aplicación de tratamientos químicos en forma de recubrimientos hidrofóbicos con diferentes productos de diversa composición. En este trabajo se ha realizado la aplicación de los diferentes tratamientos siguiendo las pautas fijadas por el fabricante, pero también se ha evaluado el comportamiento de cada tratamiento después de incrementar el número de aplicaciones recomendadas.
- Análisis de la eficacia y penetrabilidad de los tratamientos aplicados, basados en el estudio del ángulo de contacto, evaluación de los procesos de secado y polimerización y durabilidad de los mismos ante ensayos de térmicos de calentamiento y enfriamiento.
- Análisis de los procesos de secado, polimerización y durabilidad de los mismos ante ensayos de térmicos de calentamiento y enfriamiento.
- Aplicación de tratamientos físicos mediante técnicas de ablación y texturizado láser.
- Análisis de la microrugosidad superficial resultante y su influencia en las propiedades hidrofóbicas del tejido.
- Realización simultánea de ambos tratamientos para el estudio conjunto de sus propiedades combinadas.
- Estudio de los resultados obtenidos a través de los procedimientos químicos y físicos implementados.
- Elección del método más óptimo en términos de efectividad y durabilidad, así como justificación detallada de la opción escogida.

A continuación se presenta, a modo resumen, un diagrama explicativo del proceso global que se ha seguido a lo largo de todo el desarrollo partiendo de lo más genérico hasta lo más particular, para poder abordar de forma satisfactoria este estudio y alcanzar los objetivos propuestos para este trabajo:



3.2 Técnicas a desarrollar

3.2.1 Recubrimientos químicos

Se basan en la mayoría de procesos industriales comentados en capítulos anteriores, que se asientan en el concepto de aplicación nanométrica de recubrimientos y capas de protección hidrofóbica sobre la superficie del tejido a hidrofugar, tal y como ocurre en procesos ya conocidos como el método directo de impregnación o el ensamblaje por capas.

Lógicamente a nivel experimental de laboratorio se efectuarán técnicas de impregnación directa por pulverización o dilución en agua del producto, de manera manual sin procesos industriales complejos de secado, curación o estirado de la tela, ni tampoco se va a provocar un proceso de polimerización optimizado mediante tecnología de plasma, sino que el polimerizado de cada compuesto tendrá lugar de manera natural.

El objetivo primordial de esta técnica es desarrollar un método de uso sencillo y de fácil aplicación, aprovechando las nanopartículas hidrorrepelentes presentes en los diferentes productos seleccionados, para crear una película protectora contra la humedad y el agua, en diferentes condiciones de secado, choque térmico, número de aplicaciones etc.

Dada la naturaleza química de esta técnica, los recubrimientos hidrofóbicos realizados persiguen un alto grado de polimerización de los compuestos con las fibras de la tela, como barrera de aislamiento y protección contra el mojado, cuyos resultados más visuales e inmediatos serán comprobados en múltiples ocasiones mediante la medición del ángulo de contacto entre la gota y la superficie a través de una equipo óptico informático de adquisición de datos y tratamiento de imágenes.

Por todo ello la técnica a desarrollar mediante recubrimientos químicos, busca una optimización efectiva y duradera de las propiedades hidrofóbicas del tejido, escogiendo entre los cuatro productos que se contemplan, aquel cuya mejora hidrofóbica del tejido supere la del resto de productos.

3.2.2 Texturizado láser

Las técnicas de texturización láser constituyen un método de procesamiento físico de superficies, muy presentes en multitud de aplicaciones industriales, principalmente de modificación microestructural de superficies sólidas.

Sin embargo no existen evidencias del uso de esta técnica dentro del sector textil, por lo que el núcleo central de este bloque estará orientado a la experimentación física de cuatro fuentes de procesamiento láser, modificando los parámetros de texturización para proceder así al análisis y evaluación de resultados, mediante la medición de ángulos de contacto y adquisición de imágenes a escala nanométrica del perfil rugoso obtenido de la superficie procesada.

El concepto fundamental en el que se apoya cualquier técnica de texturización y modificación superficial de materiales con fines hidrorrepelentes, es el mismo que se comentó en el apartado de Métodos y ejemplos de estudio, basado en la creación de perfiles rugosos caracterizados por la superposición de crestas e irregularidades superficiales que favorezcan la aparición de micro cavidades a lo largo de la superficie texturizada. Los espacios intersticiales que quedan comprendidos entre las crestas y valles del perfil que se obtiene a través de este método, sostienen la superficie acuosa cuando ésta se deposita sobre el tejido, gracias al volumen de aire que se aloja dentro de dichas cavidades, las cuales mantienen la tensión superficial del líquido e impiden que este penetre y moje la superficie.

La finalidad del estudio físico de la interacción láser-tejido, es imitar el comportamiento hidrófugo de los materiales nanométricamente modificados, mediante la combinación adecuada de parámetros que permita caracterizar un patrón de texturizado óptimo, capaz de potenciar las propiedades hidrófugas del uniforme de Infantería de Marina, verificando la validez o el rechazo del procesamiento láser como método de mejora, a través del ensayo de la gota yacente y el análisis nanométrico del perfil resultante.

Asimismo la obtención de un patrón óptimo de texturización permitirá estudiar la posibilidad de combinarlo con el tratamiento químico más efectivo de los cuatro productos estudiados en el bloque anterior, para combinar las propiedades de ambas técnicas en un único tratamiento común del tejido procesado tanto física como químicamente, con la finalidad de evaluar la efectividad del tratamiento mediante un último análisis conjunto del tejido texturizado e hidrofugado químicamente.

3.3 Materiales empleados

3.3.1 Uniforme de Infantería de Marina

Esta prenda constituye la vestimenta de campaña reglamentaria de la Infantería de Marina Española, compuesta por un 70 % de algodón y un 30 % de poliamida, que le otorga rigidez y resistencia a la deformación, al choque térmico, y al contacto con sustancias químicas disolventes.

En la Figura 3-1, se aprecia como se entrecruzan las distintas fibras que conforman el tejido del uniforme. Además, en el análisis EDS realizado aparece claramente la señal del carbono correspondiente a los dos tipos de fibras presentes.

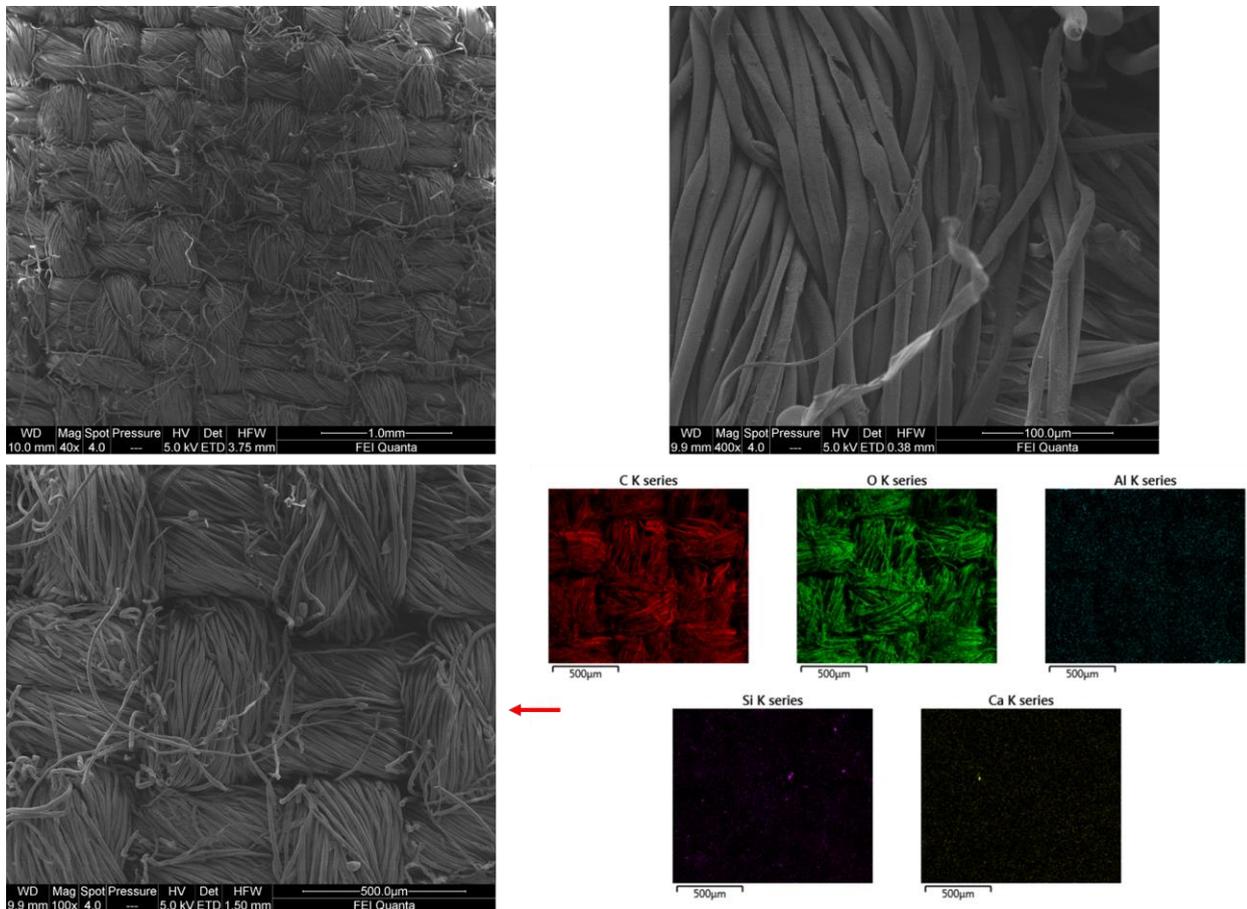


Figura 3-1 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del C y el O

No obstante, esta combinación de tejidos no presenta por sí misma ninguna capacidad hidrófuga de repelencia al agua, ya que como bien se pudo comprobar en la Figura 3-2, se efectuó el ensayo de la gota sobre la superficie original del tejido sin ningún tipo de tratamiento previo, siendo rápidamente absorbida por la tela sin apenas dejar tiempo para la medición de ángulos de contacto. Esto puede relacionarse claramente, no sólo con la capacidad de absorción de líquidos que tienen estas fibras sino también con el espacio existente entre ellas.

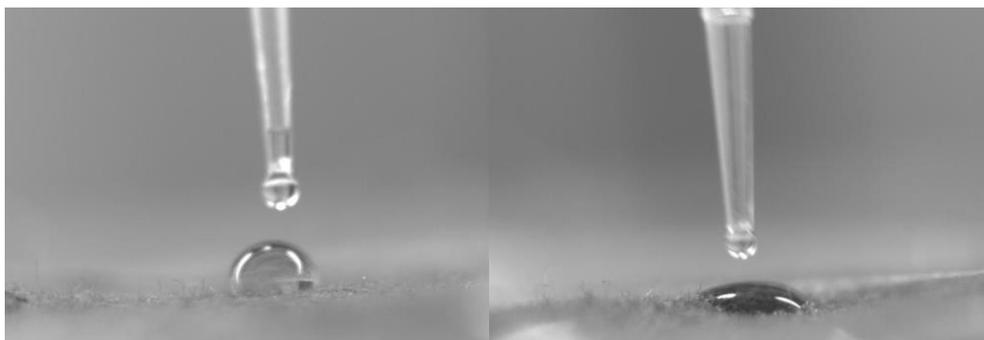


Figura 3-2 Gota recién aplicada (izquierda) y parcialmente absorbida 10 segundos después de la primera aplicación (derecha)

La intención de este ensayo inicial era tomar como parámetro de referencia el ángulo de contacto medio de un conjunto de muestras de tela sin tratar y evaluar de esta manera los cambios experimentados en las propiedades del tejido, a medida que se han ido implementado sucesivamente todas las técnicas de mejora hidrófuga contempladas para este proyecto, pero el claro comportamiento hidrofílico de la tela confirmó la falta de hidrofobicidad de la misma, la cual pone de manifiesto una carencia evidente en las propiedades iniciales del tejido y la necesidad de suplirla a través de técnicas y tratamientos hidrofóbicos efectivos.

Para la realización de este TFG se tomó un uniforme mimético del cuerpo de Infantería de Marina del ejército español.

El uniforme se cortó en diferentes fragmentos: un total de 72 muestras de aproximadamente 3,5 x 3,5 cm de tamaño para análisis químico, cinco muestras de 15 x 17 cm para análisis físico y un trozo de 15 x 17 cm para el análisis conjunto de los dos mejores tratamientos (producto químico-láser).



Figura 3-3 Ejemplo muestra para análisis químico (izquierda) y muestra para análisis físico (derecha)

En segundo lugar los productos hidrofugantes empleados en los procesos de recubrimiento hidrofóbico y análisis químico son los siguientes:

3.3.2 Productos químicos nanohidrofugantes

Para este estudio se seleccionaron cuatro productos nanohidrofugantes comerciales de diferente composición química. Esta selección se llevó a cabo para determinar qué tipo de nanopartículas pueden conferir al uniforme de marina una mayor protección de manera que el análisis posterior de los diferentes comportamientos evaluados sirva de base para futuros trabajos en los que se tratará de sintetizar nanopartículas de una determinada naturaleza para mejorar la capacidad de hidrofugación de los uniformes.

Los compuestos seleccionados se aplicaron sobre los fragmentos de tela siguiendo las especificaciones del fabricante. Además, en algunas muestras de tela se procedió a la realización de tres aplicaciones del producto con objeto de analizar si una mayor aplicabilidad incrementa la capacidad hidrófuga, la penetrabilidad y la durabilidad del tratamiento.

En concreto, los compuestos químicos seleccionados para este trabajo fueron los siguientes:

- **Nikwax Cotton Proof:**

Se trata de un compuesto en base acuosa que lleva en su composición acetato de zirconio, propano y ácido acético. Este producto impermeabilizante está pensado para el lavado de materiales transpirables de algodón, polialgodón y lona ya que es soluble en agua y aceite. La aplicación del producto deposita un tratamiento flexible y resistente, repelente al agua, que permite el paso del vapor, manteniendo la transpirabilidad del tejido, y prolongando la vida útil de la prenda bajo condiciones de frío y clima húmedo.

Su modo de aplicación es diluido en agua por lo que en caso de las muestras tratadas con este producto, éstas se han sumergido por completo en una mezcla de producto con agua (100 ml de producto vertido en el vaso de precipitado y 400 ml de agua), manteniendo en todo momento una cierta agitación durante 5 minutos para impregnarlas en su totalidad.



Figura 3-4 Nikwax Cotton Proof

- **Tecnadis Coatex:**

Tecnadis Coatex es un producto repelente al agua y la contaminación basado en nanopartículas de altas prestaciones que se emplea para impermeabilizar los tejidos naturales o sintéticos y facilitar su limpieza sin modificar su aspecto original. Este producto facilita la eliminación de manchas tanto acuosas como oleosas ya que impide que estas penetren en el tejido, pero en el caso de los ensayos hidrofóbicos que competen a este trabajo se analizará su efectividad únicamente en presencia de agua.

Está diseñado para ser aplicado tanto en tejidos lavables como no lavables y permite la transpirabilidad natural de los mismos sin sellarlos con la formación de una película hidrorrepelente. La aplicación del producto se realizó a través de la pulverización del producto mediante spray (3 pulverizaciones por aplicación hasta que se apreció que la tela mostraba un aspecto húmedo).



Figura 3-5 Tecnadis Coatex

- **Hendlex Cabrio Protect:**

Producto nano impregnante de larga duración para calzado y artículos textiles, que protege la prenda de la penetración de líquidos y aceites, manteniendo a su vez la respirabilidad de la superficie impregnada. Actúa como protector textil completamente inodoro libre de silicona, por lo que no produce un aspecto opaco o húmedo de la superficie recubierta. El método de aplicación fue similar al del Tecnadis.



Figura 3-6 Hendlex Carbon Protect

- **Nasiol:**

Producto de nano revestimiento no tóxico desarrollado para superficies textiles, que se aplica por pulverización y asegura una fácil limpieza a la vez que proporciona propiedades superhidrofóbicas y oleofóbicas.

Impide el paso de cualquier agente en estado líquido, protegiendo y extendiendo la vida útil de la superficie textil impregnada, sin detrimento alguno de la transpirabilidad del tejido y con un desempeño sobresaliente hasta 10 lavados. El modo de aplicación fue similar al seguido al aplicar el Tecnadiz y el Hendlex.



Figura 3-7 Nasiol

3.3.3 Equipos láser empleados

En tercer lugar el análisis físico se basa en el uso de una estación de marcado láser Q-switched Nd:YVO₄ Rofin Powerline E (Figura 3-8), compuesta por tres fuentes láseres de distinta longitud de onda (infrarrojo, verde y ultravioleta) con ancho de pulso de nanosegundos, un láser de CO₂ Rofin Synrad 48-2 (Figura 3-9) que trabaja en modo continuo (CW), y un láser Q-switched Nd:YVO₄ Rofin Powerline Pico (Figura 3-10) con ancho de pulso de picosegundos, todos ellos facilitados por la Universidad de Vigo, a partir de los cuales se modificará la microrugosidad del tejido incidiendo sobre diferentes áreas de la tela, con parámetros de trabajo variables a fin de evaluar y analizar el comportamiento hidrófugo

resultante en cada zona y seleccionar de esta manera los parámetros de procesamiento y texturizado más óptimos para la mejora hidrofóbica del tejido.

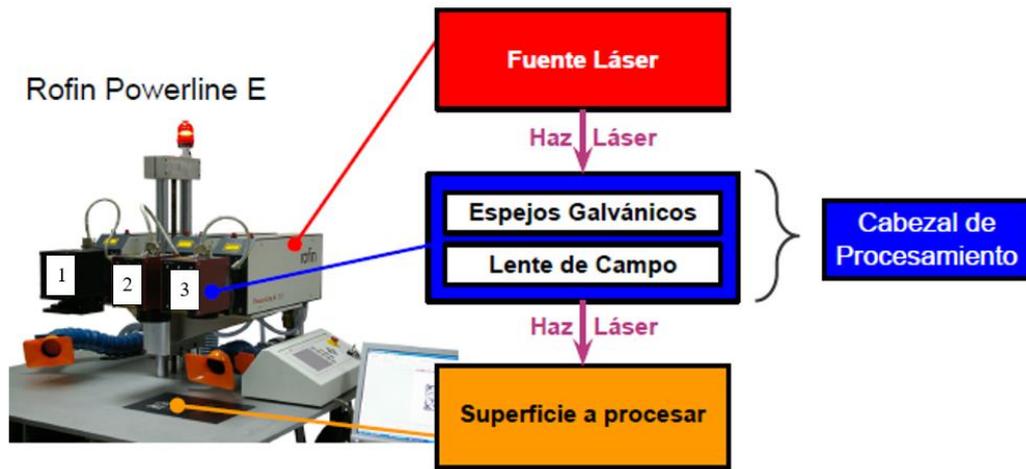


Figura 3-8 Estación de marcado láser Rofin Powerline E: infrarrojo 1, verde 2, ultravioleta 3 [13]

Rofin Synrad 48-2

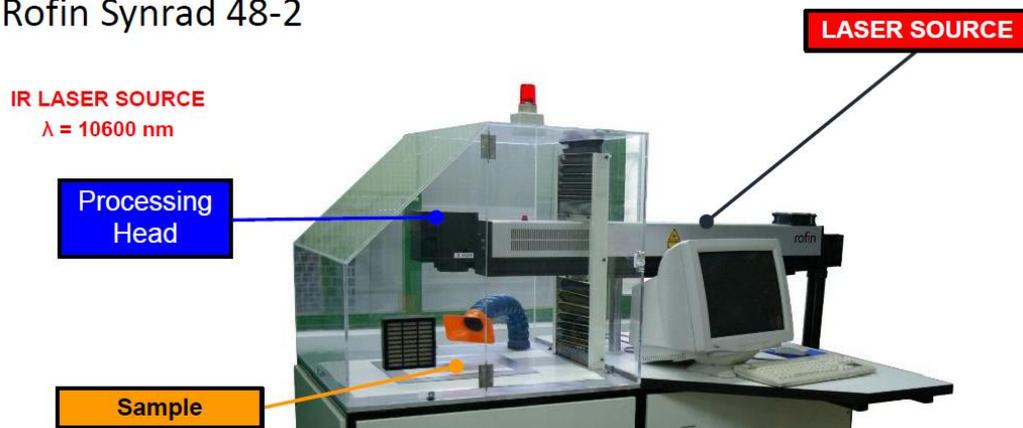


Figura 3-9 Láser de CO₂ [13]



Figura 3-10 Láser de Picosegundos [13]

En todos los casos, los sistemas funcionan de forma análoga, donde cada una de las fuentes presenta un cabezal independiente, conocido como cabezal de marcado, compuesto por dos con dos espejos galvánométricos dirigibles que guían el haz hacia el punto deseado, tal y como muestra la Figura 3-11.

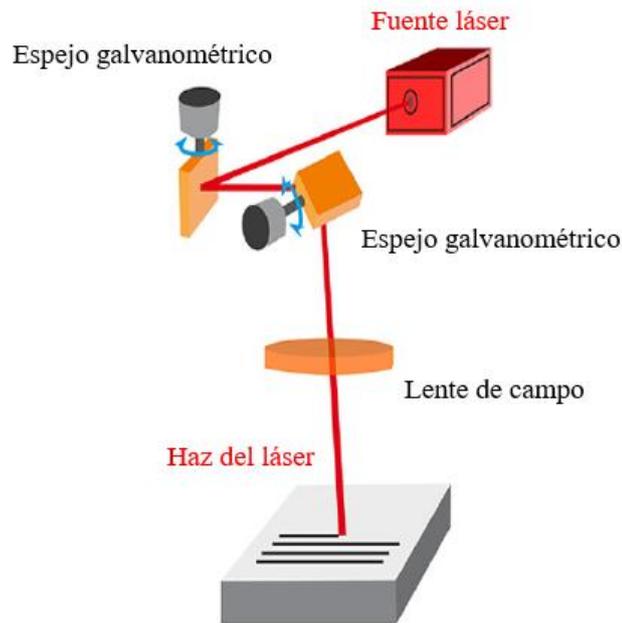


Figura 3-11 Esquema simplificado de las estaciones láser [14]

En todos los tipos de láseres citados anteriormente, la estación de trabajo está basada en lo que se conoce comúnmente como sistema de marcado, en el cual se dispone de una fuente generadora del haz láser, un sistema óptico que conforma el cabezal de marcado y los dos espejos galvanométricos que desvían el haz láser con gran precisión y altas velocidades de barrido, además de una lente de campo (lente F-Theta) para focalizar el haz sobre la superficie a procesar. Además, mediante el software proporcionado por el fabricante de los láseres se puede crear el patrón de tratamiento deseado.

En la Tabla 3-1 se presenta una compilación de las características técnicas del sistema de marcado con las tres fuentes láser que lo constituyen, junto con la Tabla 3-2 y Tabla 3-3, que incluyen las características técnicas del láser de CO₂ y el láser de picosegundos respectivamente.

| Fuente Láser | Longitud de onda | Ancho de pulso | Frecuencia | Potencia | Distancia focal |
|--------------|------------------|----------------|----------------|----------|-----------------|
| Ultravioleta | 365 nm | 10 ns | 20 – 200 kHz | 2 W | 235 mm |
| Verde | 532 nm | 14 ns | 20 – 200 kHz | 8 W | 365 mm |
| Infrarrojo | 1064 nm | 20 ns | 1-200 kHz (CW) | 20 W | 211 mm |

Tabla 3-1 Datos técnicos del equipo Rofin Powerline E [13]

| Fuente Láser | Longitud de onda | Ancho de pulso | Frecuencia | Potencia | Distancia focal |
|-----------------|------------------|----------------|-------------------|----------|-----------------|
| CO ₂ | 10600 nm | 10 – 1000 ns | 0,3 – 30 kHz (CW) | 25 W | 300 mm |

Tabla 3-2 Datos técnicos del equipo Rofin Synrad 48-2 [13]

| Fuente Láser | Longitud de onda | Ancho de pulso | Frecuencia | Potencia | Distancia focal |
|--------------|------------------|----------------|----------------|----------|-----------------|
| Infrarrojo | 1064 nm | 800 ps | 15,2 – 200 kHz | 8 W | 180 mm |

Tabla 3-3 Datos técnicos del equipo Rofin Powerline Pico [13]

3.4 Metodología

Para abordar el estudio hidrofóbico del tejido se ha tomado como línea de investigación la realización de tres métodos de análisis claramente diferenciados con los que comprender y modificar las propiedades hidrofóbicas de la prenda en cuestión, para la posterior obtención de resultados y evaluación del método más efectivo que permita incrementar las capacidades hidrófugas del uniforme de Infantería de Marina.

Estos métodos de estudio se pueden dividir principalmente en tres técnicas de análisis fundamentales: análisis químico, análisis físico y un análisis conjunto de ambos.

A lo largo de los siguientes apartados se explicará en detalle el concepto, la finalidad y el desarrollo a seguir en cada uno de ellos.

3.4.1 Tratamiento químico

Esta parte del estudio evaluará la eficacia de los cuatro productos hidrofóbicos que se mencionaron en el apartado anterior, destinados a crear sobre las superficies de los fragmentos, una capa de protección hidrófuga cuya duración y efectividad será estudiada mediante las técnicas que se detallarán en esta sección

Antes de proceder a la aplicación de cada uno de los tratamientos, los diferentes fragmentos de tela se pesaron (peso Mo). Transcurridas 24 horas, tiempo suficiente para la polimerización del producto, se procedió en algunas de ellas a realizar una nueva aplicación, mientras que en otras se tomó nuevamente el peso al dar por finalizado el tratamiento (peso Mf). Cabe recordar, tal y como se indicó en el apartado anterior, que por cada producto se hicieron dos tipos de tratamientos diferentes. En uno de ellos únicamente se realizó una aplicación del producto, siguiendo las recomendaciones del fabricante, mientras que en el otro se incrementó el número de aplicaciones a tres.

Con el fin de evaluar la interacción de los productos con el tejido y su respuesta hidrofóbica en presencia de agua, se determinaron los siguientes parámetros, que se analizarán en detalle en los siguientes puntos:

- Consumo y materia seca y grado de polimerización.
- Análisis microscópico del recubrimiento por SEM.
- Capacidad hidrófuga y penetrabilidad mediante el ángulo de contacto.

Para evaluar la eficacia de cada uno de los tratamientos, se procederá a someter a las telas tratadas a ensayos de alteración acelerados, diseñados expresamente para este trabajo. Los resultados obtenidos serán comparados con los de las telas sin tratar. Concretamente, los ensayos realizados, que se comentarán posteriormente con suficiente profundidad y detalle, fueron:

- Ensayo de sales y choque térmico.
- Ensayo de hielo-deshielo.
- Secado y desorción.

Para determinar la durabilidad del tratamiento hidrofóbico aplicado sobre los fragmentos de tela, después de estos ensayos de alteración, se procedió nuevamente a la medición del ángulo de contacto entre el líquido (agua destilada) y el sustrato sólido (tela con o sin tratamiento).

El análisis global de los resultados permitirá analizar cómo se han mejorado las propiedades de la tela y llevar a cabo la elección final del producto más idóneo para la consecución de los objetivos marcados en este trabajo.

Consumo, materia seca y grados de polimerización

Para el estudio que se nos presenta en esta parte del análisis químico, únicamente tendremos en cuenta los pesos iniciales y finales después de cada aplicación para la obtención de dos nuevos parámetros, consumo y materia seca, cuya diferencia tal y como veremos nos indica la cantidad de

producto que permanezca consolidado o polimerizado en la fibra. Ambos parámetros son ampliamente utilizados en numerosos estudios centrados en la aplicación de recubrimientos, ya sean hidrofugantes o consolidantes, sobre cualquier tipo de sustrato [15] [16] [17].

El consumo por sí solo mide la cantidad de compuesto que ha quedado impregnado sobre la tela en cada aplicación. Para ello se caracterizan los valores de los pesos como el peso inicial M_0 de cada muestra antes de la aplicación, y como el peso final M_a de cada fragmento con el tratamiento recién aplicado justo después de la aplicación. Así pues, la relación de consumo queda expresada de la siguiente manera:

$$\text{Consumo \%} = \left(\frac{M_a - M_0}{M_0} \right) \cdot 100$$

Por el contrario, la materia seca permite averiguar la proporción de compuesto que ha quedado finalmente impregnado entre las fibras de la tela. Es por ello que este parámetro recibe también otro nombre complementario íntimamente relacionado con el siguiente apartado de grados de polimerización, conocido como materia seca polimerizada, debido a que mide la cantidad de materia que permanece en la tela, transcurrido el tiempo de polimerización estipulado por el fabricante, ya que parte del producto aplicado se evapora (el disolvente), mientras que otra parte polimeriza adhiriéndose a las microfibras del tejido (materia activa). Conforme a este cálculo se consideran al igual que en el cálculo anterior, los pesos iniciales M_0 de los fragmentos de tela, pero a diferencia de la medición de consumos cuyos pesos finales se miden inmediatamente después de la aplicación realizada, en este caso únicamente se toman los pesos finales M_f obtenidos tras la última aplicación, una vez transcurrido el tiempo de polimerización estipulado. Como resultado, la ecuación de la materia seca polimerizada recibe la siguiente expresión:

$$\text{Materia seca \%} = \left(\frac{M_f - M_0}{M_0} \right) \cdot 100$$

En lo referente al procedimiento de cálculo y análisis de consumos y materia seca llevados a cabo durante este proyecto, se han efectuado los cálculos respectivos para las muestras en las que se realizó únicamente una aplicación y para las muestras en las que se realizaron tres aplicaciones.

Por todo lo anteriormente expuesto el objetivo de esta parte del análisis químico es comparar la efectividad de los productos aplicados en términos de compuesto consumido y compuesto adherido o secado para dar paso a la siguiente parte del análisis enfocada al grado de polimerización de los productos, que se apoya en el cálculo previo de ambos parámetros anteriores.

Una vez conocidos los datos de consumo y materia seca, se procedió al cálculo del grado de polimerización, que evalúa la consolidación final de producto que queda en la tela una vez han sido aplicados los recubrimientos químicos anteriormente nombrados, es decir, la proporción total de producto depositado que realmente permanece impregnado en el tejido tras varias aplicaciones. El grado de consolidación del producto puede verse afectado por factores de diversa índole, como pueden ser las características iniciales de la fibra del tejido, las propiedades del propio producto, el método de aplicación, las condiciones ambientales principalmente de temperatura etc [18].

El cociente entre la materia seca depositada y el consumo experimentado, nos da el grado de consolidación de los productos empleados, que constituye en sí mismo el grado de polimerización de los recubrimientos químicos que se aplicaron. La fórmula que permite calcular el grado de polimerización del nanomaterial puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Grado de Polimerización \%} = \left(\frac{\text{Materia Seca}}{\text{Consumo}} \right) \cdot 100$$

Este parámetro nos permite caracterizar los productos en lo que a durabilidad del tratamiento se refiere, ya que una mayor polimerización del compuesto químico asegura una mejor fijación de las nanopartículas a la fibra de la tela y por lo tanto mayor resistencia y estabilidad frente a condiciones de

uso adversas como es el caso de los ciclos térmicos que también se han realizado y que se detallarán en apartados próximos.

En relación al procedimiento seguido para el estudio de los grados de polimerización, simplemente se ha dividido la materia seca final entre los consumos de cada aplicación, de manera que el resultado obtenido muestra la proporción que existe entre la cantidad de producto que ha quedado absorbido en el tejido y lo que consumió en cada aplicación, lo cual nos aporta información del grado de polimerización de cada producto, buscando siempre aquel cuyo valor sea siempre superior, ya que una polimerización elevada asegura la calidad y durabilidad del producto ante agresiones externas o ciclos de lavado continuados.

Se ha estudiado por tanto, el grado de polimerización que se consigue primero en una sola aplicación, restando a la materia seca los consumos registrados en dicha aplicación inicial, y finalmente se ha seguido el mismo procedimiento con la tercera y última aplicación. El hecho de evaluar la polimerización en más de una aplicación nos indica la necesidad o no de realizar más de un solo tratamiento para potenciar las propiedades hidrófugas del tejido, buscando siempre la mayor polimerización posible de los recubrimientos con las fibras del tejido a escala nanométrica.

Análisis microscópico del recubrimiento por SEM

Esta técnica pretende continuar el estudio del proceso de consolidación de los productos hidrofugantes, desde un punto de vista nanoestructural de los compuestos depositados sobre la tela y sus interacciones moleculares con las fibras textiles del tejido.

El equipo que se utilizó para tal cometido fue un microscopio ESEM para la toma y análisis de imágenes microscópicas del recubrimiento químico que queda polimerizado en el tejido. Concretamente se empleó un modelo FEI ESEM QUANTA 200 (Figura 3-12), propiedad también de la Universidad de Vigo, (cuyas especificaciones se detallan en la figura), que produce un haz de electrones mediante un cañón termoiónico, el cual posibilita la detección de electrones secundarios, retrodispersados y mapeado de Rayos X [13].



Figura 3-12 Microscopio SEM. Universidad de de Vigo C.A.C.T.I [13]

El principio de funcionamiento de este equipo se basa en las interacciones moleculares que se producen entre un haz de electrones incidente y la muestra a caracterizar. Está compuesto por diferentes detectores que permiten obtener información a partir de la corriente de electrones emitida y la radiación recibida de la muestra como consecuencia del haz incidente. Los tres detectores con los que cuenta el equipo para la realización de diferentes tipos de análisis son los siguientes [19] [13]:

- Detector de electrones secundarios (SE): permite generar imágenes de la topología superficial de la muestra analizada.
- Detector de electrones retrodispersados (BSE): genera imágenes orientadas a la representación de las distintas regiones de la muestra que poseen composición química diferente.
- Detector de rayos X: permite analizar la composición genérica de una zona concreta seleccionada de la muestra mediante el análisis del espectro de energía dispersada.

Constituye una técnica complementaria al análisis de los grados de polimerización dado que este método se limita a abordar el proceso de polimerizado y consolidación química desde un enfoque puramente cuantitativo de los datos obtenidos, en cuanto a pesos y proporción final de materia útil, en cambio mediante el análisis SEM se consigue llevar a cabo el estudio a nivel nanométrico de la polimerización del material hidrofóbico, a fin de analizar las interacciones moleculares entre las nanopartículas de la materia seca final de cada producto y las microfibras del tejido, e incluso permite realizar el análisis químico de la composición del recubrimiento utilizado, mediante el detector de electrones retrodispersados.

La técnica SEM consiste en un método de análisis microscópico no destructivo, que permite caracterizar superficialmente un determinado material, aportando información morfológica y química del mismo. Se trata de una herramienta ampliamente utilizada por el nivel de detalle y la rapidez que alcanza en la adquisición de micrografías superficiales, con aplicación directa en diversos campos como la biología, las ciencias ambientales, ciencias geológicas, y por supuesto las ciencias de los materiales con la que se corresponde el objeto de estudio de este proyecto dentro del ámbito textil [20] [13].

Gracias al análisis SEM es posible caracterizar una amplia variedad de materiales, entre los que cabría destacar por la estrecha relación que presenta con la mejora hidrófuga del tejido, materiales como polímeros, fibras, películas y recubrimientos nanoestructurados, y en algunos casos muestras con alto contenido en humedad e hidrogeles.

Para la realización de cualquier ensayo SEM es necesario el uso de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscopy), compuesto principalmente por un emisor de electrones y una columna dividida en varias lentes electromagnéticas de diferente tipología. La función del emisor es generar a lo largo de la columna un haz de electrones incidentes acelerados que viajan a través de las distintas lentes y un sistema de deflexión que permite manipular el haz de electrones para poder efectuar un barrido superficial completo de la muestra. [21]

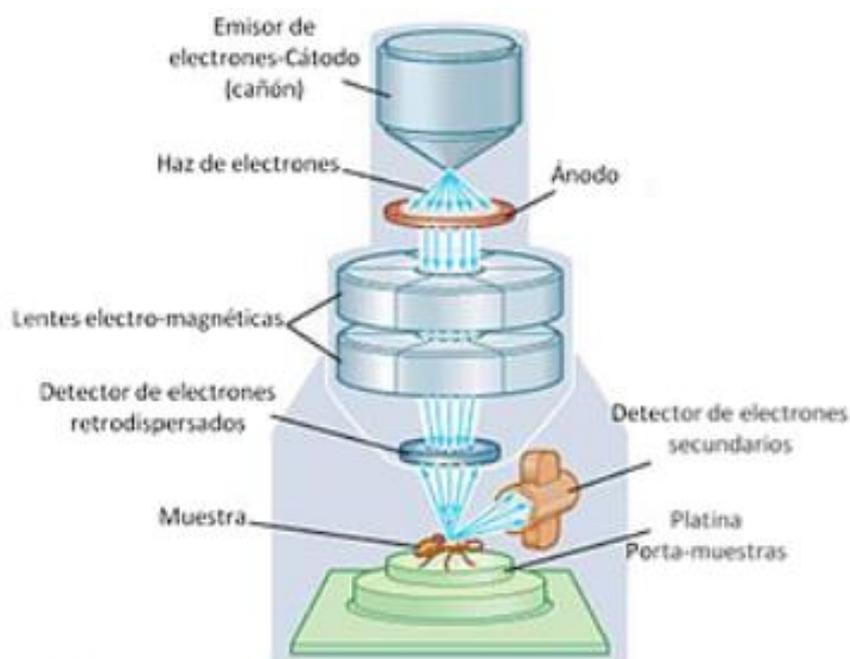


Figura 3-13 Ejemplo simplificado de un microscopio SEM [21]

Conforme al procedimiento experimental del análisis microscópico, una vez preparadas y seleccionadas las muestras tratadas químicamente, se colocan en los soportes individuales correspondientes.

Asimismo se tomaron con anterioridad los respectivos ángulos de contacto de dichas muestras, medidos después de la primera y la tercera aplicación, con la intención de relacionar los perfiles topográficos obtenidos con el comportamiento hidrofóbico de la gota sobre las superficies tratadas.

Situada la muestra en el soporte del equipo se ajusta de forma que la superficie de la misma se encuentre en el rango de cotas de trabajo del microscopio. Acto seguido se realiza el vacío en el interior de la cavidad donde se sitúan la muestra y los detectores, evitando la rotura del filamento generador de electrones por oxidación a alta temperatura.

Para cada una de las muestras seleccionadas se realizó el análisis de las mismas con los tres detectores ya comentados:

- **Electrones secundarios:** inicialmente se selecciona el tamaño del spot en el que se focaliza el haz incidente, enfocando la imagen con diferentes velocidades de barrido y ajustando el brillo y el contraste. Se realizan capturas instantáneas de las imágenes a varios niveles de aumentos con el fin de evaluar la microestructura generada.
- **Electrones retrodispersados:** se siguió un procedimiento similar al de los electrones secundarios.
- **Espectroscopía por dispersión de energía:** una vez seleccionada la zona para realizar el análisis se configura el tamaño deseado del spot. Tras ello se reinicia el registro tantas veces como sea necesario, hasta que el espectro obtenido sea suficientemente estable. Cada muestra se somete a un proceso de análisis por áreas específicas de su microestructura, permitiendo diferenciar zonas de diferente composición química dentro de una misma muestra o con respecto a otras muestras independientes. Para cada registro se almacena una imagen del espectro obtenido y una tabla con los valores de la composición.

Así pues, la mejora que se busca en esta etapa del análisis químico es obtener cierta información sobre la composición química de cada producto, así como ver el recubrimiento que se ha generado sobre la superficie de la tela y seleccionar aquel cuyo perfil muestre una capa hidrofóbica lo más homogénea y estable posible, ya que un perfil irregular o con múltiples imperfecciones, evidencia una polimerización

escasa del producto y por lo tanto una baja eficacia del recubrimiento, el cual puede dejar espacios libres sin cubrir expuestos a la penetración del agua y la humedad con el correspondiente mojado que ello conlleva.

Capacidad hidrófuga y penetrabilidad mediante ángulo de contacto

La capacidad hidrófuga que otorga cada tratamiento a la tela se analizará en detalle mediante la determinación del ángulo de contacto estático. Este parámetro ya se explicó en detalle en la sección de estado del arte. Se han obtenido los ángulos de contacto después de la primera y la tercera aplicación de los cuatro productos. Para su determinación, dentro del apartado de análisis de tratamientos químicos, se empleó el equipo que se recoge en la Figura 3-14.

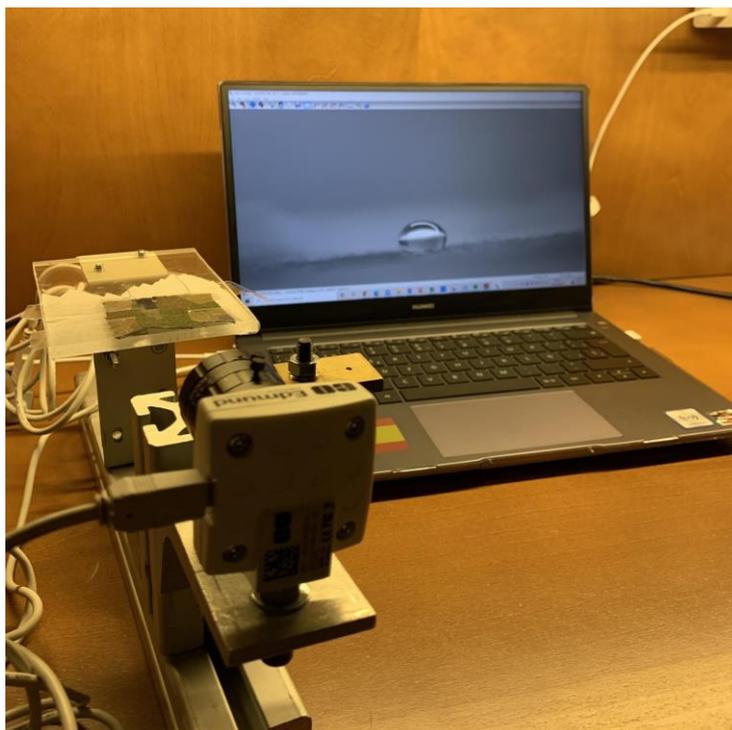


Figura 3-14 Sistema completo de medición de ángulos de contacto

Todo ello ha sido posible gracias al software de adquisición de imágenes para cámaras de uso industrial uEye Cockpit (Figura 3-15), que permite visualizar en pantalla la imagen en tiempo real de la cámara EO Edmund Optics (Figura 3-16) y que junto al programa informático de tratamiento digital de imágenes ImageJ han permitido la toma y procesamiento de las imágenes de las gotas sobre las superficies de las muestras para la medición del ángulo de contacto entre las interfaces de la fase sólida del tejido y la fase líquida de la gota.

El procedimiento seguido fue colocar y fijar cada una de las muestras sobre la plataforma de vidrio transparente del conjunto formado por la cámara y los elementos de soporte que se pueden apreciar en la Figura 3-14, depositando una gota de 10 ml de agua destilada con una micropipeta dosificada sobre la superficie de la muestra previamente estirada para facilitar la posterior lectura de los ángulos de contacto. Una vez preparado el montaje, se procede a la toma de la imagen instantánea de la gota que capta la cámara en el momento de la captura gracias al programa uEye Cockpit, para finalmente medir a través del programa ImageJ el ángulo de contacto mediante la herramienta “Angle” y exportar los resultados al fichero “Results” (Figura 3-17).

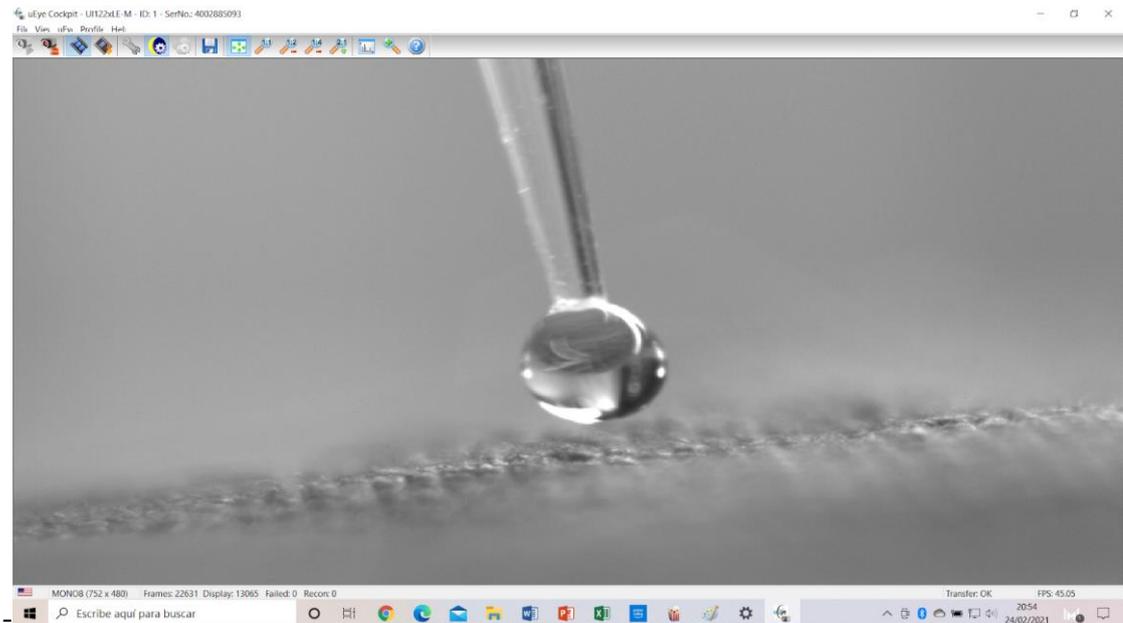


Figura 3-15 Software uEye Cockpit



Figura 3-16 Cámara EO Edmund Optics

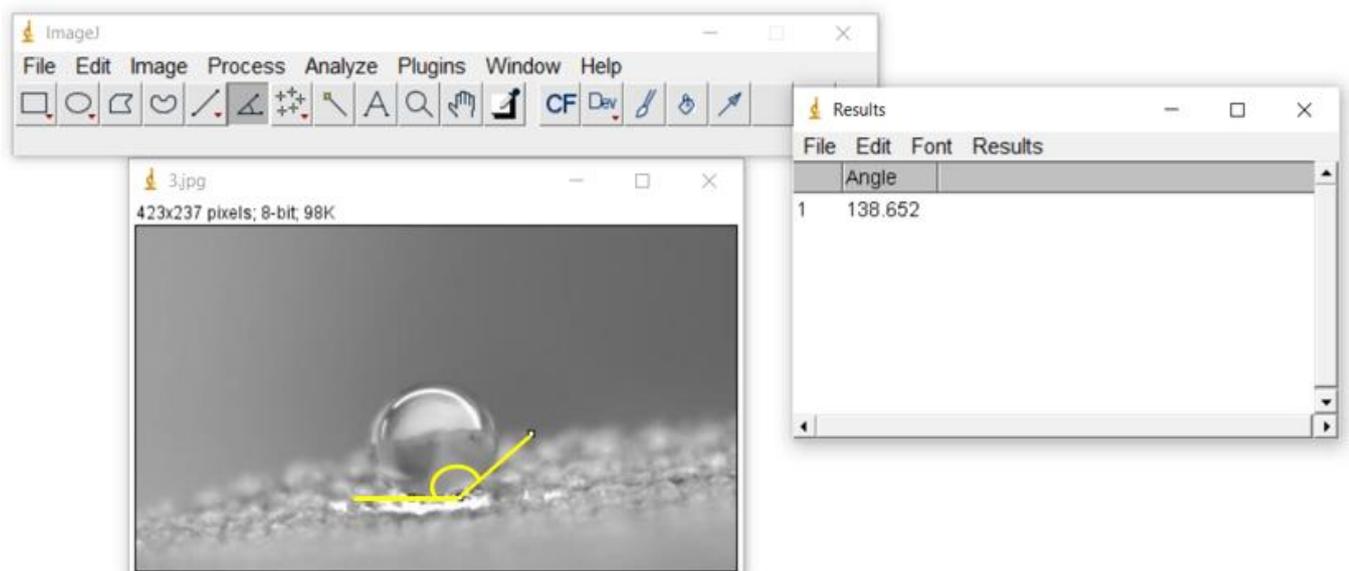


Figura 3-17 Programa ImageJ

La medición del ángulo de contacto será un proceso recurrente a lo largo de todo este proyecto para facilitar el análisis de la hidrofobicidad del tejido bajo diferentes estados y ensayos de la tela.

Una de las aplicaciones para la cual se emplea la medición de ángulos de contacto está destinada al estudio de la penetrabilidad del tratamiento químico aplicado, es decir, la diferencia entre el ángulo que se produce en la superficie exterior de la prenda (anverso), donde se ha aplicado directamente el producto hidrofugante y la cara interior (reverso) en la que teóricamente no incide el producto. Esto nos permite diferenciar cual de los productos penetra más en la tela, que es otra cualidad de interés que debe reunir el producto buscado para garantizar una correcta polimerización del mismo y durabilidad frente a condiciones de trabajo exigentes.

Este estudio se ha realizado después de llevar a cabo una serie de ciclos térmicos de enfriamiento y calentamiento para evaluar la hidrofobicidad del tejido en términos de penetrabilidad ante condiciones térmicas demandantes. La técnica de análisis empleada consiste en la medición de los ángulos de contacto de los anversos de las muestras una vez han sido ejecutados todos los ciclos térmicos previstos que a continuación se explicarán en profundidad, para compararlos con los ángulos ya tomados en el reverso de la tela. Si la diferencia entre ambos ángulos es muy elevada, significa que el producto no está haciendo suficiente efecto por la cara contraria a la que se aplicó, y por lo tanto este no ha penetrado en el tejido. Sin embargo aquellos ángulos cuya diferencia sea escasa, muestran una elevada capacidad de penetración por parte del producto aplicado.

En el caso concreto de este trabajo se escogió una muestra de cada producto, sometida previamente a tratamientos químicos y ensayos térmicos. La muestra seleccionada por producto fue, de cada ensayo realizado (sales y hielo-deshielo), aquella cuyo ángulo de contacto se aproxima en mayor medida al ángulo medio de todas las muestras tratadas con el mismo producto.

Se analizó la diferencia de ángulos obtenidos entre una cara y otra, a fin de encontrar el producto cuya diferencia fuera menor, para asegurar la elección de un producto hidrofóbico con una capacidad de penetración alta.

Ensayo de sales

Durante este ensayo se somete un conjunto de muestras tratadas químicamente a fases sucesivas de calentamiento y humectación en agua salada, para estudiar su comportamiento hidrófugo en condiciones de calor, así como la exposición de los nano recubrimientos a agentes tan alterantes como son las sales solubles del agua del mar.

Los choques térmicos continuados de secado en estufa y enfriamiento en agua salada provocan cambios en el estado de agregación del material polimerizado en la tela, que puede reducir la efectividad del tratamiento en cuanto a distribución y uniformidad de las nanopartículas, al mismo tiempo que es posible experimentar una pérdida de peso en la mayoría de las muestras debido a la evaporación de parte del nanomaterial consolidado al inicio de los ciclos, e incluso por la degradación de la fibra e hilos de la tela que durante la manipulación de las muestras pueden perder parte del tejido.

Se ha realizado un total de 10 ciclos térmicos a 16 de las muestras ya tratadas previamente con tres aplicaciones de recubrimiento químico, sometiendo dichos fragmentos a un proceso cíclico de inmersión en agua de mar durante 60 minutos de humectación, para posteriormente aplicar calor mediante secado en una estufa a 60 °C durante dos horas (Figura 3-18).

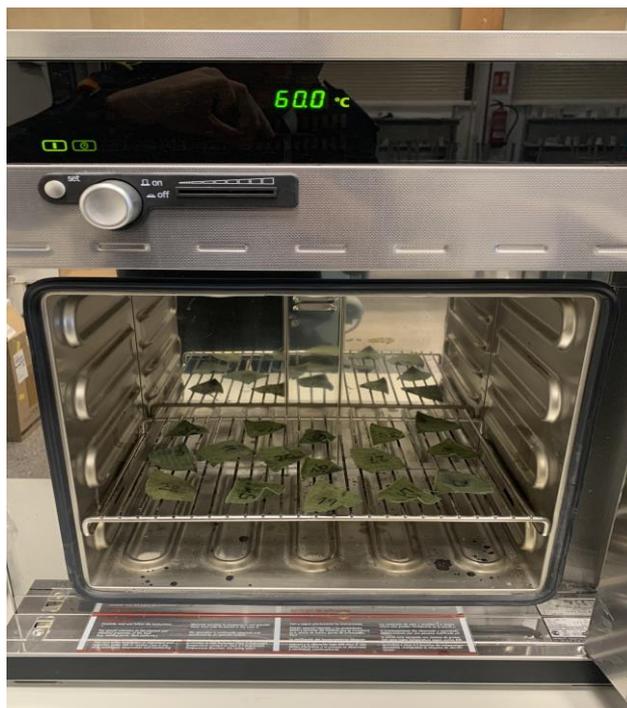


Figura 3-18 Estufa, proceso secado

La finalidad de este proceso es tomar los pesos de las muestras cada cinco ciclos de secado, para medir y analizar la pérdida de pesos producida por la evaporación o degradación de los nanopartículas de recubrimiento, despreciando la cantidad de fibra perdida y la rotura de la hilatura del tejido por la manipulación de las muestras. Gracias a ello es posible evaluar el comportamiento del tejido hidrofugado en condiciones de fatiga térmica inducidas por el calor de la estufa y la respuesta del mismo en contacto con las sales, que reproducen en cierta medida el medio más habitual al que se enfrentan los Infantes de Marina.

De manera simultánea al análisis de pesos, se ha llevado a cabo la medición de los ángulos de contacto mediante el sistema de análisis de imágenes ya comentado anteriormente, con la intención de analizar la variación de este parámetro fundamental en cualquier estudio hidrófugo, ante procesos de calentamiento y choque térmico reiterados. A partir de los ángulos adquiridos es posible seleccionar el producto más idóneo, buscando siempre aquel cuyo ángulo sea mayor, ya que supone un menor contacto entre la superficie de la tela y la gota.

Ensayo de hielo-deshielo

De manera muy similar al ensayo anterior, este proceso se basa en la sucesión de variaciones muy acusadas de temperatura, alternando entre ciclos de enfriamiento en congelador y choque térmico en agua dulce, a fin de alterar el estado de agregación de las partículas y analizar el comportamiento de los recubrimientos en situaciones de fatiga térmica, provocadas por el enfriamiento enfriamiento elevado del tejido.

Para ello se han intercalado periodos de congelación con períodos de humectación en agua dulce del grifo, procurando analizar los mismos parámetros anteriores de ángulo de contacto y respuesta hidrófuga del tejido, pero en esta ocasión en condiciones de frío a través de un congelador (hielo) y choque térmico mediante la humectación en agua (deshielo).

De forma análoga a los ciclos de secado se seleccionaron 16 muestras tratadas químicamente, para disminuir la temperatura del tejido hasta -30 °C durante un intervalo también de dos horas e inmediatamente después causar el choque térmico a través de la inmersión en agua dulce durante una hora completa, con el consecuente proceso de deshielo que da nombre al ensayo. Dicha metodología se repitió de forma cíclica, un total de 10 ciclos consecutivos, tomando medidas de pesos y ángulos de

contacto cada cinco ciclos realizados, con el objetivo de analizar los cambios que sufren ambos parámetros a lo largo de todo el proceso, y estudiar así la efectividad y duración de los diferentes nanorecubrientos en ambientes fríos con variaciones de temperaturas muy acusadas.



Figura 3-19 Frigorífico, proceso hielo-deshielo

Durabilidad

El análisis de la durabilidad de los tratamientos químicos aplicados, constituye una propiedad íntimamente relacionada con los ciclos térmicos, ya que evalúa la resistencia y permanencia del tratamiento en la tela ante solicitudes térmicas elevadas.

La forma de abordar el estudio de esta propiedad se realizará a través de la comparación entre la variación de los ángulos de contacto y la pérdida de pesos de la tela a lo largo de los 10 ciclos.

La selección del producto químico más óptimo en función del criterio de durabilidad, consistirá en elegir aquel cuyo ángulo de contacto manifieste una menor variación y a su vez presente una pérdida de peso reducida, ya que una disminución escasa del mismo manifiesta una pérdida mínima del tratamiento aplicado, pese a la exposición prolongada a ciclos térmicos de enfriamiento y calentamiento reiterados, lo cual permitirá caracterizar el producto cuyo revestimiento nanométrico sea el más resistente y duradero en el tiempo y este procedimiento de comparación de parámetros será llevado a cabo tanto en el ensayo de sales como de hielo-deshielo, con el objetivo de evaluar la duración de los nano recubrimientos a lo largo del tiempo en ambas condiciones de exigencia térmica.

Secado y desorción

Finalmente, como parte última del análisis químico se efectuará un proceso de secado para el estudio de la desorción de agua a lo largo del tiempo. El objetivo de este análisis no es más que calcular la pérdida de agua que experimenta el tejido en condiciones de secado natural a temperatura ambiente, para evaluar cuál de los productos hidrofugantes empleados permite un secado rápido y por el contrario cual de ellos lo retrasa, comparando el secado natural de los productos aplicados con el secado de otras muestras sin tratar utilizadas como referencias.

Es necesario destacar que antes de iniciar el ensayo de secado y el estudio de la desorción, se dejaron en inmersión durante 48 horas todas las muestras tratadas químicamente y sometidas a ensayo térmico, para que absorbieran el agua suficiente que posteriormente permitiera apreciar una curva de desorción clara para facilitar el análisis de la pérdida de agua o desorción en función del producto hidrorrepelente utilizado.

La capacidad de absorción, entendida como el contenido de agua que la tela es capaz de retener inicialmente, se relaciona con la capacidad hidrófuga del producto aplicado y con la penetrabilidad del mismo, de manera que un recubrimiento con una capacidad hidrófuga elevada y un alto grado de penetrabilidad en el tejido tratado, reducirá el contenido inicial de agua absorbido lo que favorecerá la desorción y el secado rápido de la tela.

Para la caracterización y estudio de este parámetro se ha elaborado un recuento de pesos en diferentes instantes de tiempo de todas las muestras sometidas anteriormente a ciclos térmicos, desde los primeros 5 minutos con la tela recién mojada hasta las 48 horas cuando esta se halla totalmente seca. La desorción de cada una de las muestras o la pérdida de agua por unidad de tiempo, nos da una idea de cual de los productos aplicados presenta un secado más rápido sobre el resto, analizando no solo la velocidad de secado sino también la estabilidad del mismo y el cálculo de este parámetro se realiza de manera similar a los consumos y materia seca, mediante la expresión:

$$\text{Desorción (g)} = \frac{M_h - M_o}{M_o}$$

Donde M_h es el peso registrado en cada uno de los tiempos y M_o los pesos iniciales de los fragmentos libres de tratamiento. Dicho parámetro indicará la cantidad de agua sobrante o líquido absorbido que retiene cada muestra por unidad de tiempo.

Una vez completado el recuento global de pesos y calculados sus correspondientes pesos de desorción, se elaboran las curvas de secado para poder comparar gráficamente la influencia de cada producto sobre la desorción de la tela conforme a la desorción natural de los fragmentos de referencia, prestando especial atención a aquellos que sequen más rápido, es decir, que alcancen una desorción nula lo antes posible lo que significa la eliminación total del agua absorbida al inicio del proceso.

3.4.2 Tratamiento físico

Se llevará a cabo la técnica de micro-texturizado láser por tratamiento superficial de los tejidos, en la cual se realizarán barridos paralelos longitudinales de la superficie textil a tratar, con un mallado previo de la misma. Para dicho mallado es necesario seleccionar varios parámetros de trabajo de la estación láser.

No obstante, antes de continuar con la metodología seguida durante el análisis físico del tejido, resulta conveniente hablar de los parámetros fundamentales de procesamiento que caracterizan el funcionamiento del láser y sus condiciones de ablación, destacando los siguientes [13]:

- Longitud de onda λ : La absorción de la radiación emitida para cualquier material que se irradie depende la longitud de onda del haz incidente.
- Ancho de pulso t_p : Mide el tiempo que el disparador mantiene abierta la salida del haz, es decir, el tiempo total que dura un pulso comprimido.
- Frecuencia de pulsado f_p : Cantidad de pulsos que se emiten por unidad de tiempo.
- Velocidad de barrido v : Velocidad a la que se desplaza el punto de focalización del haz láser con respecto a la superficie a tratar. Una velocidad baja de barrido conlleva un mayor tiempo de interacción láser-tejido.
- Potencia media P_m : Promedio de energía radiada por la fuente hacia el exterior por unidad de tiempo.
- Energía de pulso E_p : Cantidad de energía almacenada en cada pulso transmitido, que se puede expresar como el cociente entre la potencia media emitida y la frecuencia de pulsos ($E_p = P_m / f_p$).
- Irradiancia I : Cantidad media de energía que irradia la superficie procesada por unidad de tiempo.
- Solapamiento S : Porcentaje de área tratada respecto al tamaño de haz focalizado entre dos pulsos consecutivos. La variación del solapamiento entre cada barrido a lo largo de una

misma dirección de texturizado sobre el plano horizontal, modifica el perfil resultante consiguiendo lo que se conoce como superposición de barridos, capaz de generar perfiles micrométricos altamente repelentes, gracias a la concentración por unidad de área de crestas e irregularidades microestructurales.

Como se puede comprobar, son varios los parámetros del haz que pueden ser alterados (frecuencia, longitud de onda, velocidad de barrido, potencia radiada, anchura del área...), pero para el estudio que nos atañe únicamente serán modificados los siguientes:

- La potencia media del láser.
- La velocidad de barrido (velocidad de procesamiento o velocidad de los espejos).
- Superposición del patrón utilizado.
- Frecuencia del láser (sólo en los láseres pulsados).

Como muestra de ello en la Figura 3-20 se ilustra el software de procesamiento del láser de CO₂ en ejecución realizando el ajuste de parámetros deseado y en la Figura 3-21 se representa el software de las otras estaciones láser, que permite configurar todas las condiciones de trabajo.

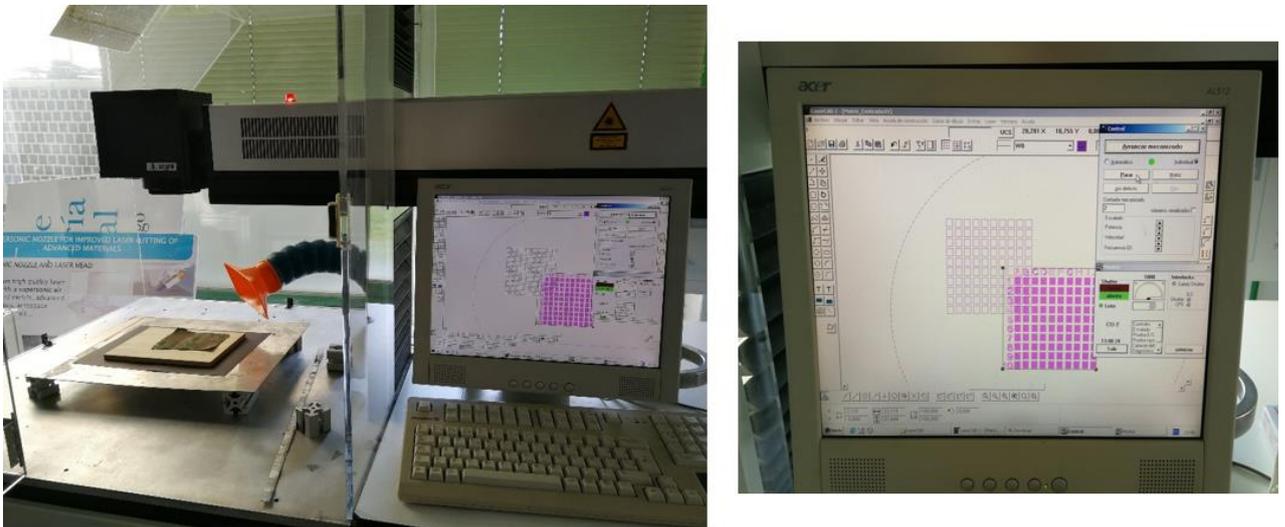


Figura 3-20 Estación de trabajo del láser de CO₂ y ajuste de parámetros del software de procesamiento

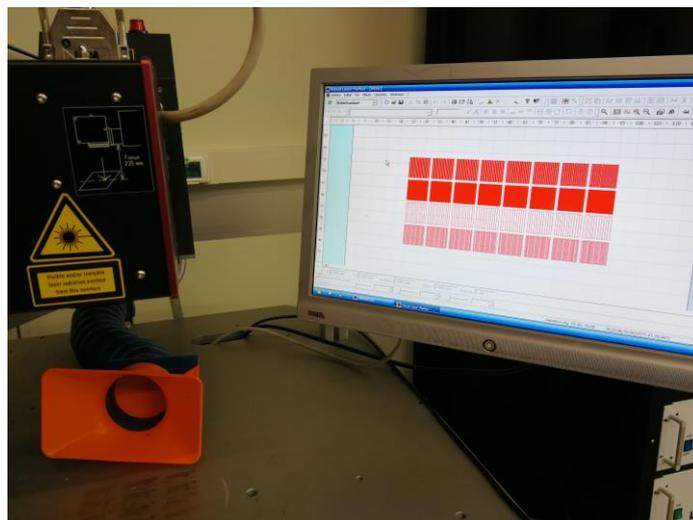


Figura 3-21 Software de procesamiento láser IR

Cada área de texturizado ocupa una superficie de 10x10 mm y en cada una de ellas se configuran diferentes parámetros de procesamiento: frecuencia, potencia, longitud de onda, velocidad de barrido, ancho de pulso, etc, de los cuales para el trabajo que nos ocupa, sólo serán modificadas la potencia media del láser, la velocidad de barrido, la frecuencia y el solapamiento, para proceder posteriormente a la toma de medidas en cuanto a micro-rugosidad y ángulos de contacto, además de realizar una caracterización detallada de aquellas muestras consideradas de interés desde el punto de vista hidrofóbico.

Una vez ajustados los parámetros de texturizado, se procede a la preparación del montaje para los ensayos. Mediante los controles de altura, se ajusta la distancia entre el cabezal y la superficie de la tela, lo que permite ubicar el foco del haz láser sobre la superficie de la muestra a procesar. Acto seguido se coloca sobre una posición fija la muestra de tela estirada y se ejecuta el programa, de manera que el haz láser comienza a incidir describiendo barridos cortos y muy concentrados alternando los patrones de ablación sobre el patrón de marcado introducido anteriormente en el software de procesado (ver Figura 3-22).

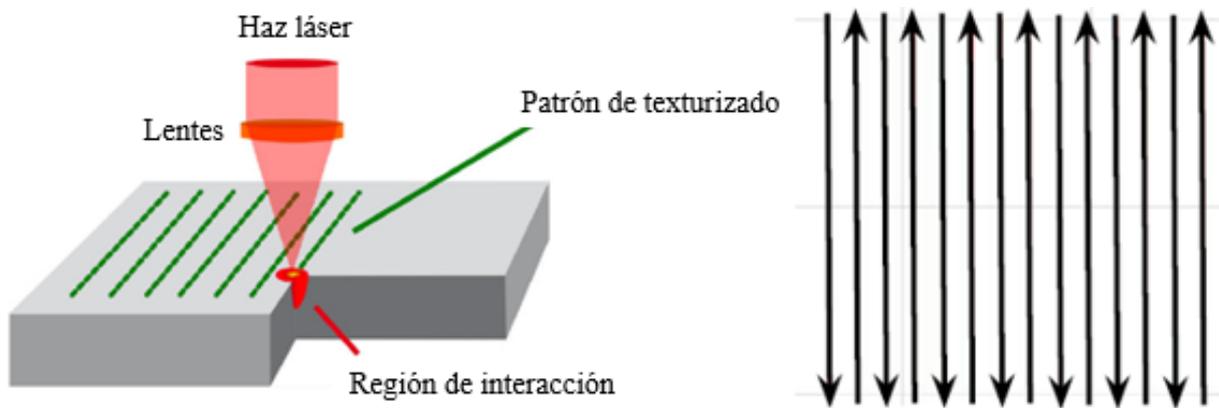


Figura 3-22 Esquema de barrido [14] [13]

En la Figura 3-23 se puede apreciar el láser de picosegundos en funcionamiento y el resultado de la superficie de la muestra texturizada.



Figura 3-23 Láser de picosegundos en funcionamiento y superficie texturizada

El objetivo de este método físico de mejora hidrofóbica por texturizado láser, es modificar la micro rugosidad del tejido mediante el diseño de un perfil óptimo con los parámetros de procesamiento adecuados que impidan el mojado de la superficie textil. Para ello se experimentará con distintos niveles

de potencia, velocidades de barrido, bandas de frecuencia y solape entre celdas de texturización, para analizar los cambios que se producen sobre la rugosidad y el ángulo de contacto, a fin de seleccionar los parámetros de procesamiento óptimos para lograr la máxima hidrofobicidad posible de la tela.

Para evaluar la generación de superficies hidrofóbicas sobre el material textil del uniforme de Infantería de Marina, objeto de este TFG, mediante la técnica de micro-texturizado láser se han llevado a cabo una serie de los ensayos experimentales, en los cuales se han variado diversos parámetros de procesamiento con el propósito de encontrar una zona de trabajo idónea y los parámetros clave del proceso.

En los ensayos se han usado las cuatro fuentes láser comentadas anteriormente:

- Láser CW de CO₂ ($\lambda = 10600 \text{ nm}$)
- Láser Q-switched de Nd:YVO₄ de nanosegundos (armónico fundamental, $\lambda = 1064 \text{ nm}$)
- Láser Q-switched de Nd:YVO₄ de nanosegundos (tercer armónico, $\lambda = 365 \text{ nm}$)
- Láser Q-switched Nd:YVO₄ de picosegundos (armónico fundamental, $\lambda = 1064 \text{ nm}$)

Es decir, se ha experimentado con tres longitudes de onda distintas: Ultravioleta (UVA), Infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo (IR) y con tres modos de pulso distinto: modo continuo (CW – láser de CO₂), láseres con ancho de pulso de nanosegundos (del orden de 20 *ns*) y láseres con ancho de pulso de picosegundos (800 *ps*). Esto ha permitido evaluar el compartimento del tejido ante distintas longitudes de onda y dentro de una misma longitud de onda, la influencia del ancho de pulso.

A lo largo del proceso de análisis físico, se detallarán los mallados de texturización realizados especificando los parámetros de procesamiento introducidos y los patrones que se han seguido con cada láser, para posteriormente estudiar los ángulos de contacto resultantes y la morfología superficial de los perfiles texturizados, mediante mediciones a escala nanométrica con los equipos adecuados, con el objetivo de confirmar la efectividad del método físico de texturización por ablación láser aplicado en superficies textiles, o por el contrario rechazar esta opción como técnica de mejora hidrofóbica de tejidos en caso de que los resultados obtenidos no sean suficientemente satisfactorios.

En cuanto a la herramienta empleada para la medición de ángulos de contacto durante los ensayos de texturizado, el instrumento que se utilizó para tal efecto fue el Goniómetro de Ángulo de Contacto Ossila, propiedad también de la Universidad de Vigo, que proporciona un método confiable y sencillo para medir el ángulo de contacto de la gota yacente, así como su tensión superficial.

El sistema cuenta con un software para ordenador que aporta una interfaz simple e intuitiva para llevar a cabo las medidas del ángulo de contacto, tal y como se puede apreciar en la Figura 3-24.



Figura 3-24 Medición de ángulos con el Goniómetro Ossila

Para abordar el estudio de las propiedades hidrófugas del uniforme en presencia de láser y técnicas de micro-texturizado, la forma de estructurar el bloque de análisis físico se realizará de la siguiente manera:

- 1) Diseño de patrones de texturización utilizados y modificación de parámetros.
- 2) Evaluación y análisis de resultados:
 - Ángulos de contacto.
 - Perfil nanométrico.

3.4.3 Tratamiento conjunto

Como técnica final, que concluye el estudio hidrofóbico de los métodos físicos y químicos de mejora hidrófuga del uniforme de Infantería de Marina, se estudiará en este último apartado la combinación de todas las mejoras implementadas con los métodos anteriores previamente analizados.

La intención de este tratamiento es evaluar el comportamiento hidrofóbico del tejido sometido tanto a texturización láser como nano recubrimiento, sometiendo al ensayo de la gota yacente varias áreas texturizadas de una muestra tratada químicamente con el producto más óptimo seleccionado en base a los criterios de análisis químico establecidos.

Una vez conocido el producto que mejores resultados ofrece, se procede a la aplicación de los mismos parámetros de texturización considerados como más adecuados a través del análisis físico realizado con anterioridad, para detener el avance de la gota y repeler el agua del tejido.

Finalmente, como es habitual, se efectúa la medición de los nuevos ángulos de contacto que se generan gracias al tratamiento combinado, para así compararlos con los ángulos obtenidos mediante el tratamiento químico y físico por separado, a fin de detectar posibles mejoras en las propiedades hidrófugas del tejido o bien confirmar su descarte en caso de que dichas mejoras sean escasas o inexistentes.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis químico

4.1.1 Consumo

El presente apartado muestra los resultados de las cantidades de producto consumido en cada aplicación, haciendo uso de las tablas de resultados de los puntos 6.1, 6.2, 6.3 del Anexo II: Tablas y resultados de las mediciones, en el que se presenta el estado inicial de las mediciones añadiendo el recuento de los pesos de las muestras sin tratar junto con los pesos obtenidos en cada una de las tres aplicaciones con los cuatro productos hidrofóbicos seleccionados.

Resulta importante destacar que la unidad de medida del S.I que se ha tomado como referencia desde el inicio hasta el final del Proyecto, ha sido el gramo (g) para la medición de pesos en todos los procesos de análisis contemplados.

A continuación se presenta el análisis de consumos de la primera aplicación, la tercera (aplicación global) y el incremento que experimentan con cada aplicación.

A través de la Tabla 4-1, se presenta de manera resumida los consumos medios, máximos y mínimos de los diferentes productos durante la primera aplicación para facilitar su comparación:

| Producto | Consumo máximo | Consumo mínimo | Consumo medio | Desviación típica |
|----------|----------------|----------------|---------------|-------------------|
| Tecnadis | 9,80 % | 6,40 % | 7,79 % | ± 1,11 |
| Nasiol | 6,21 % | 3,95 % | 4,64 % | ± 0,77 |
| Hendlex | 7,90 % | 4,64 % | 6,32 % | ± 1,06 |
| Nikwax | 6,56 % | 4,28 % | 5,46 % | ± 0,77 |

Tabla 4-1 Consumos 1ª aplicación

A la vista de los resultados obtenidos, el producto que mejores prestaciones en cuanto a consumo es Tecnadis con un consumo del 7,79 %, que supera claramente al resto de productos empleados, aunque su desviación típica también resulta ser la más elevada ($\pm 1,11$), por lo tanto la variación o dispersión de los datos es mayor que en el resto de productos.

A través del análisis de todos los datos obtenidos, graficados en la Figura 4-1 para cada uno de los productos evaluados, con sus correspondientes intervalos de confianza, se puede apreciar que el consumo medio del Tecnadis con una única aplicación se halla claramente por encima de los demás consumos.

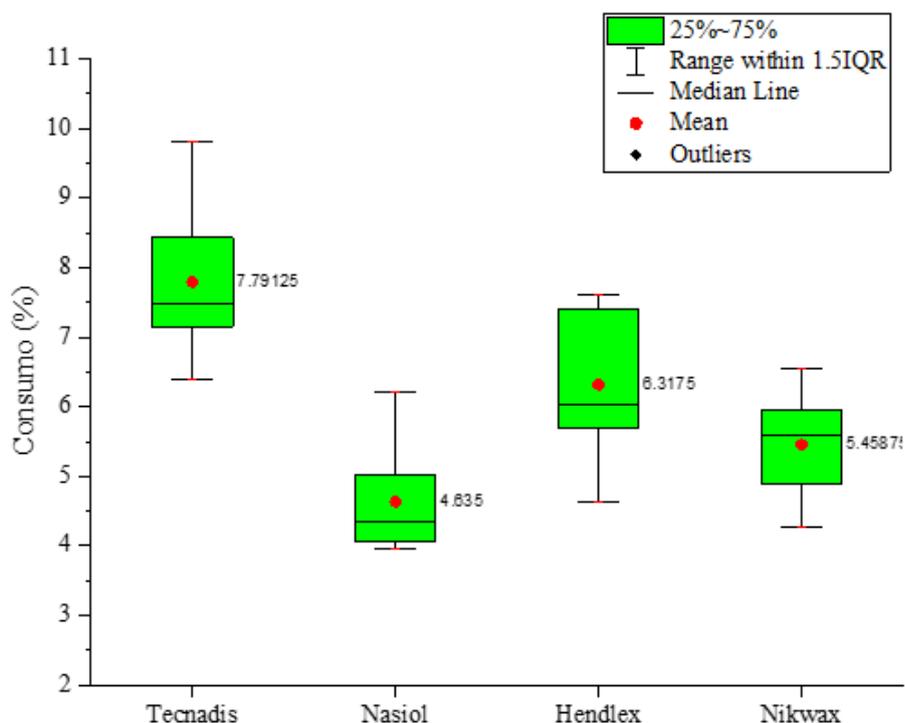


Figura 4-1 Gráfica de consumos 1ª aplicación

En la Tabla 4-2, al igual que en el análisis de resultados anterior, se expone de manera resumida los consumos de cada producto después de cada una de las tres aplicaciones realizadas, así como el consumo global considerando las tres conjuntamente. Además, se muestra el incremento, en términos de consumo, que experimenta este parámetro en realizar una única aplicación (tal y como indica el fabricante) o llevar a cabo una sobreaplicación del producto mediante el tratamiento de tres aplicaciones consecutivas.

| Producto | Consumo 1ª aplicación | Consumo 2ª aplicación | Consumo 3ª aplicación | Consumo global |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| Tecnadis | 7,79 % | 6,72 % | 3,97 % | 18,52 % |
| Nasiol | 4,64 % | 4,65 % | 3,45 % | 12,78 % |
| Hendlex | 6,32 % | 5,36 % | 5,13 % | 16,84 % |
| Nikwax | 5,46 % | 4,75 % | 3,95 % | 14,19 % |

Tabla 4-2 Consumos obtenidos de cada una de las tres aplicaciones realizadas. Además, se muestra el consumo global obtenido después de las tres aplicaciones realizadas y el incremento experimentado entre realizar una única aplicación a realizar tres aplicaciones

Atendiendo a los resultados obtenidos, el Tecandis sigue siendo el producto que mayor consumo medio global presenta (18,52 %), entendiendo el consumo global como la cantidad de producto que ha absorbido la tela a lo largo de las tres aplicaciones. A este producto le sigue el Hendlex con un consumo global del 16,84 %.

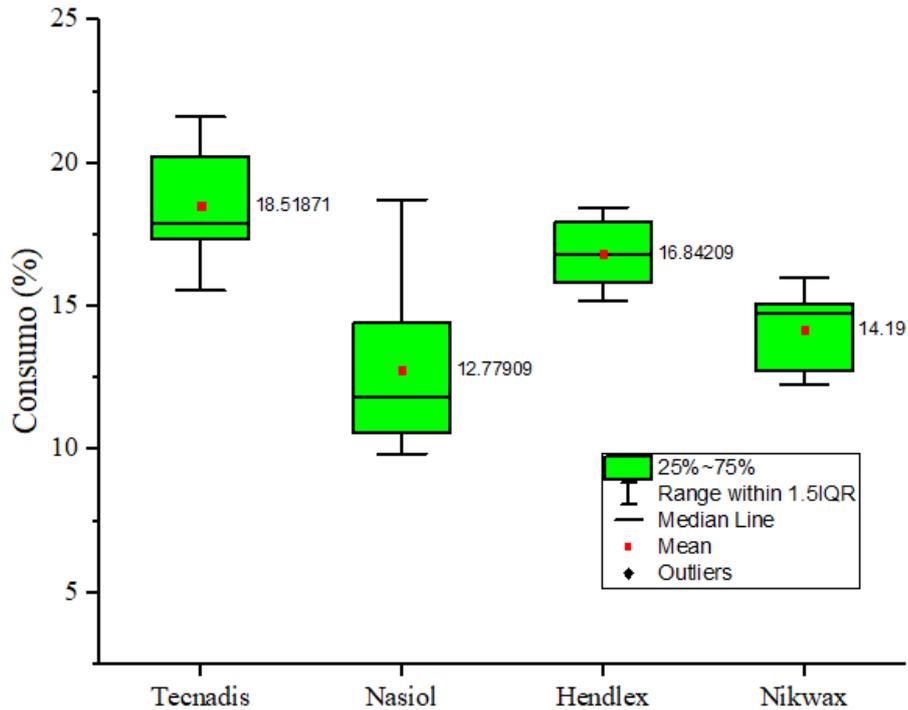


Figura 4-2 Gráfica de consumos 3ª aplicación global

Graficando todos los datos de las diferentes telas tratadas, en cuanto a consumo global (Figura 4-2), se confirma nuevamente que el producto que consigue un mayor consumo sobre la tela es el Tecnadis. Además, se aprecia que la distribución de consumos entre los cuatro productos estudiados mantiene una relación prácticamente idéntica a la de los consumos experimentados en la primera aplicación, siguiendo al Tecnadis, el Hendlex y el Nikwax.

Analizando la evolución entre consumos alcanzados en las diferentes aplicaciones (Figura 4-3), es posible observar como todos los productos disminuyen su consumo en la tela tratada a medida que se aumentan las aplicaciones efectuadas. Este resultado parece lógico si consideramos que tras cada una de las aplicaciones realizadas, y después de la polimerización del producto, quedarán menos espacios entre fibras que permitan una buena absorción.

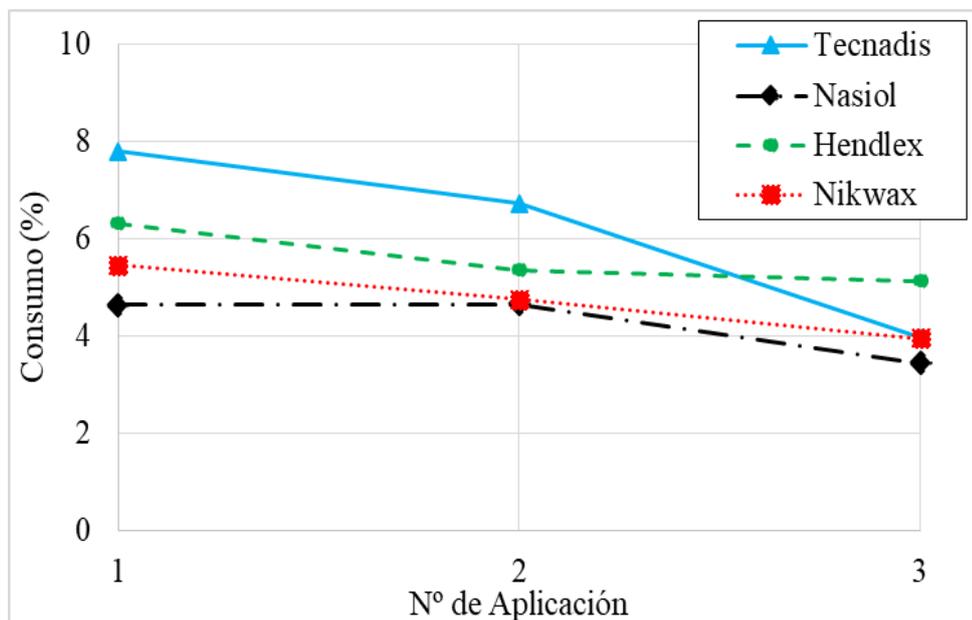


Figura 4-3 Evolución de consumos entre aplicaciones

De manera comparativa entre productos, el producto Hendlex es el que menos decremento de consumo manifiesta, como bien se destaca en la figura anterior, por lo que se podría pensar que un mayor número de aplicaciones en este producto favorecerá la capacidad hidrófuga que deja en la tela. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurrió en el resto de tratamientos, durante las 2 últimas aplicaciones de este producto se apreció que la gran parte del producto se quedaba en la superficie de la tela sin ser absorbida por esta, por lo que la tendencia recogida en la anterior figura en lo que respecta a este producto no se puede tener en consideración.

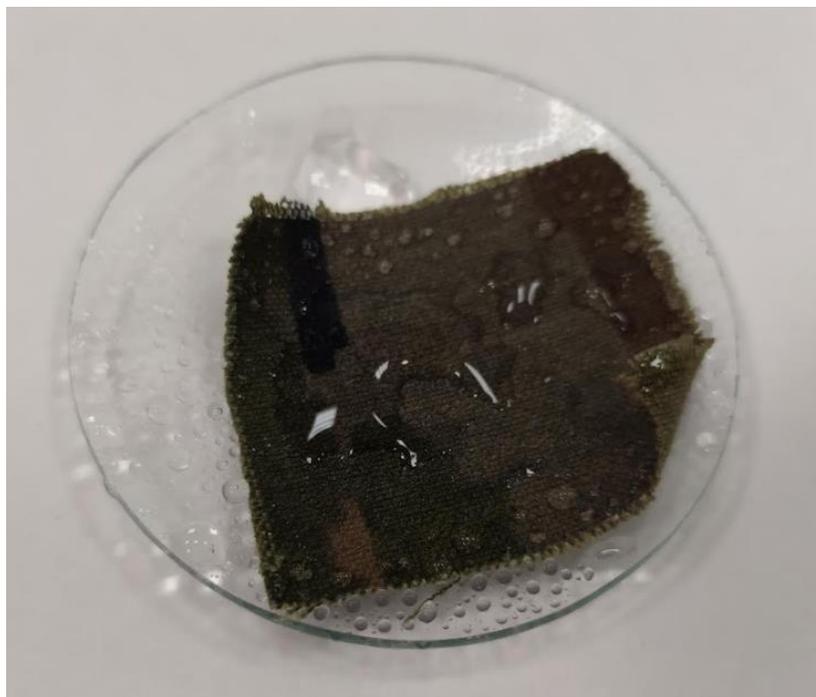


Figura 4-4 Segunda aplicación del Hendlex en las telas

4.1.2 Materia seca

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos a partir de los pesos finales de las muestras, previamente secadas a temperatura ambiente tras cada aplicación anterior, que junto con los pesos iniciales de las muestras tomadas antes de ser sometidas a tratamiento, permite obtener la materia seca absorbida por el tejido en cada aplicación.

Al igual que en el análisis del consumo, se presentarán los resultados de materia seca por producto y aplicación realizada comentando las variaciones o comportamientos de interés que se detecten, y se compararán finalmente las materias secas globales obtenidas, para escoger el producto que más cantidad de tratamiento adhiere al tejido.

Los resultados de la materia seca adherida en la primera aplicación son los que se muestran a continuación en la Tabla 4-3. En este caso, la diferencia entre productos ya no es tan acusada y conforme al análisis de la materia que polimeriza tras la primera aplicación, el Nikwax supera al resto de productos con una materia seca acumulada del 0,38 %, todo ello a pesar de que era uno de los compuestos que menos consumo mostraba.

| Producto | M. Seca máxima | M. Seca mínima | M. Seca media | Desviación típica |
|----------|----------------|----------------|---------------|-------------------|
| Tecnadis | 0,46 % | 0,21 % | 0,33 % | ± 0,10 |
| Nasiol | 0,44 % | 0,07 % | 0,29 % | ± 0,14 |
| Hendlex | 0,28 % | 0,14 % | 0,22 % | ± 0,29 |
| Nikwax | 0,43 % | 0,36 % | 0,38 % | ± 0,04 |

Tabla 4-3 Materia seca 1ª aplicación

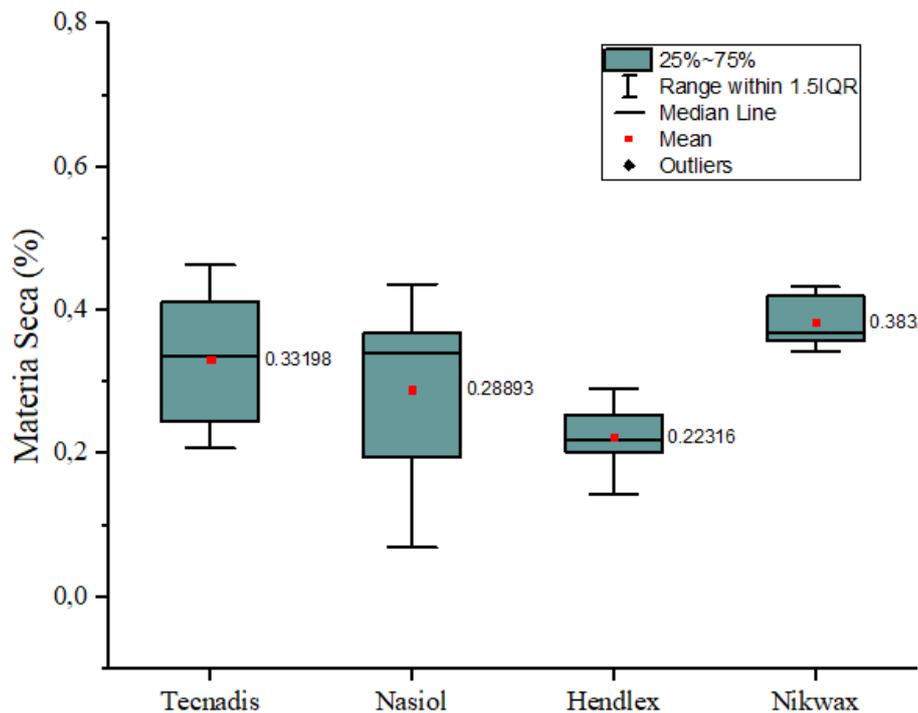


Figura 4-5 Gráfica de la materia seca 1ª aplicación

A la vista de la gráfica representada en la Figura 4-5, donde se hace un análisis conjunto de todos los datos obtenidos, es fácilmente reconocible la escasa dispersión de la proporción de materia seca que producen los cuatro productos, especialmente en el caso del Nikwax, sobre todo si se comparan estos resultados con los resultados adquiridos en el estudio anterior de los consumos.

Analizando los datos relativos al sobretratamiento, es decir tras las tres aplicaciones, se puede comprobar en la Tabla 4-4 que el Nikwax es el que mayor proporción de materia seca deje en el tejido (0,77%), mientras que el resto de productos están por debajo de 0,60%. Analizando el incremento experimentado por cada producto, cuando se lleva a cabo una sola aplicación en comparación con tres aplicaciones consecutivas, se aprecia que el incremento en el número de aplicaciones permite incrementar en casi todos los casos, a excepción del Nasiol, la cantidad de materia seca que queda polimerizada en la tela por encima del 50%, llegando incluso en el caso del Hendlex a porcentajes próximos al 90% y en el del Nikwax al 100%. Este resultado parece indicar que a un mayor número de aplicaciones mayor será la protección que permanezca en la tela.

Por tanto y a pesar de lo que se podría pensar al observar las telas de Hendlex durante el tratamiento de la segunda y tercera aplicación, donde no se observaba una clara absorción del producto después de la aplicación, los resultados de materia seca demuestran que se ha incrementado la cantidad de materia polimerizada en las muestras.

| Producto | M. Seca 1ª aplicación | M. Seca 2ª aplicación | M. Seca 3ª aplicación | M. Seca global | Incremento M. Seca |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|--------------------|
| Tecnadis | 0,33 % | 0,11 % | 0,11 % | 0,55 % | -66,66 % |
| Nasiol | 0,29 % | 0,07 % | 0,05 % | 0,41 % | -82,75 % |
| Hendlex | 0,31 % | 0,15 % | 0,13 % | 0,59 % | -58,06 % |
| Nikwax | 0,38 % | 0,20 % | 0,19 % | 0,77 % | -50 % |

Tabla 4-4 Materia seca polimerizada tras cada una de las tres aplicaciones realizadas. Además, se muestra la materia seca global que queda en el tejido tras las tres aplicaciones y el incremento experimentado al comparar una aplicación con la realización de tres

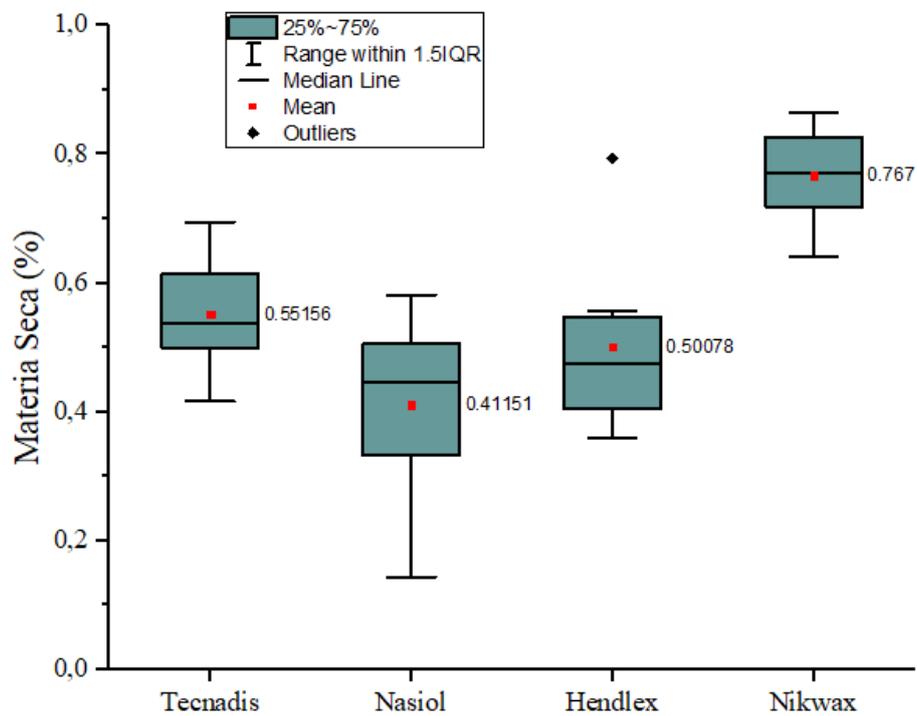


Figura 4-6 Gráfica de la materia seca 3ª aplicación global

Esto mismo se aprecia al realizar un análisis de los todos los datos obtenidos (Figura 4-6) y compararlos con los que se habían obtenido tras una única aplicación (Figura 4-5).

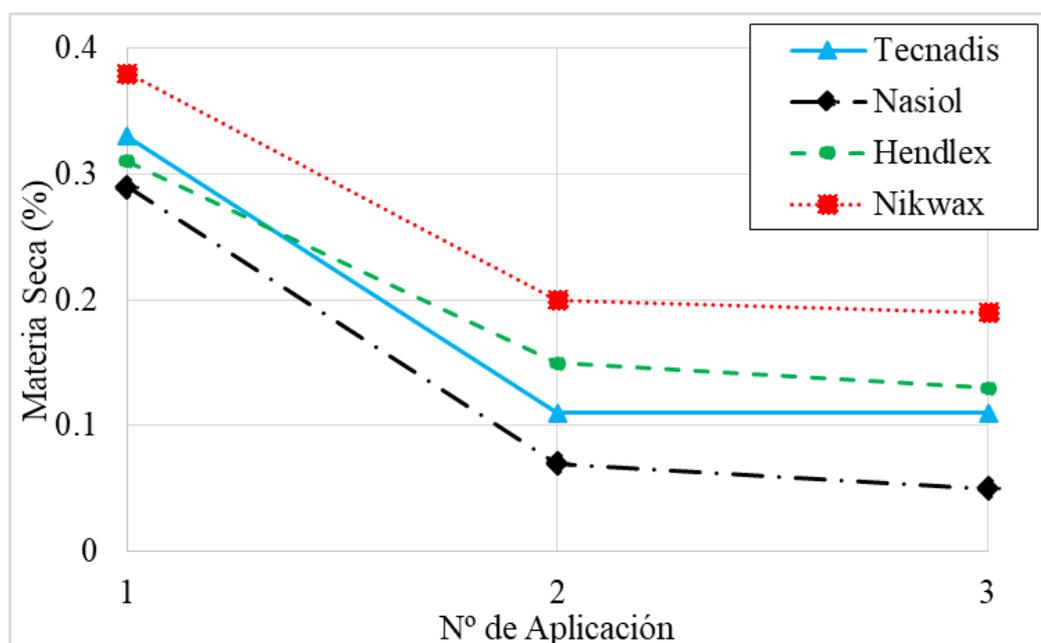


Figura 4-7 Evolución de la materia seca durante las tres aplicaciones

Analizando detenidamente cada una de las aplicaciones realizadas, la materia seca media que genera el Nikwax se mantiene siempre por encima del resto de productos. La razón de este resultado y su marcada diferencia respecto al resto de productos, puede deberse a que la forma de aplicación del Nikwax se lleva a cabo mediante una disolución acuosa del producto diluido, de manera que la tela se impregna en todo su volumen y el tratamiento protector penetra con mayor facilidad en la fibra tratada. El resto de productos en cambio se aplican por pulverización depositando las nanopartículas a lo largo de la superficie externa de la tela, lo cual puede influir en la penetrabilidad del tratamiento.

En términos generales, e independientemente del producto, todas las materias secas calculadas muestran una tendencia decreciente a lo largo de las aplicaciones. Al igual que los consumos, esta tendencia es debida a que a medida que se suceden varias aplicaciones consecutivas, la cantidad de producto que se va acumulando en la tela es menor que la aplicación anterior porque ya cuenta con cierta cantidad de material hidrofóbico seco que disminuye la proporción de materia seca de la siguiente aplicación. Esto estaría indicando que el número de aplicaciones efectivas que se pueden realizar sobre un tejido es limitado.

En resumen, estos resultados parecen indicar el Nikwax es el producto más adecuado para hidrofugar el tejido del uniforme, dado que es el que mayor cantidad de producto deja en el tejido.

4.1.3 Grados de polimerización

El objetivo fundamental que persigue este apartado es determinar la proporción de recubrimiento que ha polimerizando en el tejido con respecto a la cantidad total de producto aplicado, lo cual supone un aspecto económico a considerar en la selección de un producto.

Conociendo el grado de polimerización medio de cada producto y su evolución a lo largo de las aplicaciones, podemos averiguar cual de ellos se adhiere y polimeriza mejor con la fibra del tejido concreto que conforma el uniforme de Infantería de Marina, por lo que esta variable constituye un indicador sumamente importante, que puede contribuir a escoger de manera acertada y casi definitiva el producto final que mejor se adapte al uniforme.

Para comparar la polimerización de cada producto, la estructura de este apartado será la misma que la seguida en el análisis de los dos anteriores.

La Tabla 4-5, muestra los resultados del grado de polimerización obtenido en la primera aplicación. En este caso, se aprecia una gran diferencia entre el Nikwax y el Nasiol con el resto de productos.

| Producto | Grado máximo de polimerización | Grado mínimo de polimerización | Grado de polimerización medio | Desviación típica |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Tecnadis | 4,69 % | 2,70 % | 4,21 % | ± 0,97 |
| Nasiol | 8,91 % | 1,65 % | 6,18 % | ± 2,93 |
| Hendlex | 13,77 % | 2,41 % | 4,80 % | ± 3,71 |
| Nikwax | 9,56 % | 5,93 % | 7,15 % | ± 1,21 |

Tabla 4-5 Grados de polimerización 1ª aplicación

El Nikwax se impone desde el principio como producto dominante en el proceso polimerización de los productos hidrofugantes utilizados, con un porcentaje medio del 7,15%. Los resultados obtenidos del Nikwax muestran una escasa dispersión de los mismos (Figura 4-8), a diferencia del Nasiol que a pesar de ser el siguiente producto que según los datos extraídos de la gráfica presenta una mejor polimerización, muestra una dispersión demasiado acusada, lo cual lo hace poco fiable y posiblemente inestable en su proceso de polimerización nanométrica con el tejido.

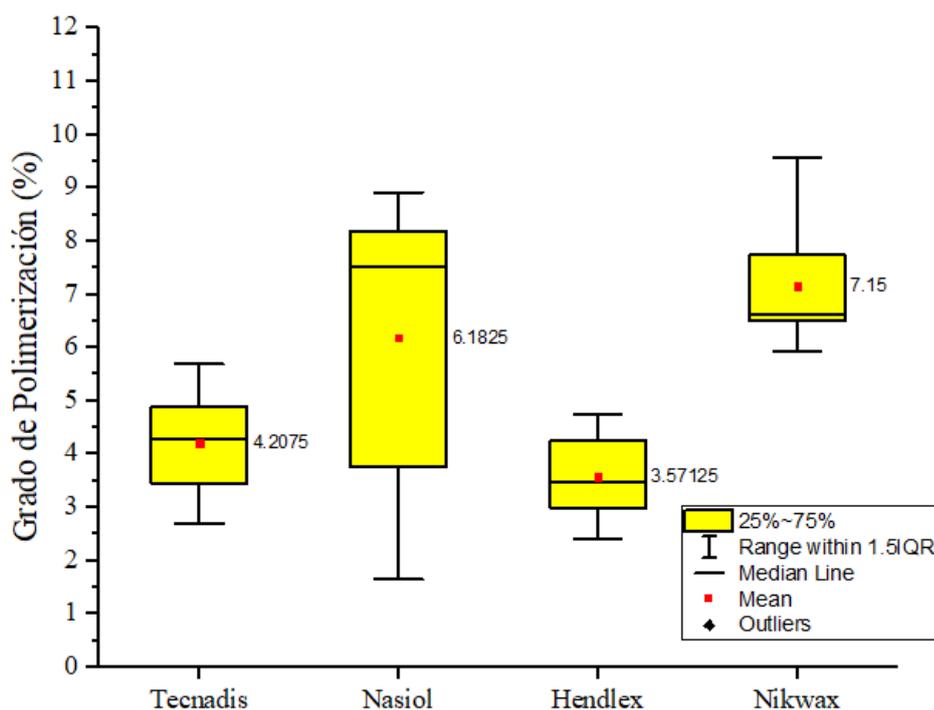


Figura 4-8 Gráfica de los grados de polimerización 1ª aplicación

Como cabría esperar, después de las tres aplicaciones sucesivas, el Nikwax es el producto que más polimeriza de todos, con un grado de polimerización medio del 5,41 %, superando con creces al resto de porcentajes de polimerización alcanzados por los demás productos, cuyos resultados se reflejan en la Figura 4-8 y en la Figura 4-9.

| Producto | Grado de Polimerización 1ª aplicación | Grado de polimerización 2ª aplicación | Grado de polimerización 3ª aplicación | Grado de polimerización global | Incremento grado de polimerización |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Tecnadis | 4,21 % | 1,63 % | 2,70 % | 0,55 % | -35,86 % |
| Nasiol | 6,18 % | 1,29 % | 2,17 % | 0,41 % | -64,88 % |
| Hendlex | 4,80 % | 2,98 % | 2,41 % | 0,59 % | -49,8 % |
| Nikwax | 7,15 % | 4,04 % | 4,59 % | 0,77 % | -35,8 % |

Tabla 4-6 Grados de polimerización alcanzado en cada una de las aplicaciones realizadas. Además, se muestran el grado de polimerización alcanzado tras las tres aplicaciones, así como el incremento experimentado al comparar una única aplicación con tres consecutivas

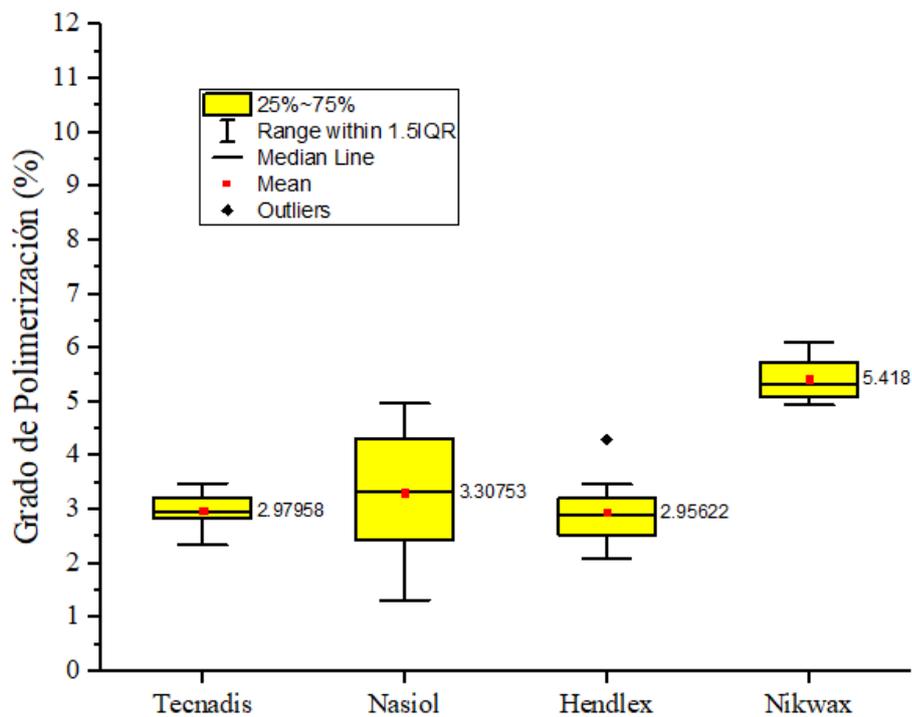


Figura 4-9 Gráfica de los grados de polimerización 3ª aplicación global

Con respecto a la evolución de este parámetro con el número de aplicaciones realizadas (Figura 4-10), se aprecia una tendencia similar, a excepción del Hendlex, produciéndose una disminución en el grado de polimerización en la segunda aplicación y un aumento en la tercera. Comparativamente entre productos, el que presenta una mejor relación de polimerización y por tanto puede llegar a resultar en un tratamiento más efectivo ya que no requiere que se aplique una gran cantidad de producto para obtener un buen contenido de materia seca dentro del tejido es el Nikwax.

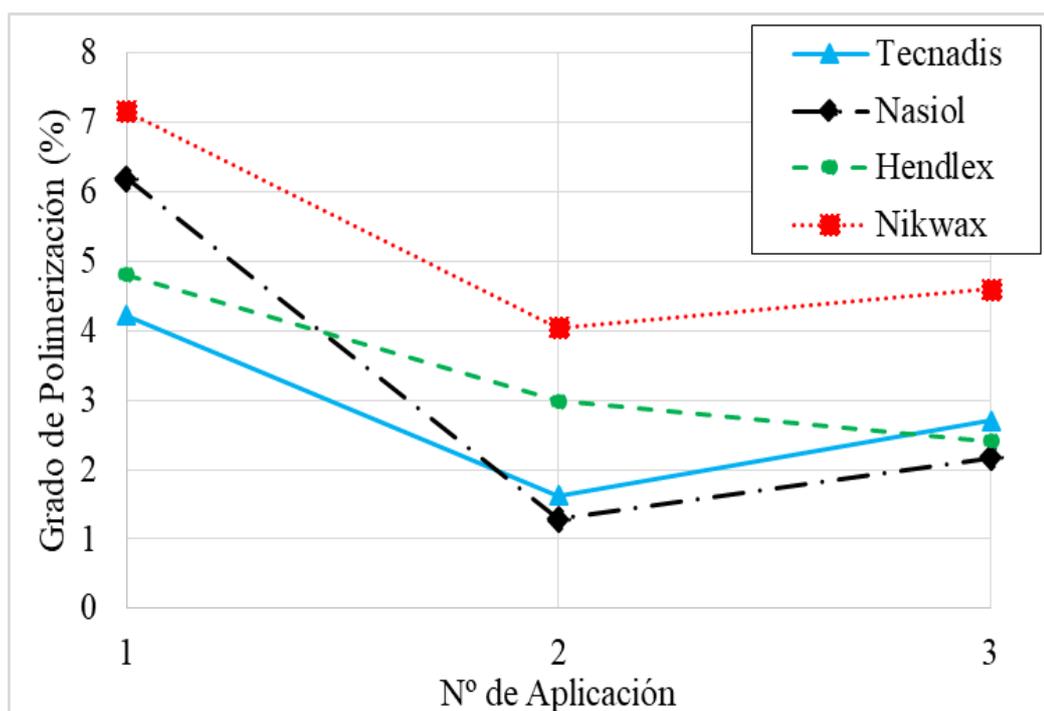


Figura 4-10 Evolución global de los grados de polimerización durante las tres aplicaciones

A continuación se presenta en la Tabla 4-7 una última comparación de todos los parámetros medidos y analizados a lo largo de los apartados 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3, para comparar la tendencia seguida en cada uno de ellos y confirmar la idoneidad del Nikwax como producto más óptimo, conforme a los criterios de consumo, materia seca y grado de polimerización.

| Producto | Nº Aplicaciones | Consumo (%) | Incremento (%) | M. Seca (%) | Incremento (%) | G.Polimerización (%) | Incremento (%) |
|----------|-----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|----------------------|----------------|
| Tecnadis | 1 | 7,79 | - | 0,33 | - | 4,21 | - |
| | 3 | 18,52 | 137,74 | 0,55 | 66,66 | 2,98 | -29,21 |
| Nasiol | 1 | 4,64 | - | 0,29 | - | 6,18 | - |
| | 3 | 12,78 | 175,43 | 0,41 | 41,37 | 3,31 | -46,44 |
| Hendlex | 1 | 6,32 | - | 0,31 | - | 4,8 | - |
| | 3 | 16,84 | 166,46 | 0,59 | 90,32 | 2,96 | -38,33 |
| Nikwax | 1 | 5,46 | - | 0,38 | - | 7,15 | - |
| | 3 | 14,19 | 159,90 | 0,77 | 102,6 | 5,42 | -24,20 |

Tabla 4-7 Comparación final de parámetros tras 1 aplicación y tras tres aplicaciones (global)

4.1.4 Ángulos de contacto

Durante el presente apartado se llevará a cabo el recuento de ángulos de contacto, tal y como se indica en la Tabla A2-0-41 y la Tabla A2-0-42 del Anexo II, en la que figuran los ángulos obtenidos por cada producto tras la primera y última aplicación, junto con sus correspondientes ángulos de contacto medio y desviaciones típicas calculadas, además de las imágenes tomadas para cada producto.

De nuevo se vuelven a condensar dichos resultados en una nueva tabla resumen (Tabla 4-8) para comparar los diferentes ángulos conseguidos con cada producto, y facilitar así el análisis de la evolución que han experimentado a lo largo de las tres aplicaciones.

| | 1 ^a APLICACIÓN | 3 ^a APLICACIÓN | VARIACIÓN EXPERIMENTADA |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | ÁNGULO MEDIO | ÁNGULO MEDIO | |
| Tecnadis | 133,44° ± 5,89 | 146,01° ± 2,98 | 9,42 % |
| Nasiol | 142,43° ± 2,66 | 136,53° ± 1,24 | - 4,14 % |
| Hendlex | 139,17° ± 3,35 | 139,25° ± 0,48 | 0,05 % |
| Nikwax | 145,34° ± 0,52 | 135,51° ± 0,17 | - 6,76 % |

Tabla 4-8 Resumen de resultados de las tres aplicaciones

En la Figura 4-11 se ilustra a modo de ejemplo una imagen de la evolución del Tecnadis, comparando el ángulo de contacto de la última aplicación con respecto a la primera, donde se aprecia el incremento experimentado por éste después de las tres aplicaciones realizadas.

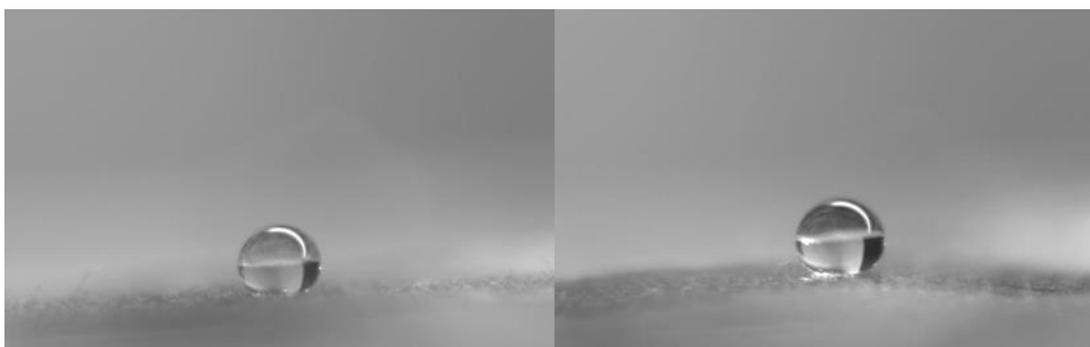


Figura 4-11 Ángulo de contacto del Tecnadis en la 1^a aplicación (izquierda) y en la última (derecha)

En general se aprecia que todos los productos aplicados confieren propiedades hidrófobas al tejido de infantería de marina, al conseguir que el ángulo de contacto se sitúe en el rango comprendido entre 90 y 150 (rango que caracteriza a las superficies hidrofóbicas, tal y como se indicó en la Tabla 2-1). Comparativamente entre productos y aplicaciones, se aprecia que con una sola aplicación los productos que confieren una mayor protección son Nikwax, que consigue el mayor ángulo de contacto (145,34°) y Nasiol, mientras que el producto que confiere una menor protección inicial es el Tecnadis. Sin embargo, después de llevar a cabo tres aplicaciones consecutivas, a diferencia de lo que cabría esperar, el ángulo de contacto disminuye en casi todos los productos excepto con Tecnadis, cuya efectividad se puede comprobar que tiene una tendencia positiva. Mientras que los demás productos disminuyen el ángulo que provocan sobre la superficie que impregnan con una tendencia claramente negativa, el Tecnadis mejora sus resultados progresivamente a medida que aumentan las aplicaciones realizadas, hasta alcanza un valor de 146,01° en la tercera aplicación como máximo ángulo de contacto registrado.

Nos encontramos, por tanto, ante un nuevo producto aparentemente óptimo para conseguir la mejora hidrofóbica deseada, necesitando llevar a cabo un mayor número de aplicaciones que las necesarias con otros productos como el Nikwax, que fue el que mejores resultados obtuvo en otros parámetros como contenido de materia seca y grado de polimerización.

4.1.5 Análisis microscópico

En cuanto a la forma en la cual recubre cada uno de los tratamientos el tejido del uniforme de Infantería de Marina, se aprecia que el Tecnadis tiende a depositarse en la superficie de las fibras (Figura 4-12), recubriéndolas, a pesar de este engrosamiento de las fibras se aprecian huecos entre las mismas. Del análisis EDS se aprecia, a diferencia de la muestra de tejido sin tratar, la aparición de nuevos elementos como el Si. La elevada señal de este compuesto, confirma una de las sospechas que teníamos y era que este producto se debe tratar de un silano-siloxano como la gran parte de productos que comercializa esta casa para otro tipo de aplicaciones.

En lo que respecta al Nasiol (Figura 4-13), este produce un recubrimiento de las fibras llegando a ocasionar en algunos casos la unión de las mismas. Sin embargo, pese a haber realizado un sobretratamiento, se siguen observando huecos grandes en la tela. Del análisis EDS se puede apreciar que el mayor contenido del producto es C, lo cual era esperable por el elevado contenido de hidrocarburos del compuesto, apreciándose además trazas de otros elementos como el F, lo que podría indicar la presencia de compuestos fluorocarbonados que presentan características hidrófugas, aunque son muy nocivos para el medio ambiente.

En las muestras tratadas con Hendlex (Figura 4-14) se aprecia la presencia del producto que genera una película por encima de la tela. Esta película, lejos de ser continua y homogénea, se ve craquelada en diferentes zonas, lo que parece indicar que este compuesto no se adapta lo suficiente al grado de flexibilidad que se le exige a un uniforme (cabe recordar que este producto se emplea en las capotas de los coches que son mucho más rígidas). Del análisis EDS se aprecia la alta presencia de fluor y sílice en la zona tratada lo cual podría indicar que el Hendlex es un fluosilicato, compuesto que suele ser empleado en la industria civil como consolidante, mezclados seguramente con fluorocarbonados que se emplean como elementos hidrófugos.

Finalmente, el análisis efectuado en las muestras de Nikwax (Figura 4-15), muestran un elevado recubrimiento del tejido, mucho más que en los casos anteriores, lo que concuerda con lo obtenido en los análisis de materia seca. De los análisis EDS se aprecia la presencia de zirconio correspondiente al acetato de circonio que lleva en su composición.

A pesar de con esta técnica podemos intuir los principales elementos que componen cada tratamiento, no es posible confirmar los compuestos, para ello se han utilizado otras técnicas como infrarrojos aunque no ha dado tiempo de analizar los perfiles obtenidos.

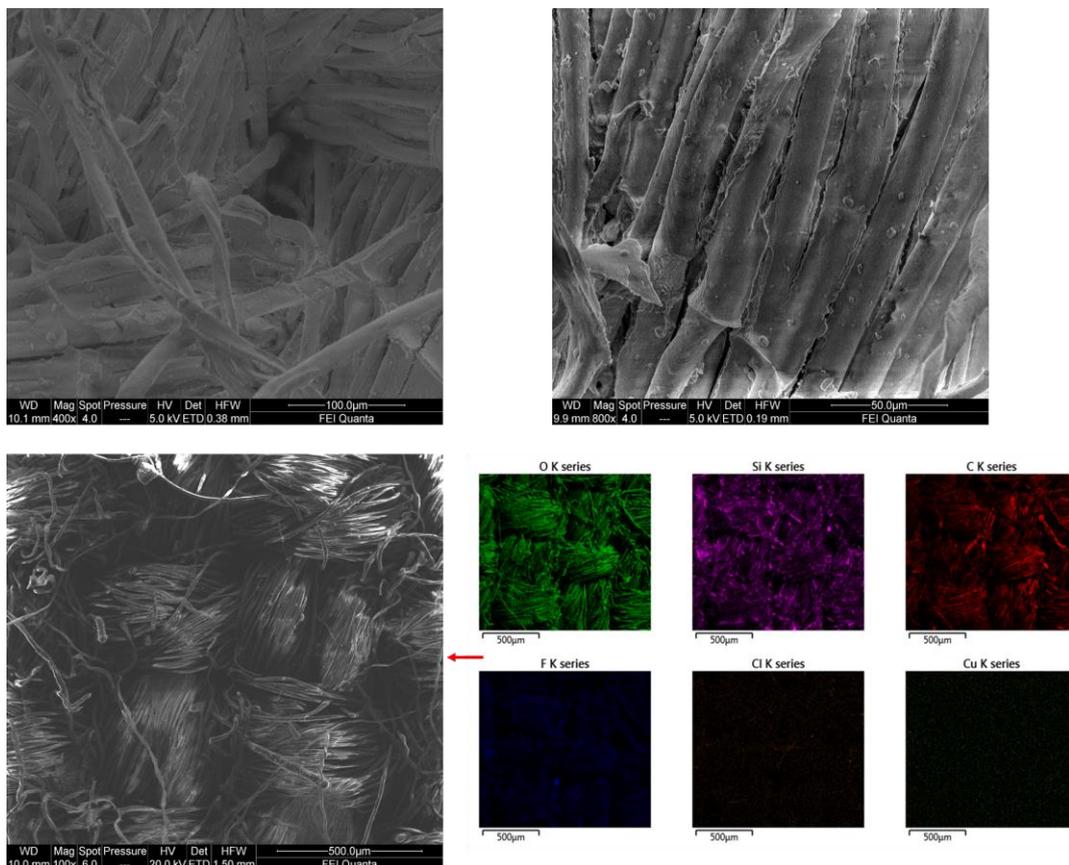


Figura 4-12 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Tecnadis a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del C, Si y el O

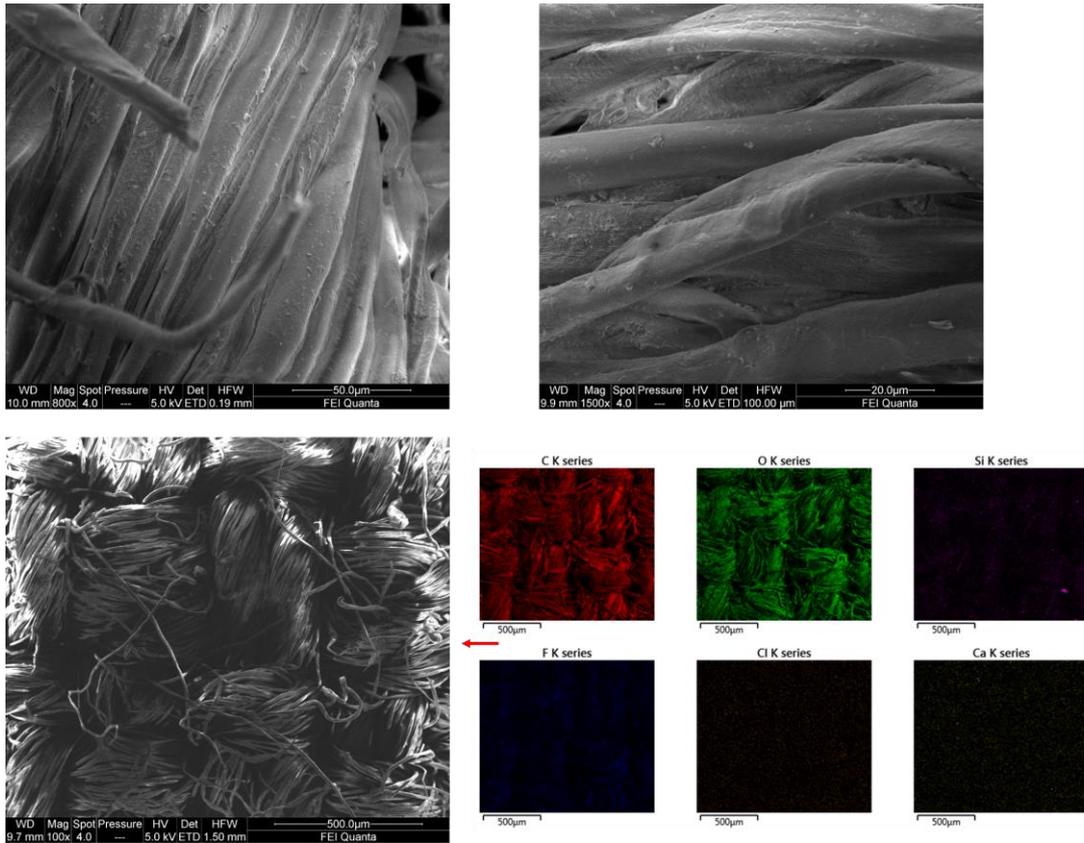


Figura 4-13 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Nasiol a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del C, O y en menor medida F y Si

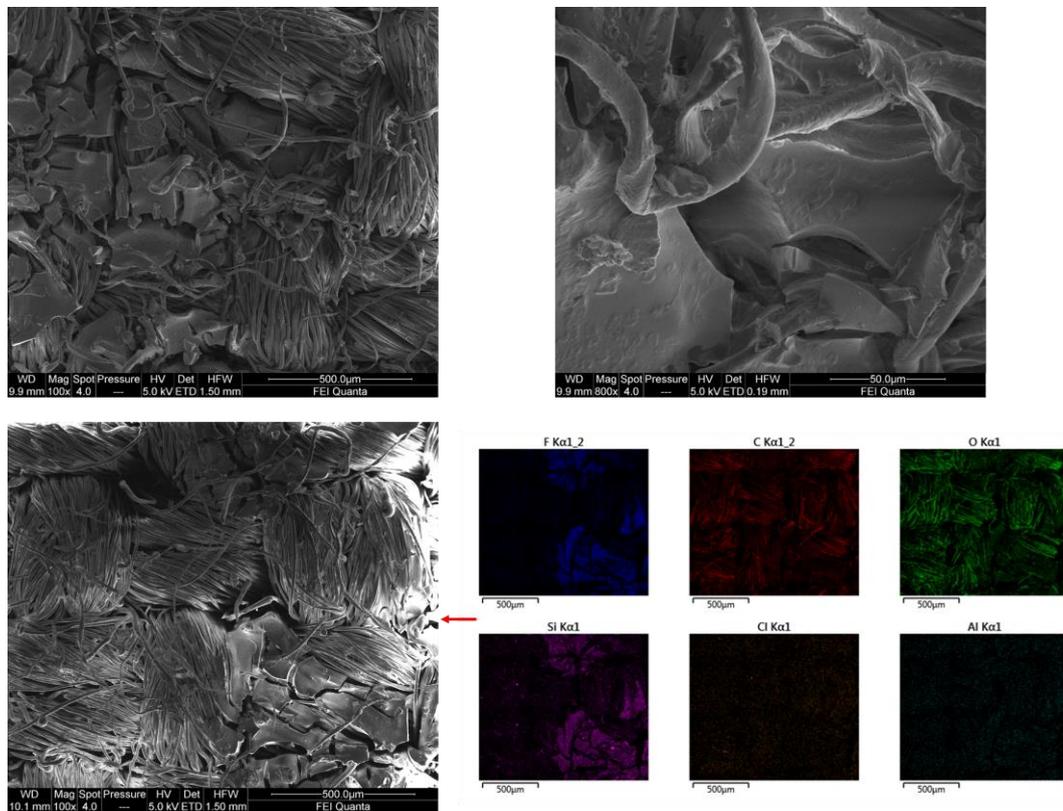


Figura 4-14 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Hendlex a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del Si y F en las zonas donde hay una mayor concentración de producto

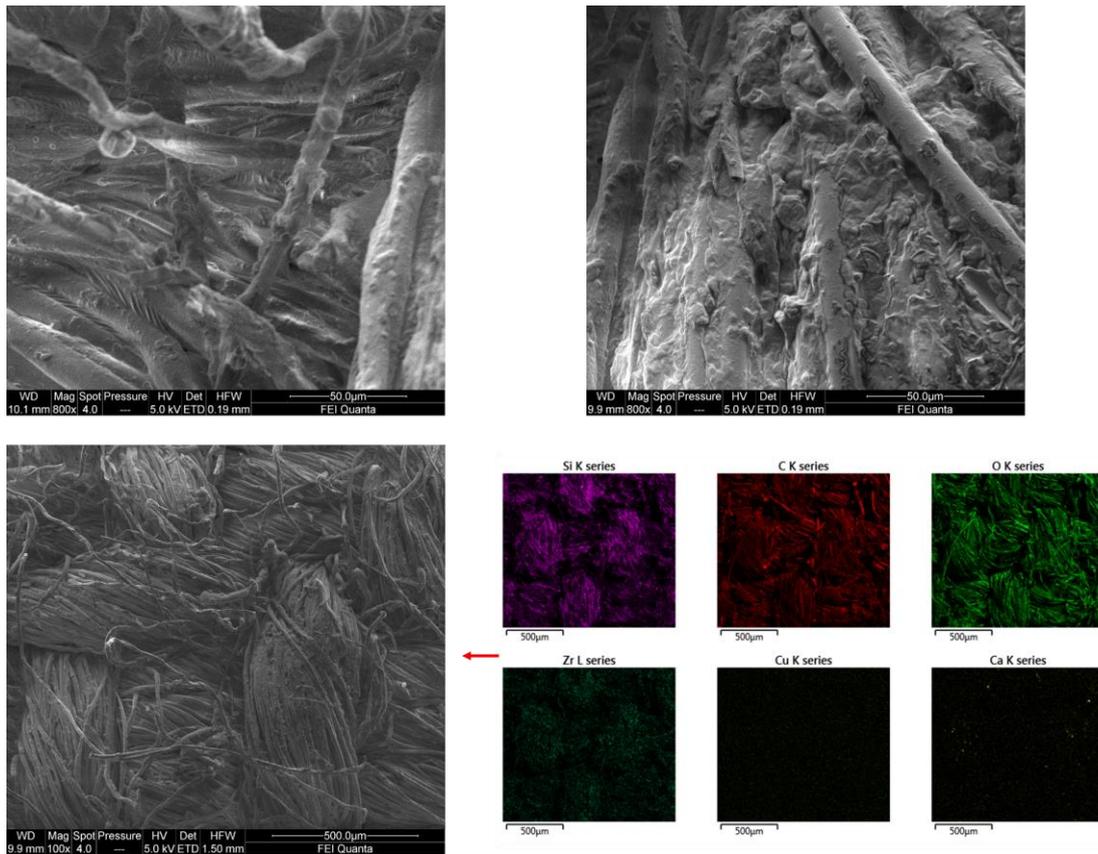


Figura 4-15 Imágenes SEM del tejido del uniforme de la Infantería de Marina tratado con Hendlex a diferentes magnificaciones. Se muestra además un mapping EDS de elementos donde se aprecia la señal del Si y F en las zonas donde hay una mayor concentración de producto

4.1.6 Ciclos térmicos

A continuación, se volverán a analizar un conjunto de muestras tratadas pero en esta ocasión se evaluará el comportamiento hidrófugo de la gota en condiciones de fatiga térmica tras la realización de 10 ciclos térmicos. Se llevarán a cabo dos ensayos (sales y hielo-deshielo), analizando en primer lugar los ángulos de contacto después de 5 ciclos iniciales (Figura 4-16) y finalmente los ángulos que se producen después de otros cinco ciclos finales (Figura 4-17) para estudiar la evolución del ángulo de contacto a lo largo del tiempo y la respuesta hidrófuga del tratamiento bajo condiciones de temperatura exigentes tras varios calentamientos y enfriamientos consecutivos (Figura 4-18).

- **Ensayo de sales**

En la Anexo II: Tablas y resultados de las mediciones se muestran los ángulos tomados en cada muestra, así como el ángulo medio y la desviación típica de cada producto, dividiendo los ensayos en ciclos de calentamiento mediante secado en estufa de muestras bañadas en agua salada (sales) y enfriamiento mediante congelación en frigorífico de muestras bañadas en agua (hielo-deshielo), cuyas imágenes se adjuntan como anexo a la memoria dada la cantidad de muestras analizadas.

Si analizamos el ángulo de contacto después de los primeros 5 ciclos de sales, se aprecia que estos siguen siendo elevados, especialmente en el caso particular del Nikwax que presenta un ángulo promedio de $146,56^\circ$. Transcurridos cinco ciclos más, se aprecia un incremento promedio en el ángulo de contacto, excepto en el caso del Nikwax. Lo esperable es que, debido a la alteración generada por la acción de las sales y la posible degradación del producto a elevadas temperaturas, la tendencia del ángulo sea decreciente. El aumento obtenido en los otros tratamientos guarda relación principalmente con la dispersión de las medidas.

| | SALES | | | HIELO-DESHIELO | | |
|-----------------|--------------|-----------|----------|----------------|-----------|----------|
| | ÁNGULO MEDIO | | Δ | ÁNGULO MEDIO | | Δ |
| | 5 CICLOS | 10 CICLOS | | 5 CICLOS | 10 CICLOS | |
| Tecnadis | 132,27 | 135,19 | 2,21 | 126,63 | 138,72 | 9,55 |
| Nasiol | 125,03 | 132,5 | 5,97 | 129,88 | 134,85 | 3,83 |
| Hendlex | 128,7 | 137,47 | 6,81 | 139,95 | 139,36 | -0,42 |
| Nikwax | 146,56 | 142,52 | -2,76 | 132,47 | 137,81 | 4,03 |

Tabla 4-9 Variación de los ángulos de contacto durante los ciclos térmicos

| | SALES | | | HIELO-DESHIELO | | |
|-----------------|------------|-----------|----------|----------------|-----------|----------|
| | PESO MEDIO | | Δ | PESO MEDIO | | Δ |
| | 5 CICLOS | 10 CICLOS | | 5 CICLOS | 10 CICLOS | |
| Tecnadis | 0,57 | 0,55 | 3,20 | 0,53 | 0,52 | 1,93 |
| Nasiol | 0,47 | 0,46 | 3,30 | 0,44 | 0,43 | 3,51 |
| Hendlex | 0,41 | 0,39 | 3,18 | 0,4 | 0,39 | 4,52 |
| Nikwax | 0,45 | 0,42 | 5,92 | 0,45 | 0,43 | 4,62 |

Tabla 4-10 Variación de pesos durante los ciclos térmicos

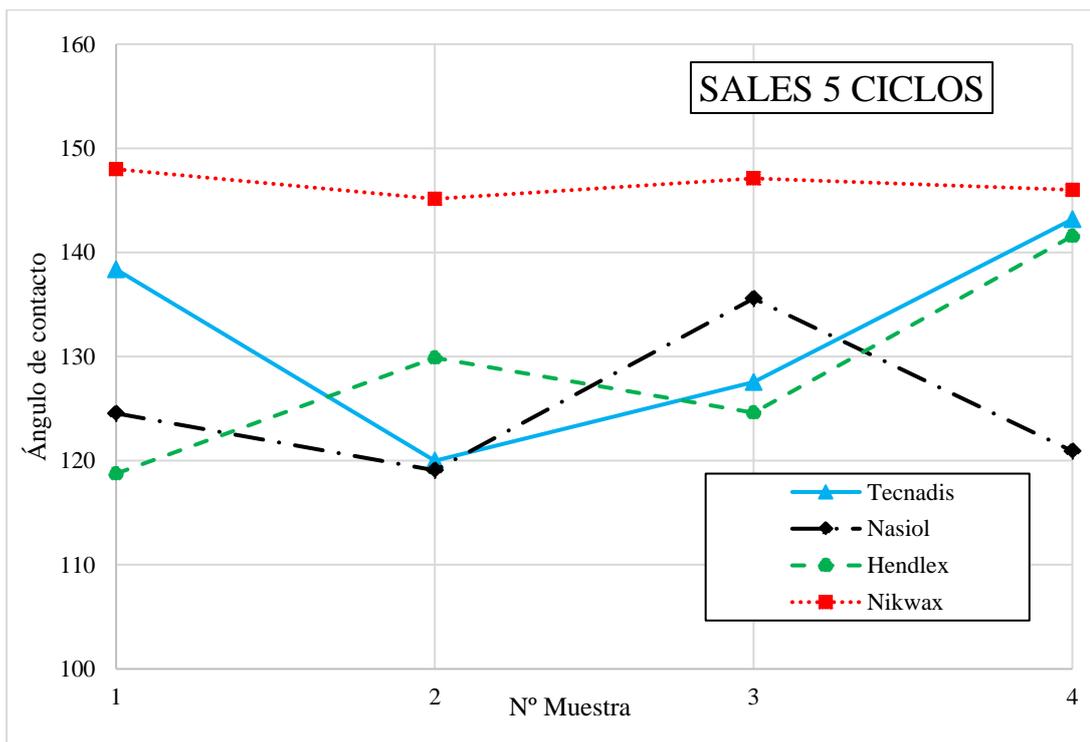


Figura 4-16 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 5 ciclos de secado para las cuatro muestras empleadas

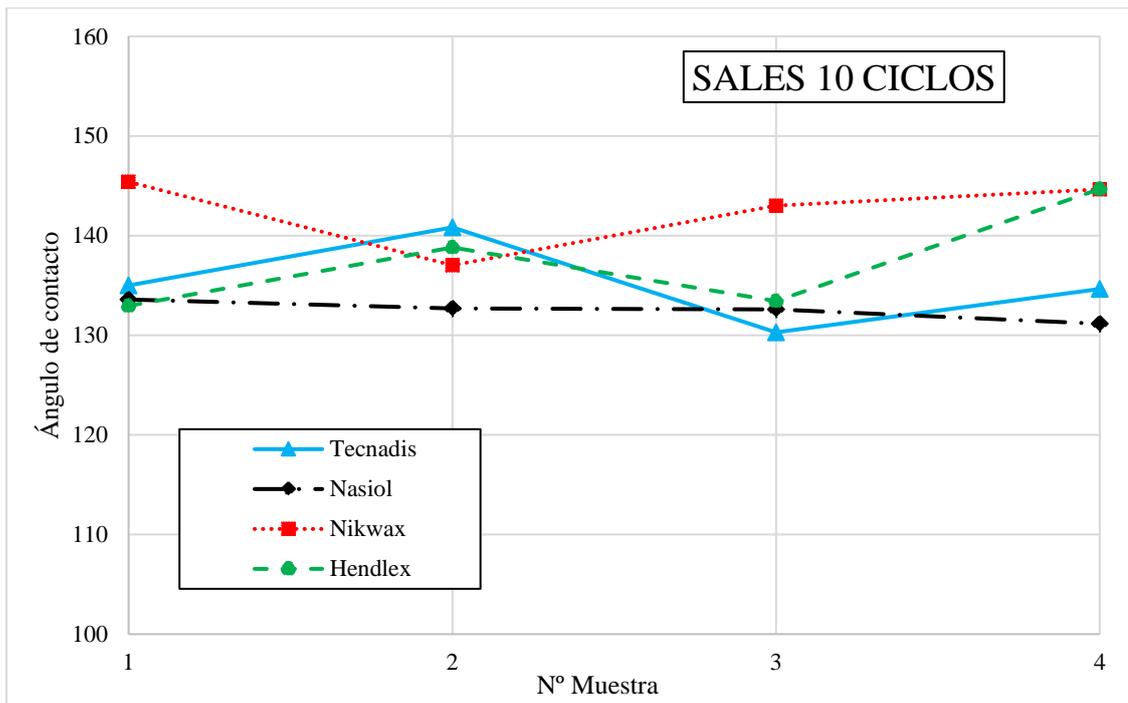


Figura 4-17 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 10 ciclos de secado

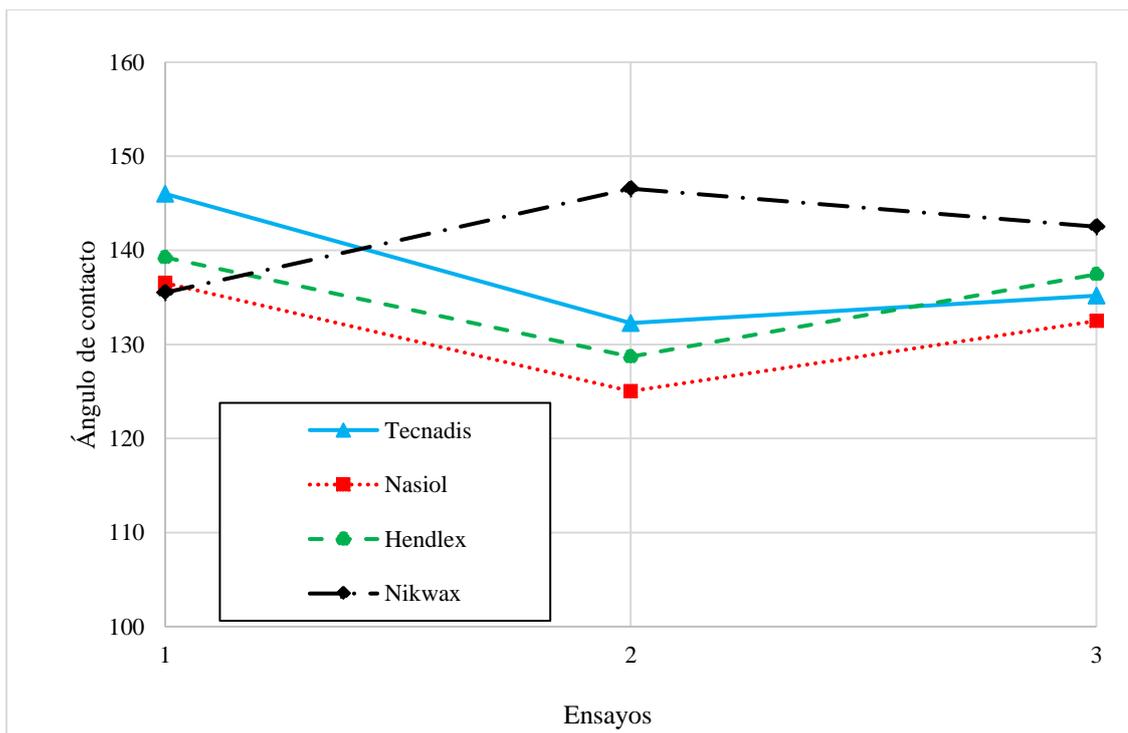


Figura 4-18 Evolución de los ángulos de contacto en los ciclos de sales: 1: inicial; 2: tras 5 ciclos y 3: tras 10 ciclos

Debido a que el agua de mar se trata del medio líquido más común con el que el uniforme de Infantería de Marina suele estar en contacto, se escogería el Nikwax como producto hidrorrepelente más adecuado ante sollicitaciones térmicas elevadas y contacto continuo con este líquido.

• Ensayo Hielo-deshielo

En los ciclos de enfriamiento de hielo-deshielo, los productos que confieren un mayor grado de protección después de 5 ciclos son el Hendlex y el Nikwax, aunque este último presenta una elevada dispersión en sus medidas. Transcurridos cinco ciclos más, se aprecia nuevamente un incremento en los ángulos de contacto, aunque al igual que en el ensayo anterior, esta variación puede, a excepción del ensayo con Tecnadis, ser considerada despreciable, lo que confirma la efectividad de estos tratamientos en ambientes fríos.

Por todo lo anteriormente expuesto, se puede afirmar con total seguridad que conforme a la efectividad hidrorrepelente de los tratamientos químicos aplicados evaluada en base al comportamiento que presentan ante ciclos de sales y condiciones cambiantes de temperatura, los productos más óptimos para potenciar las propiedades hidrofóbicas del tejido, son el Nikwax y el Hendlex.

En el caso particular del Nikwax, se aprecia una disminución en los ángulos de contacto detectado entre ensayos a altas temperaturas con respecto a los obtenidos a bajas temperaturas. Esto podría indicar que este producto puede llegar a sufrir una cierta degradación con la temperatura, aunque en caso de ser cierta esta hipótesis, esta degradación sería muy baja.

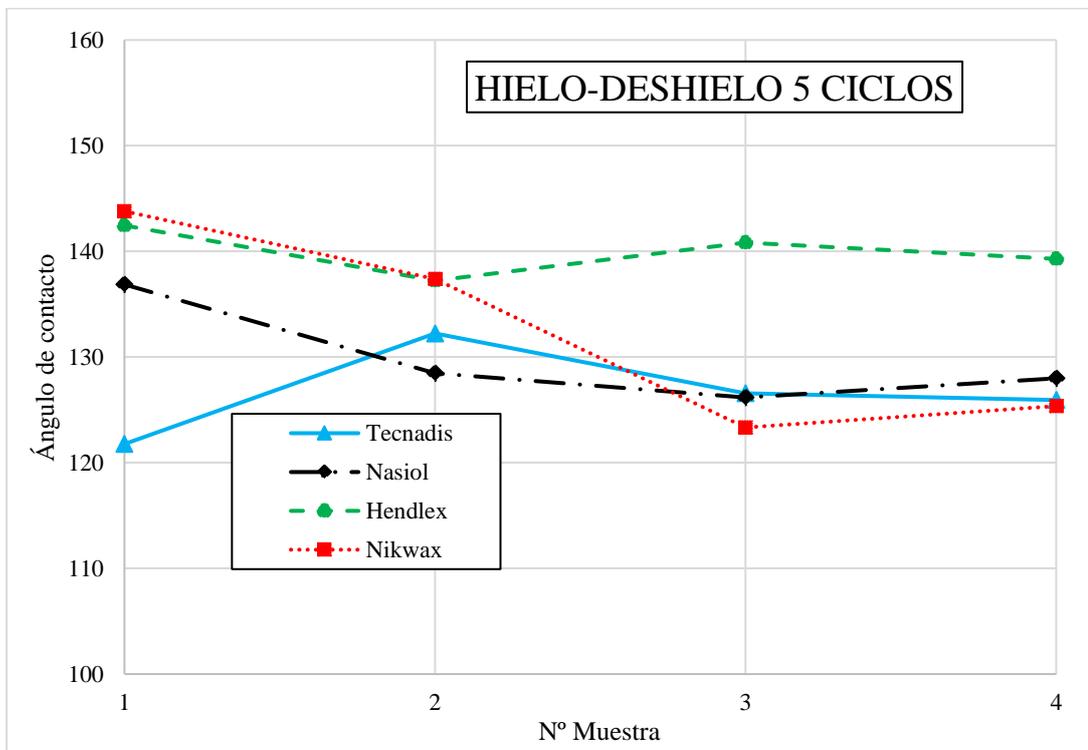


Figura 4-19 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 5 ciclos de enfriamiento para las cuatro umestras empleadas

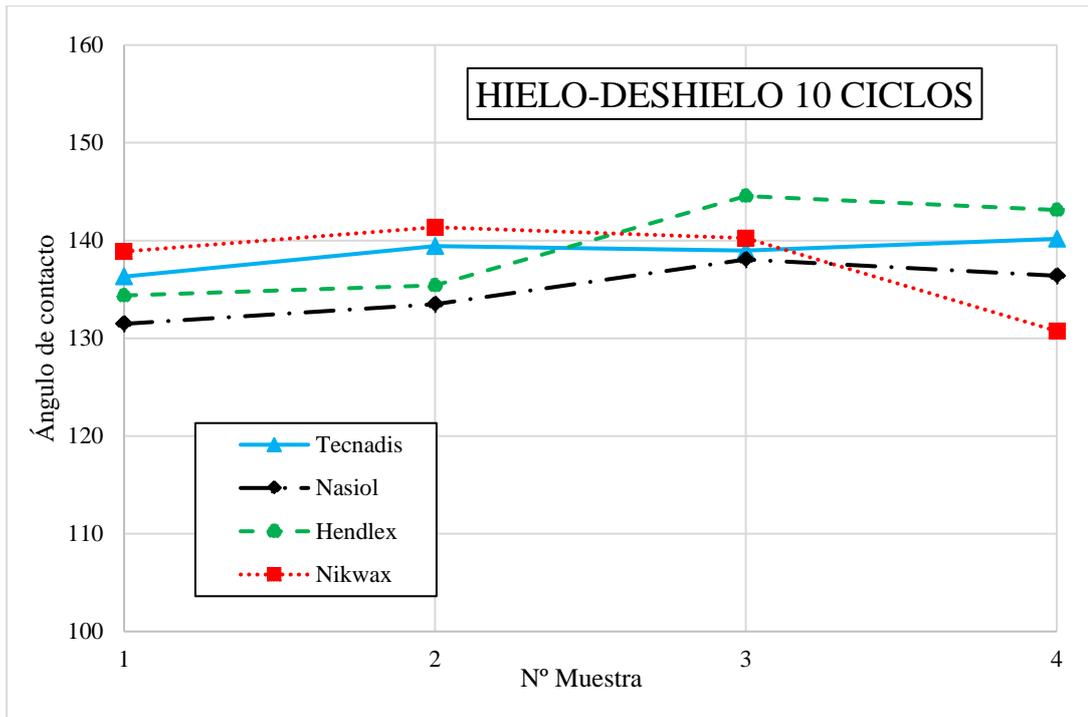


Figura 4-20 Representación gráfica de los ángulos de contacto después de 10 ciclos de enfriamiento

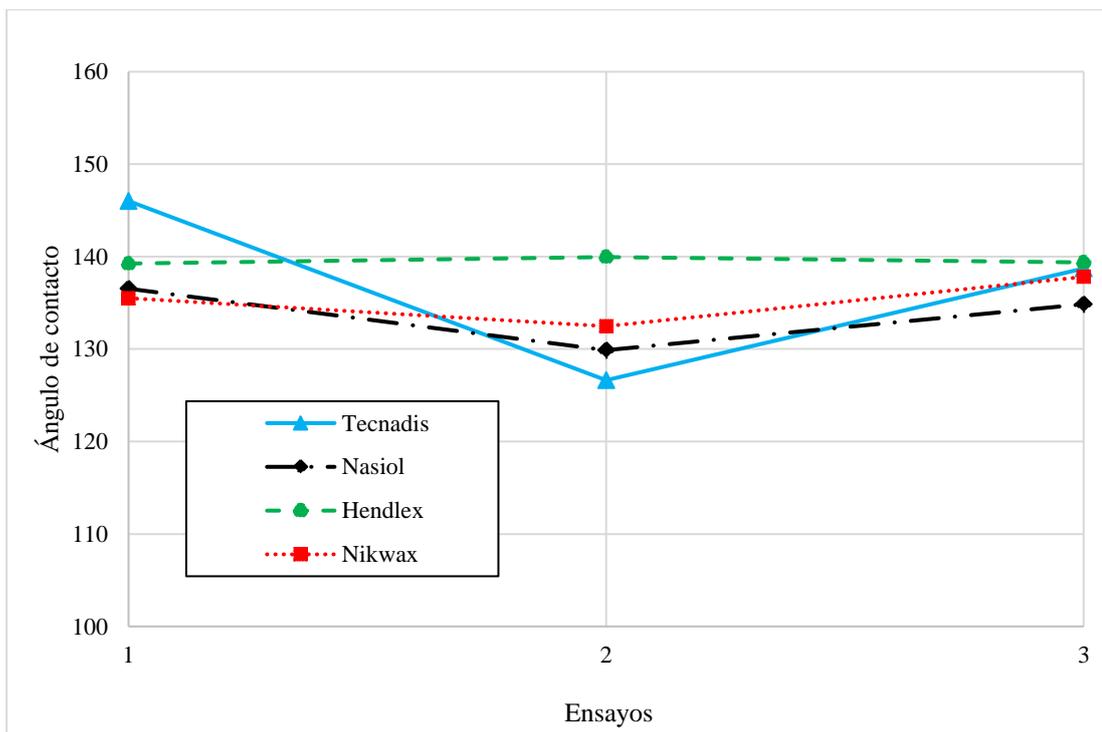


Figura 4-21 Evolución de los ángulos de contacto en los ciclos hielo-dehielo: 1: inicial; 2: tras 5 ciclos y 3: tras 10 ciclos

4.1.7 Penetrabilidad

Otra de las características básicas que debe reunir cualquier producto hidrofugante, es la capacidad de penetración y absorción a través de las microfibras de la tela tratada, para lo cual se presentarán en este apartado las diferencias de ángulos de contacto medidos entre la cara externa e interna del tejido para los cuatro productos utilizados, tras haber sido sometidos a los ciclos térmicos ya comentados con anterioridad (sales y hielo-deshielo).

Para el estudio de la capacidad hidrófuga y penetrabilidad mediante ángulo de contacto, se adjuntan en las siguientes tablas los ángulos de contacto de las muestras tratadas con los productos seleccionados según el criterio explicado en el bloque de Metodología del apartado 3.4.1, con la intención de mostrar la diferencia entre los ángulos del anverso y el reverso de la tela, diferenciando por una parte el ensayo de secado de las sales (Tabla 4-11) y por otra el de hielo-deshielo (Tabla 4-12).

En general se aprecia que todos los tratamientos han conseguido penetrar lo suficiente como para conferir propiedades hidrófugas en ambas superficies de la tela. Además, gracias a este estudio se confirma, una vez más, la hipótesis anterior de que el Nikwax se comporta mejor en condiciones de temperatura elevada y en contacto con sales solubles en agua, mientras que el Hendlex ofrece un mejor comportamiento en condiciones de baja temperatura.

| PRODUCTOS | PENETRABILIDAD EN SALES | | | |
|-------------|-------------------------|---------|-----------------------|-----------|
| | ÁNGULO | | DIFERENCIA DE ÁNGULOS | VARIACIÓN |
| | ANVERSO | REVERSO | | |
| Tecnadis 12 | 134,65° | 129,27° | 5,38° | 4,17 % |
| Nasiol 27 | 132,58° | 129,60° | 2,98° | 2,30 % |
| Hendlex 36 | 138,81° | 136,50° | 2,31° | 1,69 % |
| Nikwax 59 | 143° | 142,65° | 0,35° | 0,25 % |

Tabla 4-11 Penetrabilidad en sales

| PRODUCTOS | PENETRABILIDAD EN HIELO-DESHIELO | | | |
|-------------|----------------------------------|---------|-----------------------|-----------|
| | ÁNGULO | | DIFERENCIA DE ÁNGULOS | VARIACIÓN |
| | ANVERSO | REVERSO | | |
| Tecnadis 13 | 138,96° | 130,97° | 7,99° | 6,11 % |
| Nasiol 22 | 133,49° | 128,94° | 4,54° | 3,52 % |
| Hendlex 46 | 143,11° | 142,42° | 0,69° | 0,48 % |
| Nikwax 53 | 138,89° | 136,96° | 1,93° | 1,41 % |

Tabla 4-12 Penetrabilidad en hielo-deshielo

Esta conclusión se obtiene observando la diferencia de ángulos entre ambas superficies y la variación que experimentan en su ángulo de contacto. Para que un producto sea óptimo desde el punto de vista hidrofóbico, dicha variación debe ser lo más baja posible, lo que significa que la hidrofugación en ambas superficies ha sido efectiva y por lo tanto ha penetrado correctamente el nanorecubrimiento en la tela. Todo ello explica la escasa diferencia de ángulos del Nikwax y el Hendlex, en el ensayo de sales y de hielo-deshielo respectivamente, lo cual expresa la idoneidad del Nikwax por su alto poder de penetración y polimerización en ambientes calurosos, así como la idoneidad del Hendlex, altamente penetrante en atmósferas frías.

A continuación se adjuntan en la Figura 4-22 y la Figura 4-23 cuatro imágenes comparativas entre los ángulos medidos en ambas caras de las superficies hidrofugadas con Hendlex y Nikwax, al ser estos los productos que poseen una mayor penetrabilidad que el resto.

- Nikwax:

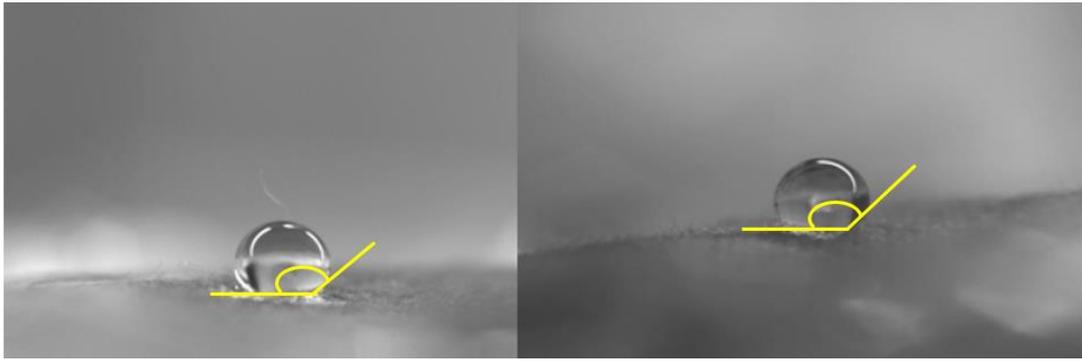


Figura 4-22 Ángulo de 143° del anverso (izquierda) y ángulo de 142,65° del reverso (derecha)

- Hendlex:

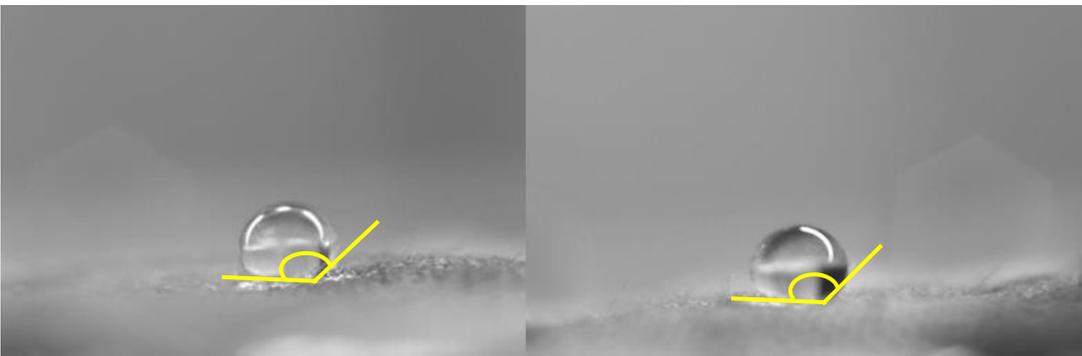


Figura 4-23 Ángulo de 143,11° del anverso (izquierda) y ángulo de 142,42° del reverso (derecha)

4.1.8 Desorción

En cualquier proceso de mojado y secado, existe un período de tiempo determinado comprendido entre el momento inicial que se moja la tela hasta el momento final que la humedad acumulada se vuelve nula (tela totalmente seca). Este proceso es lo que se conoce como secado.

Durante cualquier proceso de secado existen los denominados grados de desorción del agua a medida que avanza el tiempo, es decir, se registran cantidades decrecientes de agua que la tela posee en cada instante de tiempo, las cuales van disminuyendo hasta converger en cero cuando la tela se halla completamente seca. Conociendo este proceso es posible estudiar la desorción de agua que experimentan las muestras tratadas conforme a las muestras originales sin tratamiento previo alguno. La intención de este apartado es analizar el ritmo al que pierden agua las muestras tratadas químicamente y sometidas a ciclos térmicos, comparándolas siempre con al menos una muestra de referencia sin tratar y obtener así el producto cuya pérdida o desorción de agua sea lo más rápida y estable posible, ya que un producto que permita la desorción rápida del agua, reduce los tiempos de secado con su correspondiente beneficio para la mejora hidrofóbica del tejido.

Para ello se presenta la Figura 4-24 y la Figura 4-25, separadas según el tratamiento térmico al que hayan sido sometidas las muestras (sales o hielo-deshielo), en las que se muestra la evolución de la desorción de agua en el tejido para diferentes instantes de tiempo y cuyas medidas vienen recogidas en el anexo a la memoria por la extensión de las mismas.

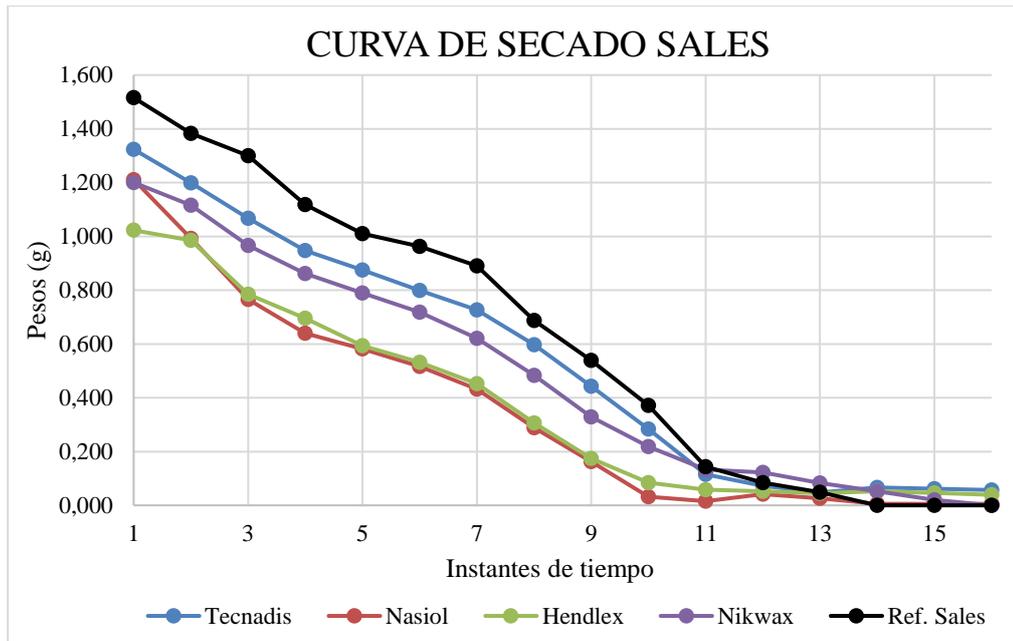


Figura 4-24 Curva de secado de las muestras sometidas a calentamiento

En general se aprecia una diferencia notable entre el comportamiento mostrado por las telas sin tratamiento a las telas tratadas, ya que éstas absorbieron mucha menos agua. Este hecho parece lógico si tenemos en cuenta el grado de protección proporcionado y el recubrimiento de parte de los huecos existentes entre las fibras. Comparativamente entre productos, se aprecia que tanto Hendlex como Nasiol no permitieron que las telas absorbiesen tanta agua durante el tiempo que permanecieron sumergidas, lo cual indica una mayor protección con respecto a los otros tratamientos. Analizando la pendiente de curva de desorción, se aprecia nuevamente que ésta fue más marcada con el producto Hendlex y Nasiol, lo que indica que la velocidad de secado es mucho más rápida. En definitiva, esto provoca que las telas tratadas con ambos productos se sequen antes que las telas tratadas con Nikwax o con Tecnadis, las cuales llegan a converger con los datos registrados en las muestras de referencia en los instantes finales.

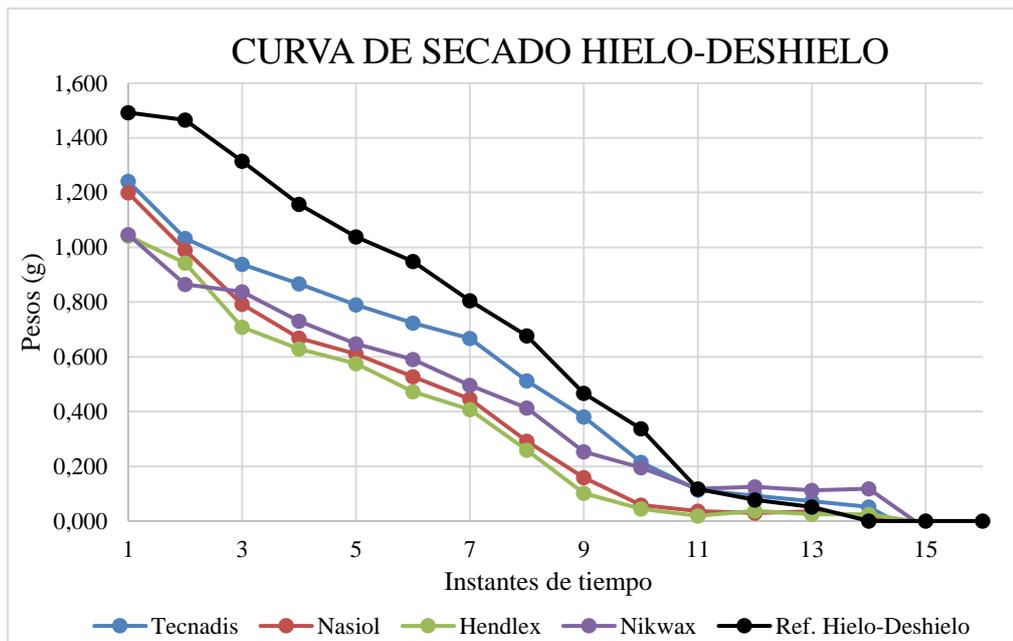


Figura 4-25 Curvas de secado de las muestras sometidas a enfriamiento

En cuanto a las muestras sometidas a ciclos de enfriamiento hielo-deshielo, los cuatro productos en general siguen un comportamiento más estable que en el caso anterior, no apreciándose las diferencias detectadas anteriormente. En este caso vuelven a destacar, aunque ligeramente, los productos Hendlex, y Nasiol, por presentar una mayor pendiente durante la desorción y por alcanzar el peso nulo de secado antes que el resto de muestras.

Una vez analizadas ambas gráficas conjuntamente, se aprecia que tanto el Hendlex como el Nasiol son los productos más adecuados para la consecución de una desorción eficaz y secado rápido de la tela.

4.2 Análisis físico

4.2.1 Patrones de texturización

En este apartado se presentarán los parámetros introducidos en las matrices de ensayos de los diferentes softwares de procesamiento según el tipo de láser utilizado, indicando el número de celdas texturizadas y los cambios efectuados.

- **Láser IR**

En primer lugar para el láser IR Q-switched de Nd:YVO₄ de nanosegundos (armónico fundamental, $\lambda = 1064 \text{ nm}$), se han llevado a cabo un total de 32 ensayos variando los parámetros comprendidos entre los valores límite de la Tabla 4-13, y siguiendo la disposición mostrada en la Tabla 4-14.

| Parámetros IR | Valor mínimo | Valor máximo |
|----------------------|--------------|--------------|
| Potencia media | 0,5 kW | 12,5 kW |
| Velocidad de barrido | 100 mm/s | 1000 mm/s |
| Frecuencia | 20 kHz | 50 kHz |
| Solapamiento | -50 % | +50 % |

Tabla 4-13 Valores límite del láser IR

| | | | | | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----|
| Potencia | 0,5 kW | 12,5 kW | 0,5 kW | 12,5 kW | 0,5 kW | 12,5 kW | 0,5 kW | 12,5 kW | |
| Barrido | 100 mm/s | 100 mm/s | 100 mm/s | 100 mm/s | 1000 mm/s | 1000 mm/s | 1000 mm/s | 1000 m/s | |
| Frecuencia | 20 kHz | 20 kHz | 50 kHz | 50 kHz | 20 kHz | 20 kHz | 50 kHz | 50 kHz | |
| Solape | -50% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | +50 % | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| | -50% | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| | +50 % | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |

Tabla 4-14 Combinación de parámetros introducidos en el láser IR

Una vez realizada esta serie de ensayos se realizaron a mayores nuevas pruebas de texturizado con los siguientes parámetros: 12,5 kW de potencia, frecuencia de 20 kHz, variando la velocidad de procesamiento en 200 mm/s, 400 mm/s y 600 mm/s y con un solape de -50 % y + 50 %. Cuyo resultado fue el que se muestra en la Figura 4-26, la cual desaconseja claramente la técnica de micro-texturizado

IR, ya que como se puede apreciar en la imagen deteriora el tejido hasta quemarlo y romperlo por completo.



Figura 4-26 Resultados de los ensayos del láser IR

- **Láser de ultravioleta**

El siguiente láser con el que se experimentó fue el láser Q-switched de Nd:YVO₄ de nanossegundos (tercer armónico, $\lambda = 365 \text{ nm}$), que de forma análoga al caso anterior, se han realizado otros 32 ensayos comprendidos dentro del rango de parámetros del láser UV mostrados en la Tabla 4-16 y cuyas combinaciones han sido las que aparecen recogidas en la Tabla 4-16.

| Parámetros UV | Valor mínimo | Valor máximo |
|----------------------|--------------|--------------|
| Potencia media | 0,37 kW | 1,80 kW |
| Velocidad de barrido | 100 mm/s | 1000 mm/s |
| Frecuencia | 15,2 kHz | 50 kHz |
| Solapamiento | -50 % | +50 % |

Tabla 4-15 Valores límite del láser UV

| | | | | | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----|
| Potencia | 0,37 kW | 1,80 kW | 0,37 kW | 1,80 kW | 0,37 kW | 1,80 kW | 0,37 kW | 1,80 kW | |
| Barrido | 100 mm/s | 100 mm/s | 100 mm/s | 100 mm/s | 1000 mm/s | 1000 mm/s | 1000 mm/s | 1000 m/s | |
| Frecuencia | 20 kHz | 20 kHz | 50 kHz | 50 kHz | 20 kHz | 20 kHz | 50 kHz | 50 kHz | |
| Solape | -50% | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | +50 % | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| | -50% | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| | +50 % | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |

Tabla 4-16 Combinación de parámetros introducidos en el láser UV

En la Figura 4-27 se ilustra el resultado obtenido, siendo este un proceso de ablación menos invasivo que el láser IR, aunque igualmente perjudicial para la tela, ya que en ciertas áreas de texturizado, el tejido se debilita, perdiendo color y consistencia, hasta el extremo de perder casi toda la hilatura original, como es el caso marcado en la imagen del ensayo número 10.



Figura 4-27 Resultados de los ensayos del láser UV

- **Láser de picosegundos**

Para el láser Q-switched de Nd:YVO₄ de picosegundos (tercer armónico, $\lambda = 1064 \text{ nm}$), el procedimiento seguido fué muy similar a los anteriores pero esta vez en lugar de 32 ensayos se realizaron 30 según lo mostrado en la Tabla 4-18, pero a diferencia de los ensayos anteriores en este caso se sometieron a ensayo dos muestras independientes en lugar de una.

En el primer ensayo (Tabla 4-18) no se modificó el solapamiento entre pasadas ni la velocidad de barrido sino que se mantuvo constante, mientras que se varió la potencia media del láser y la frecuencia de procesamiento.

En cambio en el segundo ensayo si se aplicó solapamiento entre pasadas con un valor constante de -40 % que es el valor mínimo posible que ofrece este tipo de láser, como bien se puede comprobar en la Tabla 4-17, manteniendo también los parámetros anteriores de velocidad de barrido constante (75 mm/s) y mismas frecuencias usadas anteriormente, comprendidas entre los márgenes máximos y mínimos del láser en cuestión.

| Parámetros Picoláser | Valor mínimo | Valor máximo |
|----------------------|--------------|--------------|
| Potencia media | 2,41 kW | 6,45 kW |
| Velocidad de barrido | 70 mm/s | 100 mm/s |
| Frecuencia | 200 kHz | 800 kHz |
| Solapamiento | 0 % | -40 % |

Tabla 4-17 Valores límite del láser de picosegundos

| | | | | | | | |
|------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Solape | | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| Barrido | | 75 mm/s |
| Frecuencia | | 200 kHz | 300 kHz | 400 kHz | 500 kHz | 700 kHz | 800 kHz |
| Potencia | 6,5 W | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | 5,5 W | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | 4,5 W | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| | 3,5 W | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| | 2,5 W | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

Tabla 4-18 Combinación de parámetros del primer ensayo del láser de picosegundos



Figura 4-28 Resultados de los ensayos realizados sobre la 1ª muestra con solape al 0 %

| | | | | | | | |
|------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Solape | | -40 % | -40 % | -40 % | -40 % | -40 % | -40 % |
| Barrido | | 75 mm/s |
| Frecuencia | | 200 kHz | 300 kHz | 400 kHz | 500 kHz | 700 kHz | 800 kHz |
| Potencia | 6,5 W | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | 5,5 W | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | 4,5 W | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| | 3,5 W | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| | 2,5 W | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

Tabla 4-19 Combinación de parámetros del segundo ensayo del láser de picosegundos



Figura 4-29 Resultados de los ensayos realizados sobre la 2ª muestra con solape al -40 %

De nuevo es fácilmente apreciable como la ablación de este láser deteriora el tejido, llegando incluso a quemar por completo sus fibras, con el correspondiente cambio de tonalidad que ello conlleva.

- **Láser de CO₂**

Para el último caso probado del láser de CO₂ ($\lambda = 10600 \text{ nm}$), se realizó una matriz 8 x 10 de ensayos modificando la potencia del láser (de 2,5 W a 25 W, en el «eje X») y la velocidad de barrido (de 10 mm/s hasta 1200 mm/s, en el «eje Y»), para un total de 80 ensayos.

Sin embargo, la mera inspección visual de las muestras obtenidas en los ensayos con láser de CO₂ permitió el descarte de esta fuente láser ante los pobres resultados obtenidos, ya que en ciertos casos apenas sufre cambios la superficie tratada y en otros por el contrario el material se quema casi por completo, tal y como se puede observar en la parte marcada de la Figura 4-30. Un intento de análisis rápido del ángulo de contactor permitió corroborar este hecho, pues las gotas eran absorbidas por el tejido a los pocos segundos de su deposición sobre la zona tratada, imposibilitando por tanto obtener las medidas pertinentes del ángulo de contacto.



Figura 4-30 Resultados del láser de CO₂

4.2.2 Evaluación y análisis de resultados

Durante el presente apartado se evaluarán los resultados obtenidos de los patrones de texturización aplicados, aunque en general dichos resultados han sido insatisfactorios para la mejora hidrófuga del uniforme, dado que en la mayoría de casos la gota se extiende y moja la superficie texturizada en su totalidad, lo cual desaconseja por completo el uso de procedimientos físicos de ablación láser, no solo por la ineficacia del tratamiento en lo que a hidrofobicidad se refiere, sino también por la abrasión que provoca sobre la tela procesada, que da lugar al deterioro de otras propiedades como la tonalidad, el espesor o la resistencia de la misma.

Para el estudio de estos resultados se analizarán de nuevo los ángulos de contacto y los cambios de rugosidad experimentados.

4.2.2.1 Ángulos de contacto:

Una vez realizados los tratamientos de micro-texturizado láser se procedió a la caracterización de los mismos mediante el estudio de la mojabilidad a través del ensayo de la gota para la medición de los ángulos de contacto que se producen sobre la superficie texturizada. Este estudio constató la poca eficacia del tratamiento con láser pues en la mayor parte de los ensayos la gota era directamente absorbida por el tejido en pocos segundos (de 2 a 10 segundos). Los únicos resultados destacados fueron:

- **Láser IR**

No se practicaron ensayos de ángulos de contacto, ya que la superficie procesada queda totalmente atravesada y quemada por el haz (véase Figura 4-26).

- **Láser UV**

- Ensayo 5: La gota permaneció aproximadamente 10 s sobre la superficie, antes de ser totalmente absorbida por el tejido con un ángulo medio medido de $76^\circ (\pm 1)$.
- Ensayo 13: La gota estuvo también unos 10 s con un ángulo medio de $115^\circ (\pm 1)$.

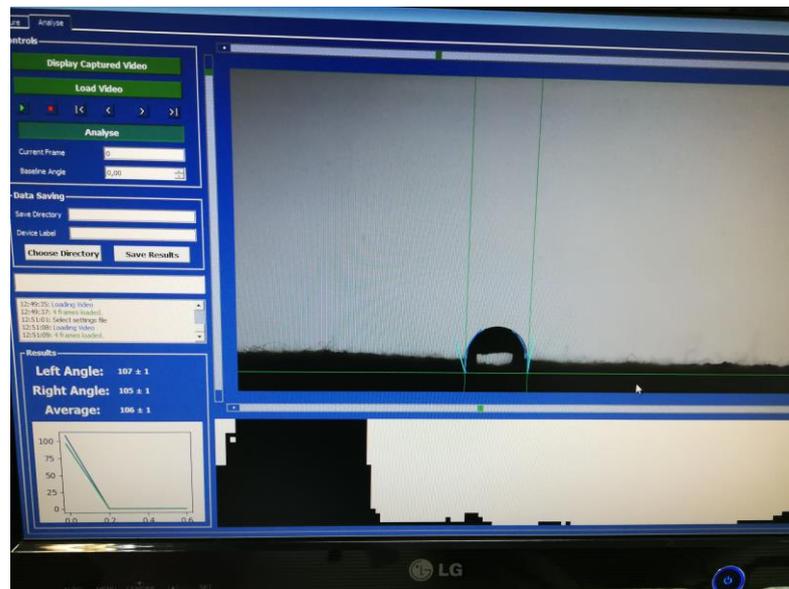


Figura 4-31 Medición del ángulo de contacto de la muestra tratada con el láser UV

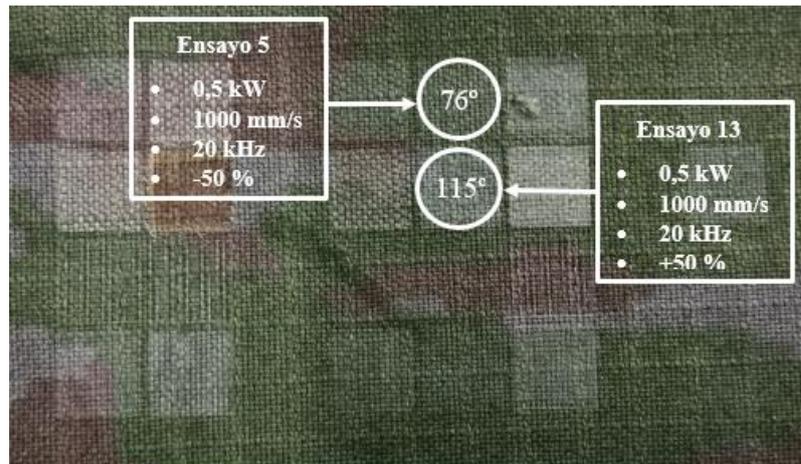


Figura 4-32 Ángulos de contacto obtenidos con el láser UV

Para el tratamiento con este tipo de láser, los únicos parámetros que favorecen en cierta medida la hidrofobicidad y la formación de la gota, son los que aparecen marcados en la Figura 4-32, destacando que la potencia incidente del haz es el factor que más influye en la texturización del tejido, debiendo aplicar la mínima posible para evitar un deterioro excesivo de la tela, tal y como ocurre en el ensayo 10 (véase Figura 4-27), que en la propia imagen adjunta resulta evidente la abrasión y el debilitamiento de fibra textil, hasta provocar prácticamente su rotura debido al uso de una potencia superior en este área (12,5 kW en lugar de 0,5 kW). No obstante, como bien se indicó al inicio de este apartado la formación de la gota dura escasos segundos, por lo que no se obtienen las propiedades hidrófugas esperadas.

Además, en el resto de celdas de texturización, la gran mayoría de ellas sufren una notable pérdida de color que confiere una tonalidad clara al tejido, lo cual perjudica las propiedades de camuflaje que deben cumplir los uniformes de Infantería de Marina.

- **Láser de picosegundos**

Los únicos ensayos en los que se obtuvieron resultados reseñables, fueron en la segunda muestra utilizada con solapamientos entre celdas de -40%:

- Ensayo 2: La gota permaneció aproximadamente 2 minutos sobre la superficie con un ángulo medio medido de $105^{\circ} \pm 1^{\circ}$.
- Ensayo 3: La gota estuvo también durante 2 minutos con un ángulo medio de $117^{\circ} \pm 1$.
- Ensayo 19: El tiempo de permanencia de la gota fue de 5 minutos, alcanzando un ángulo medio de $116^{\circ} \pm 1^{\circ}$.

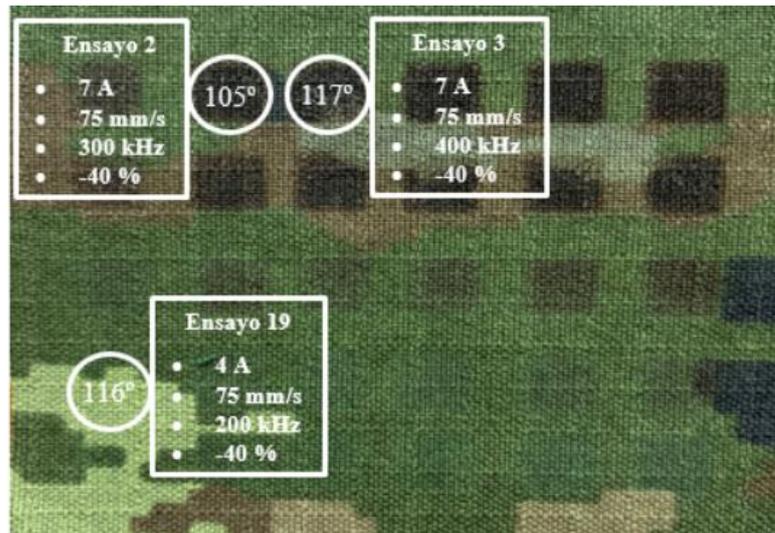


Figura 4-33 Ángulos de contacto obtenidos con el láser de picosegundos

Analizando en detalle los parámetros y los valores obtenidos de este segundo conjunto de ensayos, es posible comprobar como la potencia sigue siendo el factor determinante que condiciona en mayor medida los resultados del proceso.

En esta segunda muestra sometida procesada, los parámetros de solapamiento y velocidad de barrido son constantes para todas las celdas, modificando la potencia y la frecuencia del haz.

Concretamente para el ensayo 2 y 3, se empleó una potencia común de 6.5 W con una frecuencia de 300 kHz y 400 kHz respectivamente. Para este tipo de láser, esta combinación de parámetros genera valores de potencia elevados para las limitaciones de potencia máxima características de este tipo de fuente láser. La aplicación de estas combinaciones de parámetros corresponden a las celdas de texturización en peor estado por efecto de la texturización según la Figura 4-33, con lo cual su uso quedaría descartado. En cambio en el ensayo 19, se trató la tela con una potencia de 3,50 W cuya zona de texturización muestra mejor aspecto que las anteriores, no solo en términos de tonalidad y estado de la tela, sino también en lo que a ángulo de contacto se refiere, debido a que la potencia empleada fue inferior, lo cual consiguió aportar al tejido cierta capacidad hidrofóbica generando una gota con un ángulo de contacto 116° durante casi 5 minutos sobre la superficie, que aunque pueda parecer un resultado pobre en comparación con los ángulos que se obtuvieron a través de los tratamientos químicos, esta resulta ser la mejor combinación posible de parámetros con los que se han experimentado, principalmente porque es la que consigue repeler gota durante más tiempo.

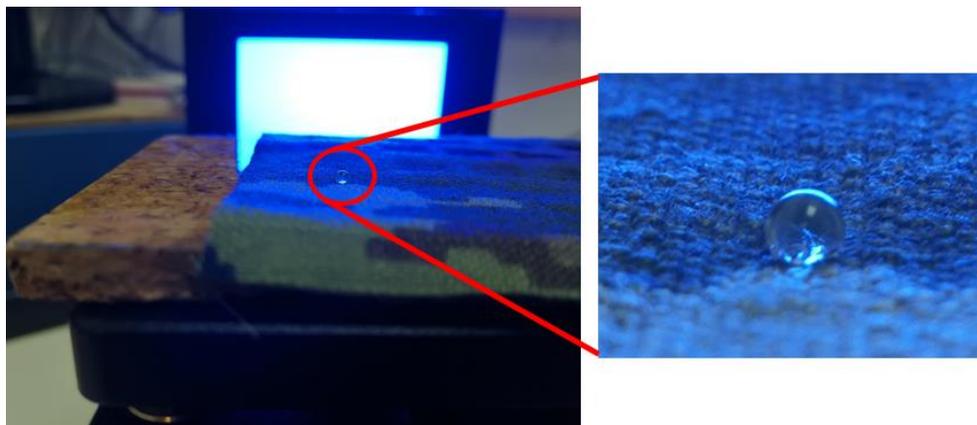


Figura 4-34 Medición del ángulo de contacto en la muestra tratada con el láser de picosegundos

- **Láser de CO₂**

Como ya se comentó anteriormente, se omitió la realización de ensayos de ángulos de contacto sobre la tela tratada con este láser, por la irregularidad del proceso al obtener zonas sin apenas cambios apreciables y otras prácticamente inservibles por la agresividad del tratamiento que consume el tejido.

Así pues, se puede concluir que de todos los ensayos realizados y los tipos de láseres probados, el láser de picosegundos es el que mejor resultado ofrece como técnica de micro-texturizado para la mejora hidrófuga del tejido, empleando un régimen de texturización de 4 A, 200 kHz, -40% de solape y 75 mm/s de velocidad de barrido, dando lugar a un ángulo de contacto de 116° durante un tiempo máximo de 5 minutos.

4.2.2.2 Análisis de la superficie por perfilometría interferométrica

La intención de esta segunda técnica de análisis es estudiar el perfil resultante de la superficie texturizada en aquellos ensayos en los que la combinación de parámetros aplicada muestre cierta repercusión en el comportamiento hidrofóbico del tejido.

Este procedimiento tiene por objetivo comprobar la efectividad del tratamiento físico, para confirmar si realmente los parámetros de texturización seleccionados y aplicados a través de la estación láser que corresponda, consiguen aportar a la superficie del tejido un modelo de microrugosidad hidrorrepelente que permita generar superficies irregulares con espacios intersticiales capaces de sostener la gota y detener el avance del agua.

Para cumplir con tal cometido se tomaron a través de un perfilómetro óptico imágenes de la muestra tratada con el láser de picosegundos por ser esta la fuente que en cierto modo mejor resultado obtuvo, dentro de la escasa mejora que se experimentó el tejido en cuanto a formaciones de gotas puntuales en ciertos ensayos de texturización que no duraron más de 5 minutos en el mejor de los casos.

El resultado del relieve a escala nanométrica de la superficie procesada es el que se muestra en la siguiente imagen de la Figura 4-35.

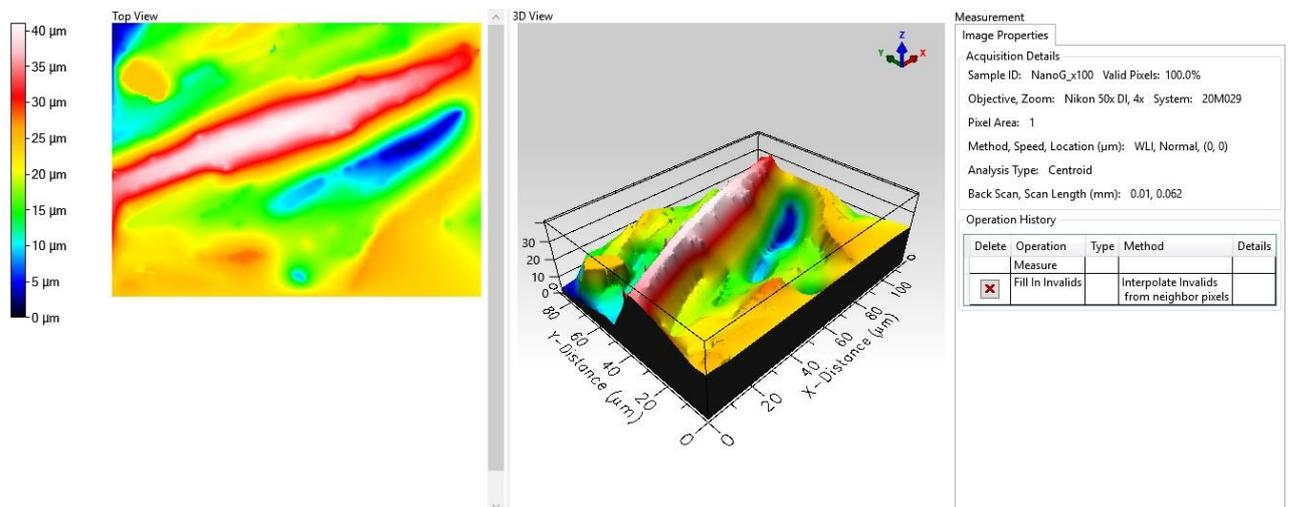


Figura 4-35 Perfil nanométrico de la muestra tratada con el láser de picosegundos

La imagen que se obtuvo por perfilometría óptica, revela la existencia de una cresta cuyo pico se resalta en rojo en el que la longitud de onda de la señal reflejada es mayor.

Esta fue la única imagen representativa que se pudo extraer de la superficie del tejido ya que al tratarse de una tela oscura diseñada con fines de mimetización y camuflaje, resultó complicado caracterizar su rugosidad superficial, dado que al tratarse de un instrumento de medida óptico no ofrece grandes resultados ante superficies oscuras que reduzcan el reflejo de la luz incidente.

Concretamente el perfil de la Figura 4-35, que fue el único obtenido con una calidad de imagen razonable, se detectó que dicha protuberancia fue debida a la presencia de un hilo o fibra del tejido, en lugar de formar parte de este y constituir así el microperfil rugoso buscado.

Debido a que este método de análisis resultó insuficiente e insatisfactorio, se descartó la presencia de áreas rugosas con capacidad hidrofóbicas, confirmando así la ineficacia del método físico de texturizado láser como método adecuado de mejora hidrófuga del tejido.

4.3 Análisis conjunto

Se sometieron a ensayos físicos de texturizado láser dos muestras tratadas con el producto hidropelente Nikwax, caracterizado en procesos de análisis químicos anteriores como el recubrimiento que mejores resultados ofrece desde el punto de vista hidrofóbico y que mejor se adapta a las necesidades hidrófugas del uniforme.

Se tomaron ambas muestras para exponer una de ellas al láser de picosegundos y la otra al láser ultravioleta, ya que han sido las únicas fuentes capaces de imprimir cierta capacidad hidrófuga en la tela sin llegar a recurrir a los métodos químicos ya conocidos.

En la imagen de la Figura 4-36, se representa el procesado de la muestra sometida al láser de picosegundos con resultados aparentemente satisfactorios.

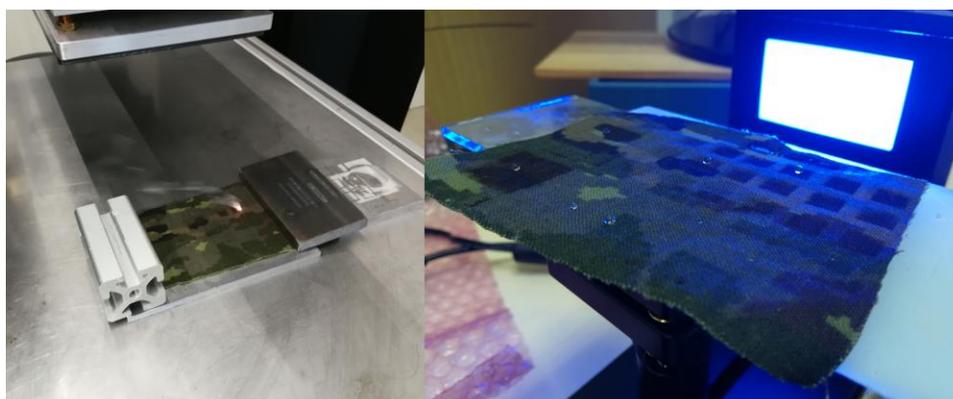


Figura 4-36 Procesado mediante láser de picosegundos (izquierda) y muestra texturizada sometida a ensayos de medición de ángulos de contacto (derecha)

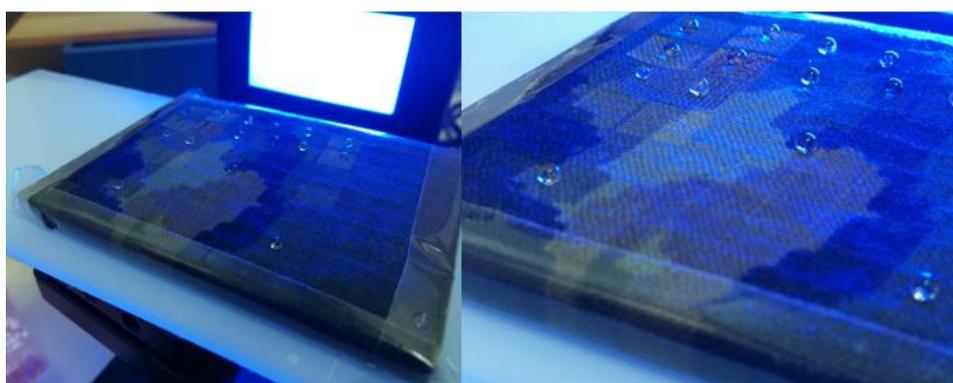


Figura 4-37 Medición de ángulos de contacto para la superficie procesada con el láser UV

Concretamente para los ensayos de texturizado y medición de los ángulos obtenidos con el láser de picosegundos, se aplicaron los mismos parámetros de texturización utilizados en los ensayos físicos del apartado 4.2.1, además de incorporar un área de texturización mayor que el resto (esquina inferior izquierda de la muestra que aparece en la imagen de la derecha de la Figura 4-36).

Para este primer conjunto de ensayos aquellos que mostraron un mejor resultado fueron el ensayo número 19 y 03 para el láser de picosegundos y el ensayo 13 para el láser ultravioleta.

A continuación se relacionan las imágenes de la gota depositada sobre la superficie de los tres ensayos anteriormente citados (Figura 4-38 y Figura 4-39), así como el ángulo de contacto medido en cada uno de ellos (Tabla 4-20) para escoger aquel cuyo valor sea mayor y se aproxime lo máximo posible al mojado omnifóbico recogido en Tabla 2-1 del punto 2.3, en referencia a los tipos de mojado según la amplitud del ángulo de contacto.



Figura 4-38 Ángulos de contacto conseguidos con el láser de picosegundos en el ensayo 03 (derecha) y el ensayo 19 (izquierda)

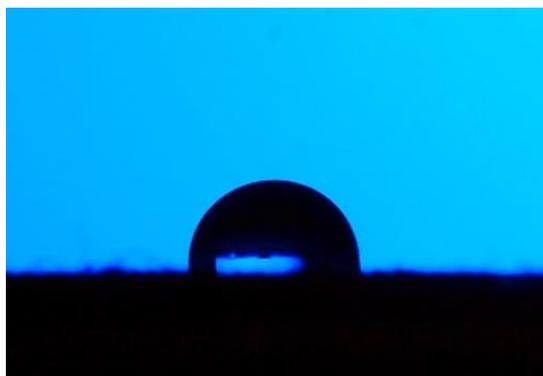


Figura 4-39 Ángulo de contacto conseguido con el láser UV en el ensayo 13

| Láser | Nº Ensayo | Ángulo de contacto | Clasificación |
|--------------|-----------|--------------------|---------------|
| UV | 13 | 93,18 ° | Hidrofóbico |
| Picosegundos | 19 | 87,68 ° | Hidrofílico |
| Picosegundos | 03 | 126,38 ° | Hidrofóbico |

Tabla 4-20 Resultados de las mediciones de ángulos de los ensayos

En relación a los valores obtenidos, el ensayo 03 del láser de picosegundos es el que mayor hidrofobicidad imprime a la tela ya que su ángulo de contacto es el mayor de los tres ensayos que más destacaron en la experimentación de la gota yacente sobre los patrones de texturización efectuados.

No obstante, si analizamos detenidamente la Tabla 4-20, observamos como en el ensayo 19 el ángulo que se obtiene llega a ser hidrofílico ($0 < \Theta < 90^\circ$) con lo cual no solo no se consiguen las mejoras esperadas, sino que se empeora respecto a los resultados alcanzados con los tratamientos químicos, con los que se obtenían ángulos próximos al omnifóbico ($150^\circ < \Theta < 180^\circ$). Asimismo como se destacó anteriormente en otras zonas de texturización no se recoge ningún ángulo característico dado que la gota es absorbida por el tejido tiempo después de ser depositada a pesar de contar con el tratamiento químico del Nikwax, lo cual quiere decir que el tratamiento físico deteriora indudablemente las propiedades hidrofóbicas de la tela, por lo que se desaconseja por completo el uso de esta técnica.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Una vez conocidos los resultados de todos los procesos de ensayo y análisis llevados a cabo a lo largo de este Proyecto de Fin de Grado, en el presente apartado que a continuación se desarrolla, se exponen las conclusiones obtenidas de este estudio, comentando en qué medida se han alcanzado los objetivos propuestos, así como los requisitos que no han podido ser cubiertos y posibles propuestas de mejora para futuros trabajos de investigación relacionados con la implementación de propiedades hidrófugas optimizadas en tejidos.

Asimismo, se dedica un último bloque de líneas futuras para comentar la proyección de las mejoras hidrofóbicas adquiridas y su aprovechamiento en el ámbito operativo de la Infantería de Marina Española.

Por todo lo anteriormente expuesto, las conclusiones extraídas del estudio de la mejora hidrófuga de las propiedades del uniforme de Infantes de Marina son las siguientes:

- La combinación simultánea de técnicas de mejora hidrófuga tanto química como física, queda totalmente desaconsejada, ya que como bien se ha visto a lo largo de los puntos 4.2 y 4.3, la aplicación de métodos físicos ya sean por separado o combinados con métodos químicos, no aporta ninguna mejoría en las propiedades hidrófugas del tejido, al contrario; provocan su degradación y deterioro.
- Además de la pérdida de capacidad hidrofóbica, los tratamientos físicos de micro texturizado láser perjudican otras características fundamentales de la tela tratada. Los procesos de abrasión debidos a la potencia incidente del haz láser pueden quemar por completo el tejido afectado, mientras que en otras ocasiones alteran el color de la tela reduciendo su tonalidad, como es el caso del procesado mediante el láser de CO₂, en detrimento de la mimetización y el camuflaje del uniforme.
- El hecho de que el haz incidente no llegue a romper la tela en la mayoría de ensayos, no implica que este método pueda llegar a ser válido, ya que conlleva el debilitamiento de la fibra textil además de restar cualidades térmicas al tejido, debido a la posible pérdida de calor que será mayor que el tejido original sin ningún tratamiento aplicado.
- Conforme a la parte química de la investigación realizada durante todo este proyecto, se recomienda con total seguridad, el uso de tratamientos químicos hidropelentes, como método más eficaz para combatir el mojado y la pérdida de hidrofobicidad del tejido.
- Respecto al producto concreto que se recomienda como más adecuado y efectivo para el tejido del uniforme de Infantería de Marina, se encuentra el Nikwax que es el tratamiento

químico de los cuatro investigados que mejores propiedades ofrece en cuanto a hidrofobicidad, duración y resistencia del mismo.

- Finalmente se deduce como consecuencia de la elección del Nikwax, que la forma más óptima de aplicar el producto no es pulverizando su contenido como la mayoría de los demás productos, sino diluirlo en agua, dado que de esta manera la tela se impregna en toda su superficie (tanto reverso como anverso), consiguiendo que el consumo y la polimerización de la materia seca se incrementen notablemente frente a los métodos de aplicación clásicos por pulverización.

5.2 Líneas futuras en la Infantería de Marina Española

Como proyección de futuro más evidente para la Infantería de Marina Española, se encuentra la implementación de un tratamiento químico hidrorrepelente capaz de evitar el mojado del uniforme y facilitar la actividad del infante en escenarios adversos de desembarcos anfibios, lluvia y humedad.

Conociendo la efectividad de este tratamiento químico, su línea de futuro más próxima sería extender su uso a todas las unidades de Infantería de Marina, especialmente aquellas desplegadas en el extranjero u operaciones de especial relevancia. Pero la normalización de los tratamientos hidrofóbicos en el uniforme de campaña no es solo una mejora exclusiva aplicable únicamente al cuerpo de Infantería de Marina, sino también al resto de las Fuerzas Armadas y cuerpos de seguridad del Estado que puedan beneficiarse de sus propiedades optimizadas.

Incluso no sería ilógico pensar en una posible línea futura de proyección al exterior, ofreciendo la posibilidad de comercializar un nuevo producto mejorado, tomando como referencia la composición química del Nikwax.

5.3 Propuestas de mejora

En relación a las líneas futuras y como apartado final que culmina con la realización de este Proyecto de Fin de Grado, se sugiere realizar una propuesta de investigación para futuros trabajos relacionados con la mejora hidrofóbica de los materiales textiles.

El proyecto que se propondría tomaría como objetivo principal, continuar con esta línea de investigación pero en este caso centrada únicamente en la mejora hidrofóbica desde el punto de vista químico, pues como bien se ha comprobado los métodos de texturizado y la interacción física del láser con el tejido no aportan resultados significativos, sino que en lugar de ello perjudican la hidrofobicidad de este tejido.

Así pues, se propone analizar de manera profunda y rigurosa la composición química del Nikwax o cualquier otro compuesto similar, con la finalidad de extraer información química de sus componentes y desarrollar un nuevo producto de elaboración propia adaptado expresamente para el tipo de tela específica con la que están confeccionados los uniformes de Infantería de Marina, debiendo por ello analizar también la composición específica de dicho tejido.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Q. T. P. N. Truong, *Military applications: Development of superomniphobic coatings, textiles and surfaces*, Elsevier Ltd., 2018, pp. 473-531.
- [2] G. N. a. D. Zhang, «Intermediate wetting state at nano/microstructured surfaces,» *Royal Society of Chemistry*, pp. 1-8, 18 Febrero 2020.
- [3] Desconocido, «Evaluación de propiedades fisicoquímicas de sustratos,» pp. 87-98.
- [4] I. B. A. R. Pérez, *Desarrollo de un recubrimiento hidrofóbico autolimpiable de SiO₂ @ TiO₂ para preservación de estética y remoción de bioaerosoles*, Santiago de Querétaro, Querétaro, 2018, pp. 14-108.
- [5] F. M. Villa, *Aplicaciones de la nanotecnología en la industria textil*, UNED Master Universitario de Química Inorgánica e Ingeniería Química, 2018, pp. 7-74.
- [6] J. P. Bernabeu, «Nanotecnología y Textil,» 2019.
- [7] J. I. S. Azlor, «Aplicación de nanotecnología en tejidos hidrofóbicos de fácil limpieza y su aplicación,» Huesca, 2011.
- [8] S. P. R. Lema, «Evaluación de las propiedades bactericidas de tejidos impregnados con nanopartículas de plata,» Quito, 2016.
- [9] H. W. A. C. G. J. S. Y. J. H. X. David W. Wei, «Superhydrophobic modification of cellulose and cotton textiles : Methodologies and applications,» Elsevier B.V., 2020.
- [10] J. Castañeda-Contreras, «Fabricación de materiales amorfos y policristalinos con la ruta sol-gel,» *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*, vol. 20, nº 1, pp. 13-15, 20 Enero 2006.
- [11] S. G. C. Javier Francés Vilaplana, «Aplicación de la tecnología de plasma polimerización en sustratos textiles para uso técnico,» *3 Ciencias*, pp. 1-16, 4 Abril 2012.
- [12] G. D. R. V. W. S. Larissa Gómez, «Membranas de PMMA con partículas de grafito,» *Revista Iberoamericana de polímeros*, vol. 21, nº 1, pp. 26-30, Enero 2020.
- [13] F. L. R. J. d. V. G. Pablo Pou Álvarez, «Modificación de superficies mediante microtexturizado basasdo en láser: análisis experimental,» Vigo.

- [14] A. M. J. d. V. e. a. A. Riveiro, «Laser surface texturing of polymers for biomedical applications,» *Frontiers in Physics*, vol. 6, pp. 1-17, 27 Febrero 2018.
- [15] I. F. E. A. P. R. B. T. R. De Rosario, «Effectiveness of a novel consolidant on granite: Laboratory and in situ results. *Construction and Building Materials*,» pp. 49-140, 2015.
- [16] T. R. G. B. J. F. & M. J. M. Iván de Rosario, «Surfactant-Synthesized Consolidants Applied To A Granitic Medieval Necropolis In NW Spain. Laboratory And In Situ Effectiveness Evaluation,» *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 11, nº 8, pp. 1166-1176, 3 Octubre 2017.
- [17] B. T. R. a. B. P. Silva, «Tratamientos de consolidación e hidrofugación aplicados a sustratos graníticos húmedos y contaminados por sales solubles.,» *Materiales De Construcción - MATER CONSTR*, vol. 50, nº 257, pp. 15-31, 30 Marzo 2000.
- [18] J. F. C. Iván de Rosario Amado, *Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos. Técnicas de conservación.*, S. Tórculo Comunicación Gráfica, Ed., Vigo, Pontevedra: Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo, 2016, pp. 13-250.
- [19] «Microscopía electrónica de barrido (SEM), ¿para qué me sirve?,» ATRIA Innovation, 24 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.atriainnovation.com/microscopia-electronica-de-barrido-sem-utilidades/>.
- [20] P. Perez, «Utilización de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y de Transmisión (TEM) para el Análisis de las Pastas Estudiadas,» pp. 1-19, 2011.
- [21] M. e. C. A. I. P. M. Dra. Gladis Labrada Delgado, «Microscópios Electrónicos de Barrido (SEM),» LINAN Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología, [En línea]. Available: http://www.linan-ipicyt.mx/Microscopio_de_Barrido.html.
- [22] N. D. M. Mao, «Waterproof and Water Repellent Textiles and Clothing,» pp. 233-265, 2018.
- [23] ESTIIC, «Aplicaciones industriales de la nanotecnología,» Tresalia Communication, Oviedo, 2017.

ANEXO I: MATERIAL DE LABORATORIO

En este capítulo del Anexo se presenta de manera visual y resumida el material de laboratorio utilizado durante el desarrollo de este trabajo.

- **Báscula analítica Blauscal:** Precisión de $\pm 0,01\text{g}$, peso máximo de 600g, para la medición de pesos de las muestras.



Figura A1-0-1 Báscula analítica Blauscal

- **Vasos de precipitado:** Capacidad 500 ml, para la disolución en agua del Nikwax.



Figura A1-0-2 Vaso de precipitado

- **Pala de disolución:** Para la mezcla de la disolución agua-Nikwax.



Figura A1-0-3 Pala de disolución

- **Micro pipeta Joanlab:** Capacidad de 0,5 – 10 ml, con puntas de plástico desechables, para depositar gotas de 10 ml sobre la superficie en la que se desea medir el ángulo de contacto.



Figura A1-0-4 Micro pipeta

- **Estufa:** Para los ensayos de secado a 60° C de las muestras bañadas en agua salada.



Figura A1-0-5 Estufa de secado

- **Frigorífico:** Para los ensayos de hielo-deshielo de las muestras bañadas en agua dulce en congelador a -30° C.



Figura A1-0-6 Frigorífico con congelador

- **Crisol:** Pieza de vidrio de aproximadamente 13 g, para depositar las muestras durante la aplicación de productos hidrofugantes.



Figura A1-0-7 Crisol

- **Recipiente:** Para la inmersión en agua de las muestras durante la realización de ciclos térmicos.

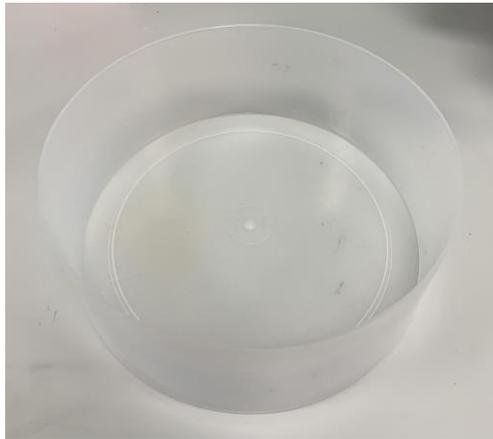


Figura A1-0-8 Recipiente

ANEXO II: TABLAS Y RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

6.1 Consumos 1ª aplicación

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 1ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Tecnadis 9 | 14,06 | 14,96 | 6,40 |
| Tecnadis 10 | 14,55 | 15,63 | 7,42 |
| Tecnadis 11 | 14,02 | 15,08 | 7,56 |
| Tecnadis 12 | 12,67 | 13,82 | 9,08 |
| Tecnadis 13 | 13,42 | 14,4 | 7,30 |
| Tecnadis 14 | 12,96 | 14,23 | 9,80 |
| Tecnadis 15 | 13,28 | 14,21 | 7,00 |
| Tecnadis 16 | 14,41 | 15,53 | 7,77 |
| CONSUMO MEDIO | | | 7,79 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,11 |

Tabla A2-0-1 Consumos iniciales Tecnadis

- **Nasiol:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 1ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Nasiol 25 | 13,5 | 14,2 | 5,19 |
| Nasiol 26 | 14 | 14,87 | 6,21 |
| Nasiol 27 | 14,41 | 15 | 4,09 |
| Nasiol 28 | 13,92 | 14,51 | 4,24 |
| Nasiol 29 | 13,76 | 14,44 | 4,94 |
| Nasiol 30 | 13,66 | 14,27 | 4,47 |
| Nasiol 31 | 15,53 | 16,16 | 4,06 |
| Nasiol 32 | 15,69 | 16,31 | 3,95 |
| CONSUMO MEDIO | | | 4,64 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,77 |

Tabla A2-0-2 Consumos iniciales Nasiol

- **Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS 1ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Hendlex 41 | 15,42 | 16,28 | 5,58 |
| Hendlex 42 | 13,78 | 14,42 | 4,64 |
| Hendlex 43 | 14,35 | 15,23 | 6,13 |
| Hendlex 44 | 13,76 | 14,78 | 7,41 |
| Hendlex 45 | 13,91 | 14,72 | 5,82 |
| Hendlex 46 | 14,28 | 15,13 | 5,95 |
| Hendlex 47 | 13,67 | 14,68 | 7,39 |
| Hendlex 48 | 12,99 | 13,98 | 7,62 |
| CONSUMO MEDIO | | | 6,32 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,06 |

Tabla A2-0-3 Consumos iniciales Hendlex

- **Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS 1ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Nikwax 57 | 14,59 | 15,36 | 5,28 |
| Nikwax 58 | 14,62 | 15,47 | 5,81 |
| Nikwax 59 | 13,27 | 14,03 | 5,73 |
| Nikwax 60 | 14,03 | 14,63 | 4,28 |
| Nikwax 61 | 13,87 | 14,78 | 6,56 |
| Nikwax 62 | 13,98 | 14,74 | 5,44 |
| Nikwax 63 | 13,84 | 14,68 | 6,07 |
| Nikwax 64 | 14 | 14,63 | 4,50 |
| CONSUMO MEDIO | | | 5,46 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,77 |

Tabla A2-0-4 Consumos iniciales Nikwax

6.2 Consumos 2ª aplicación

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS 2ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Tecnadis 9 | 14,09 | 15,06 | 6,88 |
| Tecnadis 10 | 14,59 | 15,61 | 6,99 |
| Tecnadis 11 | 14,08 | 14,81 | 5,18 |
| Tecnadis 12 | 12,72 | 13,75 | 8,10 |
| Tecnadis 13 | 13,47 | 14,35 | 6,53 |
| Tecnadis 14 | 13,02 | 13,92 | 6,91 |
| Tecnadis 15 | 13,32 | 14,21 | 6,68 |
| Tecnadis 16 | 14,44 | 15,37 | 6,44 |
| CONSUMO MEDIO | | | 6,72 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 0,80 |

Tabla A2-0-5 Consumos 2ª aplicación Tecnadis

- **Nasiol:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 2ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Nasiol 25 | 13,55 | 14,12 | 4,21 |
| Nasiol 26 | 14,05 | 14,97 | 6,55 |
| Nasiol 27 | 14,42 | 15,29 | 6,03 |
| Nasiol 28 | 13,93 | 14,54 | 4,38 |
| Nasiol 29 | 13,82 | 14,3 | 3,47 |
| Nasiol 30 | 13,71 | 14,37 | 4,81 |
| Nasiol 31 | 15,58 | 16,07 | 3,15 |
| Nasiol 32 | 15,74 | 16,47 | 4,64 |
| CONSUMO MEDIO | | | 4,65 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 1,16 |

Tabla A0-6 Consumos 2ª aplicación Nasiol

- **Hendlex:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 2ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Hendlex 41 | 15,45 | 16,3 | 5,50 |
| Hendlex 42 | 13,81 | 14,61 | 5,79 |
| Hendlex 43 | 14,39 | 15,09 | 4,86 |
| Hendlex 44 | 13,9 | 14,54 | 4,60 |
| Hendlex 45 | 13,93 | 14,82 | 6,39 |
| Hendlex 46 | 14,31 | 15,11 | 5,59 |
| Hendlex 47 | 13,7 | 14,35 | 4,74 |
| Hendlex 48 | 13,02 | 13,72 | 5,38 |
| CONSUMO MEDIO | | | 5,36 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 0,60 |

Tabla A0-7 Consumos 2ª aplicación Hendlex

- **Nikwax:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 3ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Nikwax 57 | 14,64 | 15,28 | 4,37 |
| Nikwax 58 | 14,68 | 15,37 | 4,70 |
| Nikwax 59 | 13,32 | 13,98 | 4,95 |
| Nikwax 60 | 14,08 | 14,77 | 4,90 |
| Nikwax 61 | 13,93 | 14,55 | 4,45 |
| Nikwax 62 | 14,03 | 14,74 | 5,06 |
| Nikwax 63 | 13,89 | 14,68 | 5,69 |
| Nikwax 64 | 14,06 | 14,6 | 3,84 |
| CONSUMO MEDIO | | | 4,75 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 0,55 |

Tabla A0-8 Consumos 2ª aplicación Nikwax

6.3 Consumos 3ª aplicación

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS 3ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Tecnadis 9 | 14,1 | 14,76 | 4,68 |
| Tecnadis 10 | 14,62 | 14,99 | 2,53 |
| Tecnadis 11 | 14,09 | 14,48 | 2,77 |
| Tecnadis 12 | 12,73 | 13,29 | 4,40 |
| Tecnadis 13 | 13,48 | 14,38 | 6,68 |
| Tecnadis 14 | 13,03 | 13,44 | 3,15 |
| Tecnadis 15 | 13,34 | 13,87 | 3,97 |
| Tecnadis 16 | 14,46 | 14,98 | 3,60 |
| CONSUMO MEDIO | | | 3,97 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 1,33 |

Tabla A2-0-9 Consumos finales Tecnadis

• **Nasiol:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 3ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Nasiol 25 | 13,56 | 14,46 | 6,64 |
| Nasiol 26 | 14,07 | 14,9 | 5,90 |
| Nasiol 27 | 14,45 | 14,83 | 2,63 |
| Nasiol 28 | 13,94 | 14,26 | 2,30 |
| Nasiol 29 | 13,82 | 14,27 | 3,26 |
| Nasiol 30 | 13,72 | 14,09 | 2,70 |
| Nasiol 31 | 15,58 | 15,99 | 2,63 |
| Nasiol 32 | 15,74 | 15,99 | 1,59 |
| CONSUMO MEDIO | | | 3,45 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 1,81 |

Tabla A2-0-10 Consumos finales Nasiol

• **Hendlex:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 3ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Hendlex 41 | 15,46 | 16,15 | 4,46 |
| Hendlex 42 | 13,84 | 14,49 | 4,70 |
| Hendlex 43 | 14,41 | 15,14 | 5,07 |
| Hendlex 44 | 13,79 | 14,67 | 6,38 |
| Hendlex 45 | 13,94 | 14,64 | 5,02 |
| Hendlex 46 | 14,33 | 15,01 | 4,75 |
| Hendlex 47 | 13,72 | 14,46 | 5,39 |
| Hendlex 48 | 13,03 | 13,72 | 5,30 |
| CONSUMO MEDIO | | | 5,13 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 0,59 |

Tabla A2-0-11 Consumos finales Hendlex

• **Nikwax:**

| Nº MUESTRA | PESOS INICIALES | PESOS 3ª APLICACIÓN | CONSUMOS % |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Nikwax 57 | 14,67 | 15,05 | 2,59 |
| Nikwax 58 | 14,7 | 15,39 | 4,69 |
| Nikwax 59 | 13,35 | 13,9 | 4,12 |
| Nikwax 60 | 14,1 | 14,58 | 3,40 |
| Nikwax 61 | 13,96 | 14,47 | 3,65 |
| Nikwax 62 | 14,06 | 14,83 | 5,48 |
| Nikwax 63 | 13,94 | 14,38 | 3,16 |
| Nikwax 64 | 14,07 | 14,7 | 4,48 |
| CONSUMO MEDIO | | | 3,95 % |
| DESVIACIÓN MEDIA | | | ± 0,93 |

Tabla A2-0-12 Consumos finales Nikwax

6.4 Materia seca 1ª aplicación:

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| Tecnadis 9 | 14,06 | 14,09 | 0,21 |
| Tecnadis 10 | 14,55 | 14,59 | 0,27 |
| Tecnadis 11 | 14,02 | 14,08 | 0,43 |
| Tecnadis 12 | 12,67 | 12,72 | 0,39 |
| Tecnadis 13 | 13,42 | 13,47 | 0,37 |
| Tecnadis 14 | 12,96 | 13,02 | 0,46 |
| Tecnadis 15 | 13,28 | 13,32 | 0,30 |
| Tecnadis 16 | 14,41 | 14,44 | 0,21 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,33 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,10 |

Tabla A2-0-13 Materia seca 1ª aplicación de Tecnadis

- **Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| Nasiol 25 | 13,5 | 13,55 | 0,37 |
| Nasiol 26 | 14 | 14,05 | 0,36 |
| Nasiol 27 | 14,41 | 14,42 | 0,07 |
| Nasiol 28 | 13,92 | 13,93 | 0,07 |
| Nasiol 29 | 13,76 | 13,82 | 0,44 |
| Nasiol 30 | 13,66 | 13,71 | 0,37 |
| Nasiol 31 | 15,53 | 15,58 | 0,32 |
| Nasiol 32 | 15,69 | 15,74 | 0,32 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,29 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,14 |

Tabla A2-0-14 Materia seca 1ª aplicación de Nasiol

- **Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|
| Hendlex 41 | 15,42 | 15,45 | 0,19 |
| Hendlex 42 | 13,78 | 13,81 | 0,22 |
| Hendlex 43 | 14,35 | 14,39 | 0,28 |
| Hendlex 44 | 13,76 | 13,9 | 1,02 |
| Hendlex 45 | 13,91 | 13,93 | 0,14 |
| Hendlex 46 | 14,28 | 14,31 | 0,21 |
| Hendlex 47 | 13,67 | 13,7 | 0,22 |
| Hendlex 48 | 12,99 | 13,02 | 0,23 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,31 % |

| | |
|--------------------------|---------------|
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 0,29 |
|--------------------------|---------------|

Tabla A2-0-15 Materia seca 1ª aplicación de Hendlex

- Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Nikwax 57 | 14,59 | 14,64 | 0,34 |
| Nikwax 58 | 14,62 | 14,68 | 0,41 |
| Nikwax 59 | 13,27 | 13,32 | 0,38 |
| Nikwax 60 | 14,03 | 14,08 | 0,36 |
| Nikwax 61 | 13,87 | 13,93 | 0,43 |
| Nikwax 62 | 13,98 | 14,03 | 0,36 |
| Nikwax 63 | 13,84 | 13,89 | 0,36 |
| Nikwax 64 | 14 | 14,06 | 0,43 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,38 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,04 |

Tabla A2-0-16 Materia seca 1ª aplicación de de Nikwax

6.5 Materia seca 2ª aplicación

- Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Tecnadis 9 | 14,09 | 14,1 | 0,07 |
| Tecnadis 10 | 14,59 | 14,62 | 0,21 |
| Tecnadis 11 | 14,08 | 14,09 | 0,07 |
| Tecnadis 12 | 12,72 | 12,73 | 0,08 |
| Tecnadis 13 | 13,47 | 13,48 | 0,07 |
| Tecnadis 14 | 13,02 | 13,03 | 0,08 |
| Tecnadis 15 | 13,32 | 13,34 | 0,15 |
| Tecnadis 16 | 14,44 | 14,46 | 0,14 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,11 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,05 |

Tabla A2-0-17 Materia seca 2ª aplicación Tecnadis

- Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Nasiol 25 | 13,55 | 13,56 | 0,07 |
| Nasiol 26 | 14,05 | 14,07 | 0,14 |
| Nasiol 27 | 14,42 | 14,45 | 0,21 |
| Nasiol 28 | 13,93 | 13,94 | 0,07 |
| Nasiol 29 | 13,82 | 13,82 | 0,00 |
| Nasiol 30 | 13,71 | 13,72 | 0,07 |

| | | | |
|---------------------------|-------|-------|---------------|
| Nasiol 31 | 15,58 | 15,58 | 0,00 |
| Nasiol 32 | 15,74 | 15,74 | 0,00 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,07 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,07 |

Tabla A2-0-18 Materia seca 2ª aplicación Nasiol

- **Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Hendlex 41 | 15,45 | 15,46 | 0,06 |
| Hendlex 42 | 13,81 | 13,84 | 0,22 |
| Hendlex 43 | 14,39 | 14,41 | 0,14 |
| Hendlex 44 | 13,9 | 13,95 | 0,36 |
| Hendlex 45 | 13,93 | 13,94 | 0,07 |
| Hendlex 46 | 14,31 | 14,33 | 0,14 |
| Hendlex 47 | 13,7 | 13,72 | 0,15 |
| Hendlex 48 | 13,02 | 13,03 | 0,08 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,15 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,10 |

Tabla A2-0-19 Materia seca 2ª aplicación Hendlex

- **Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 2ª APLICACIÓN | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| Nikwax 57 | 14,64 | 14,67 | 0,20 |
| Nikwax 58 | 14,68 | 14,7 | 0,14 |
| Nikwax 59 | 13,32 | 13,35 | 0,23 |
| Nikwax 60 | 14,08 | 14,1 | 0,14 |
| Nikwax 61 | 13,93 | 13,96 | 0,22 |
| Nikwax 62 | 14,03 | 14,06 | 0,21 |
| Nikwax 63 | 13,89 | 13,94 | 0,36 |
| Nikwax 64 | 14,06 | 14,07 | 0,07 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,20 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,09 |

Tabla A2-0-20 Materia seca 2ª aplicación Nikwax

6.6 Materia seca 3ª aplicación

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|-------------|-------------------------------|---------------|----------------|
| Tecnadis 9 | 14,1 | 14,13 | 0,21 |
| Tecnadis 10 | 14,62 | 14,63 | 0,07 |
| Tecnadis 11 | 14,09 | 14,09 | 0,00 |

| | | | |
|---|-------|-------|--------------------------|
| Tecnadis 12 | 12,73 | 12,75 | 0,16 |
| Tecnadis 13 | 13,48 | 13,5 | 0,15 |
| Tecnadis 14 | 13,03 | 13,05 | 0,15 |
| Tecnadis 15 | 13,34 | 13,35 | 0,07 |
| Tecnadis 16 | 14,46 | 14,47 | 0,07 |
| MATERIA SECA MEDIA DESVIACIÓN TÍPICA | | | 0,11 % ± 0,07 |

Tabla A2-0-21 Materia seca 3ª aplicación Tecnadis

- **Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|---|--------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Nasiol 25 | 13,56 | 13,56 | 0,00 |
| Nasiol 26 | 14,07 | 14,07 | 0,00 |
| Nasiol 27 | 14,45 | 14,45 | 0,00 |
| Nasiol 28 | 13,94 | 13,94 | 0,00 |
| Nasiol 29 | 13,82 | 13,84 | 0,14 |
| Nasiol 30 | 13,72 | 13,73 | 0,07 |
| Nasiol 31 | 15,58 | 15,59 | 0,06 |
| Nasiol 32 | 15,74 | 15,76 | 0,13 |
| MATERIA SECA MEDIA DESVIACIÓN TÍPICA | | | 0,05 % ± 0,06 |

Tabla A2-0-22 Materia seca 3ª aplicación Nasiol

- **Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|---|--------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Hendlex 41 | 15,46 | 15,48 | 0,13 |
| Hendlex 42 | 13,84 | 13,84 | 0,00 |
| Hendlex 43 | 14,41 | 14,43 | 0,14 |
| Hendlex 44 | 13,95 | 13,97 | 0,14 |
| Hendlex 45 | 13,94 | 13,96 | 0,14 |
| Hendlex 46 | 14,33 | 14,34 | 0,07 |
| Hendlex 47 | 13,72 | 13,74 | 0,15 |
| Hendlex 48 | 13,03 | 13,06 | 0,23 |
| MATERIA SECA MEDIA DESVIACIÓN TÍPICA | | | 0,13 % ± 0,07 |

Tabla A2-0-23 Materia seca 3ª aplicación Hendlex

- **Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES 3ª APLICACIÓN | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Nikwax 57 | 14,67 | 14,69 | 0,14 |

| | | | |
|---------------------------|-------|-------|---------------|
| Nikwax 58 | 14,7 | 14,73 | 0,20 |
| Nikwax 59 | 13,35 | 13,37 | 0,15 |
| Nikwax 60 | 14,1 | 14,12 | 0,14 |
| Nikwax 61 | 13,96 | 13,99 | 0,21 |
| Nikwax 62 | 14,06 | 14,1 | 0,28 |
| Nikwax 63 | 13,94 | 13,95 | 0,07 |
| Nikwax 64 | 14,07 | 14,11 | 0,28 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,19 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,07 |

Tabla A2-0-24 Materia seca 3ª aplicación Nikwax

6.7 Materia seca global

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|---------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| Tecnadis 9 | 14,06 | 14,13 | 0,50 |
| Tecnadis 10 | 14,55 | 14,63 | 0,55 |
| Tecnadis 11 | 14,02 | 14,09 | 0,50 |
| Tecnadis 12 | 12,67 | 12,75 | 0,63 |
| Tecnadis 13 | 13,42 | 13,5 | 0,60 |
| Tecnadis 14 | 12,96 | 13,05 | 0,69 |
| Tecnadis 15 | 13,28 | 13,35 | 0,53 |
| Tecnadis 16 | 14,41 | 14,47 | 0,42 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,55 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,09 |

Tabla A2-0-25 Materia seca global del Tecnadis

- **Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|---------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| Nasiol 25 | 13,5 | 13,56 | 0,44 |
| Nasiol 26 | 14 | 14,07 | 0,50 |
| Nasiol 27 | 14,41 | 14,45 | 0,28 |
| Nasiol 28 | 13,92 | 13,94 | 0,14 |
| Nasiol 29 | 13,76 | 13,84 | 0,58 |
| Nasiol 30 | 13,66 | 13,73 | 0,51 |
| Nasiol 31 | 15,53 | 15,59 | 0,39 |
| Nasiol 32 | 15,69 | 15,76 | 0,45 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,41 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,14 |

Tabla A2-0-26 Materia seca global del Nasiol

• **Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-----------------|---------------|----------------|
| Hendlex 41 | 15,42 | 15,48 | 0,39 |
| Hendlex 42 | 13,78 | 13,84 | 0,44 |
| Hendlex 43 | 14,35 | 14,43 | 0,56 |
| Hendlex 44 | 13,76 | 13,97 | 1,53 |
| Hendlex 45 | 13,91 | 13,96 | 0,36 |
| Hendlex 46 | 14,28 | 14,34 | 0,42 |
| Hendlex 47 | 13,67 | 13,74 | 0,51 |
| Hendlex 48 | 12,99 | 13,06 | 0,54 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,59 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,38 |

Tabla A2-0-27 Materia seca global del Hendlex

• **Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | PESOS INICIALES | PESOS FINALES | MATERIA SECA % |
|---------------------------|-----------------|---------------|----------------|
| Nikwax 57 | 14,59 | 14,69 | 0,69 |
| Nikwax 58 | 14,62 | 14,73 | 0,75 |
| Nikwax 59 | 13,27 | 13,37 | 0,75 |
| Nikwax 60 | 14,03 | 14,12 | 0,64 |
| Nikwax 61 | 13,87 | 13,99 | 0,87 |
| Nikwax 62 | 13,98 | 14,1 | 0,86 |
| Nikwax 63 | 13,84 | 13,95 | 0,79 |
| Nikwax 64 | 14 | 14,11 | 0,79 |
| MATERIA SECA MEDIA | | | 0,77 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,08 |

Tabla A2-0-28 Materia seca global del Nikwax

6.8 Grados de Polimerización 1ª aplicación

• **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 1ª APLICACIÓN | M. SECA 1ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Tecnadis 9 | 6,4 | 0,21 | 3,28 |
| Tecnadis 10 | 7,42 | 0,27 | 3,64 |
| Tecnadis 11 | 7,56 | 0,43 | 5,69 |
| Tecnadis 12 | 9,08 | 0,39 | 4,30 |
| Tecnadis 13 | 7,3 | 0,37 | 5,07 |
| Tecnadis 14 | 9,8 | 0,46 | 4,69 |
| Tecnadis 15 | 7 | 0,3 | 4,29 |
| Tecnadis 16 | 7,77 | 0,21 | 2,70 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 4,21 % |

| | |
|--------------------------|---------------|
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 0,97 |
|--------------------------|---------------|

Tabla A2-0-29 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Tecnadis

- Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 1ª APLICACIÓN | M. SECA 1ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Nasiol 25 | 5,19 | 0,37 | 7,13 |
| Nasiol 26 | 6,21 | 0,36 | 5,80 |
| Nasiol 27 | 4,09 | 0,07 | 1,71 |
| Nasiol 28 | 4,24 | 0,07 | 1,65 |
| Nasiol 29 | 4,94 | 0,44 | 8,91 |
| Nasiol 30 | 4,47 | 0,37 | 8,28 |
| Nasiol 31 | 4,06 | 0,32 | 7,88 |
| Nasiol 32 | 3,95 | 0,32 | 8,10 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 6,18 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 2,93 |

Tabla A2-0-30 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Nasiol

- Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 1ª APLICACIÓN | M. SECA 1ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Hendlex 41 | 5,58 | 0,19 | 3,41 |
| Hendlex 42 | 4,64 | 0,22 | 4,74 |
| Hendlex 43 | 6,13 | 0,28 | 4,57 |
| Hendlex 44 | 7,41 | 1,02 | 13,77 |
| Hendlex 45 | 5,82 | 0,14 | 2,41 |
| Hendlex 46 | 5,95 | 0,21 | 3,53 |
| Hendlex 47 | 7,39 | 0,22 | 2,98 |
| Hendlex 48 | 7,62 | 0,23 | 3,02 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 4,80 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 3,71 |

Tabla A2-0-31 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Hendlex

- Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 1ª APLICACIÓN | M. SECA 1ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Nikwax 57 | 5,28 | 0,34 | 6,44 |
| Nikwax 58 | 5,81 | 0,41 | 7,06 |
| Nikwax 59 | 5,73 | 0,38 | 6,63 |
| Nikwax 60 | 4,28 | 0,36 | 8,41 |
| Nikwax 61 | 6,56 | 0,43 | 6,55 |
| Nikwax 62 | 5,44 | 0,36 | 6,62 |
| Nikwax 63 | 6,07 | 0,36 | 5,93 |
| Nikwax 64 | 4,5 | 0,43 | 9,56 |

| | |
|--------------------------------------|---------------|
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | 7,15 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 1,21 |

Tabla A2-0-32 Grado de Polimerización 1ª aplicación del Nikwax

6.9 Grados de Polimerización 2ª aplicación

- Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 2ª APLICACIÓN | M. SECA 2ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Tecnadis 9 | 6,88 | 0,07 | 1,02 |
| Tecnadis 10 | 6,99 | 0,21 | 3,00 |
| Tecnadis 11 | 5,18 | 0,07 | 1,35 |
| Tecnadis 12 | 8,1 | 0,08 | 0,99 |
| Tecnadis 13 | 6,53 | 0,07 | 1,07 |
| Tecnadis 14 | 6,91 | 0,08 | 1,16 |
| Tecnadis 15 | 6,68 | 0,15 | 2,25 |
| Tecnadis 16 | 6,44 | 0,14 | 2,17 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 1,63 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 0,75 |

Tabla A2-0-33 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Tecnadis

- Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 2ª APLICACIÓN | M. SECA 2ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Nasiol 25 | 4,21 | 0,07 | 1,66 |
| Nasiol 26 | 6,55 | 0,14 | 2,14 |
| Nasiol 27 | 6,03 | 0,21 | 3,48 |
| Nasiol 28 | 4,38 | 0,07 | 1,60 |
| Nasiol 29 | 3,47 | 0 | 0,00 |
| Nasiol 30 | 4,81 | 0,07 | 1,46 |
| Nasiol 31 | 3,15 | 0 | 0,00 |
| Nasiol 32 | 4,64 | 0 | 0,00 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 1,29 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,24 |

Tabla A2-0-34 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Nasiol

- Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 2ª APLICACIÓN | M. SECA 2ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Hendlex 41 | 5,5 | 0,06 | 1,09 |
| Hendlex 42 | 5,79 | 0,22 | 3,80 |
| Hendlex 43 | 4,86 | 0,14 | 2,88 |
| Hendlex 44 | 4,6 | 0,36 | 7,83 |
| Hendlex 45 | 6,39 | 0,07 | 1,10 |

| | | | |
|--------------------------------------|------|------|---------------|
| Hendlex 46 | 5,59 | 0,14 | 2,50 |
| Hendlex 47 | 4,74 | 0,15 | 3,16 |
| Hendlex 48 | 5,38 | 0,08 | 1,49 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 2,98 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 2,20 |

Tabla A2-0-35 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Hendlex

- **Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 2ª APLICACIÓN | M. SECA 2ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Nikwax 57 | 4,37 | 0,2 | 4,58 |
| Nikwax 58 | 4,7 | 0,14 | 2,98 |
| Nikwax 59 | 4,95 | 0,23 | 4,65 |
| Nikwax 60 | 4,9 | 0,14 | 2,86 |
| Nikwax 61 | 4,45 | 0,22 | 4,94 |
| Nikwax 62 | 5,06 | 0,21 | 4,15 |
| Nikwax 63 | 5,69 | 0,36 | 6,33 |
| Nikwax 64 | 3,84 | 0,07 | 1,82 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 4,04 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,42 |

Tabla A2-0-36 Grado de Polimerización 2ª aplicación del Hendlex

6.10 Grados de Polimerización 3ª aplicación

- **Tecnadis Coatex:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 3ª APLICACIÓN | M. SECA 3ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Tecnadis 9 | 4,68 | 0,21 | 4,49 |
| Tecnadis 10 | 2,53 | 0,07 | 2,77 |
| Tecnadis 11 | 2,77 | 0 | 0,00 |
| Tecnadis 12 | 4,4 | 0,16 | 3,64 |
| Tecnadis 13 | 6,68 | 0,15 | 2,25 |
| Tecnadis 14 | 3,15 | 0,15 | 4,76 |
| Tecnadis 15 | 3,97 | 0,07 | 1,76 |
| Tecnadis 16 | 3,6 | 0,07 | 1,94 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 2,70 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,57 |

Tabla A2-0-37 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Tecnadis

- **Nasiol:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 3ª APLICACIÓN | M. SECA 3ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|-------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Nasiol 25 | 6,64 | 0 | 0,00 |
| Nasiol 26 | 5,9 | 0 | 0,00 |

| | | | |
|--------------------------------------|------|------|---------------|
| Nasiol 27 | 2,63 | 0 | 0,00 |
| Nasiol 28 | 2,3 | 0 | 0,00 |
| Nasiol 29 | 3,26 | 0,14 | 4,29 |
| Nasiol 30 | 2,7 | 0,07 | 2,59 |
| Nasiol 31 | 2,63 | 0,06 | 2,28 |
| Nasiol 32 | 1,59 | 0,13 | 8,18 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 2,17 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 2,92 |

Tabla A2-0-38 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Nasiol

• **Hendlex:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 3ª APLICACIÓN | M. SECA 3ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Hendlex 41 | 4,46 | 0,13 | 2,91 |
| Hendlex 42 | 4,7 | 0 | 0,00 |
| Hendlex 43 | 5,07 | 0,14 | 2,76 |
| Hendlex 44 | 6,38 | 0,14 | 2,19 |
| Hendlex 45 | 5,02 | 0,14 | 2,79 |
| Hendlex 46 | 4,75 | 0,07 | 1,47 |
| Hendlex 47 | 5,39 | 0,15 | 2,78 |
| Hendlex 48 | 5,3 | 0,23 | 4,34 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 2,41 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,26 |

Tabla A2-0-39 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Hendlex

• **Nikwax:**

| Nº MUESTRAS | CONSUMO 3ª APLICACIÓN | M. SECA 3ª APLICACIÓN | GRADO DE POLIMERIZACIÓN % |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Nikwax 57 | 2,59 | 0,14 | 5,41 |
| Nikwax 58 | 4,69 | 0,2 | 4,26 |
| Nikwax 59 | 4,12 | 0,15 | 3,64 |
| Nikwax 60 | 3,4 | 0,14 | 4,12 |
| Nikwax 61 | 3,65 | 0,21 | 5,75 |
| Nikwax 62 | 5,48 | 0,28 | 5,11 |
| Nikwax 63 | 3,16 | 0,07 | 2,22 |
| Nikwax 64 | 4,48 | 0,28 | 6,25 |
| GRADO DE POLIMERIZACIÓN MEDIO | | | 4,59 % |
| DESVIACIÓN TÍPICA | | | ± 1,30 |

Tabla A2-0-40 Grado de Polimerización 3ª aplicación del Nikwax

6.11 Ángulos de contacto

• 1ª Aplicación:

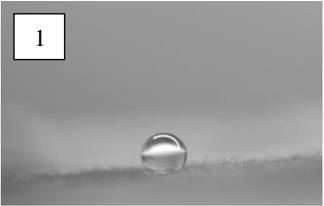
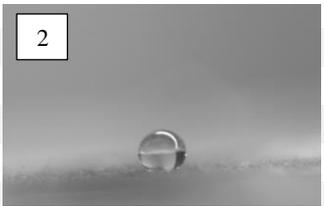
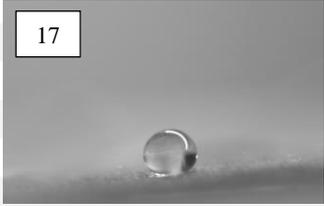
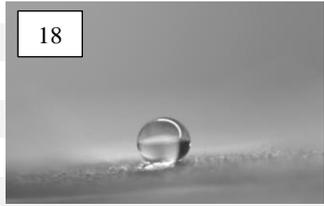
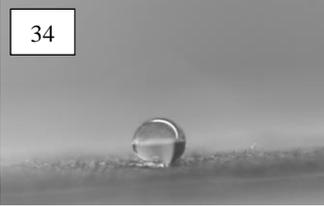
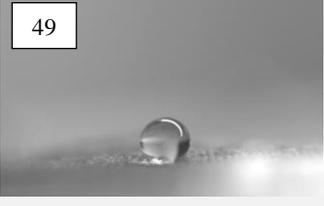
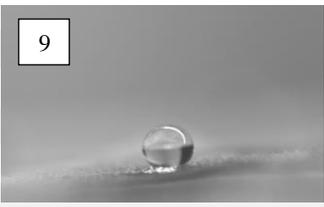
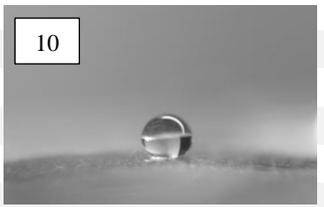
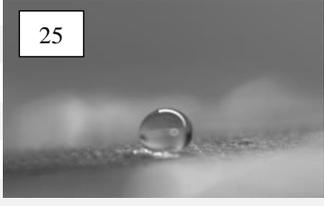
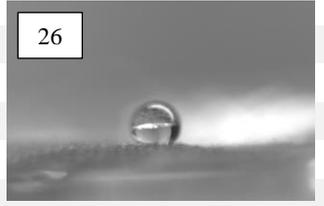
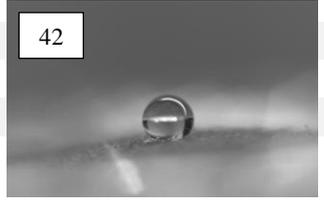
| Nº MUESTRA | ÁNGULO | IMÁGENES | |
|-------------------|----------------|--|---|
| Tecnadis 1 | 129,27° |  |  |
| Tecnadis 2 | 137,60° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 133,44° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 5,89 | | |
| Nasiol 17 | 140,55° |  |  |
| Nasiol 18 | 144,31° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 142,43° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 2,66 | | |
| Hendlex 33 | 136,80° |  |  |
| Hendlex 34 | 141,54° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 139,17° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 3,35 | | |
| Nikwax 49 | 144,97° |  |  |
| Nikwax 50 | 144,71° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 145,34° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 0,52 | | |

Tabla A2-0-41 Resultados de los ángulos de contacto de la 1ª aplicación

• 2ª y 3ª Aplicación:

| Nº MUESTRA | ÁNGULO | IMÁGENES | |
|-------------------|----------------|--|---|
| Tecnadis 9 | 143,90° |  |  |
| Tecnadis 10 | 148,11° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 146,01° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 2,98 | | |
| Nasiol 25 | 137,40° |  |  |
| Nasiol 26 | 135,65° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 136,53° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 1,24 | | |
| Hendlex 41 | 139,59° |  |  |
| Hendlex 42 | 138,91° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 139,25° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 0,34 | | |

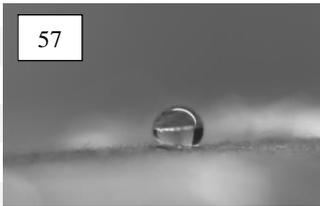
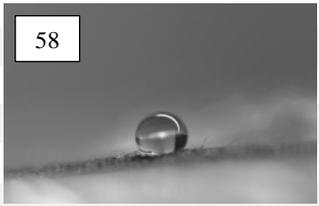
| | | | |
|-------------------|----------------|--|---|
| DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 0,48$ | | |
| Nikwax 57 | 135,63° |  |  |
| Nikwax 58 | 135,39° | | |
| ÁNGULO MEDIO | 135,51° | | |
| DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 0,17$ | | |

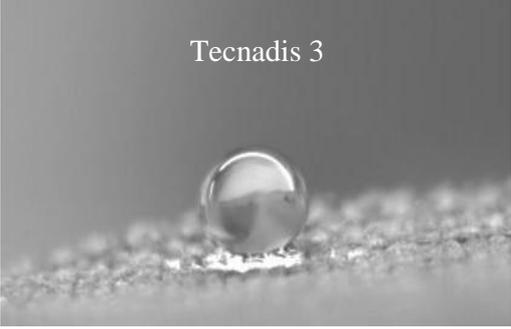
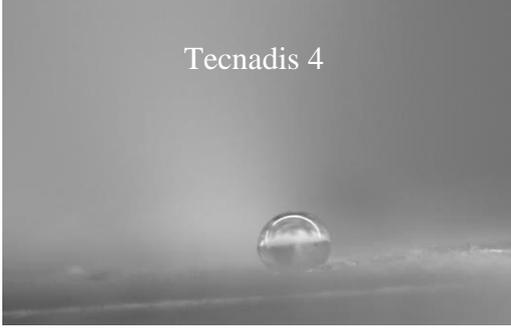
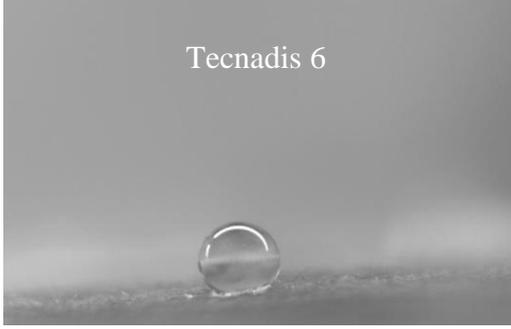
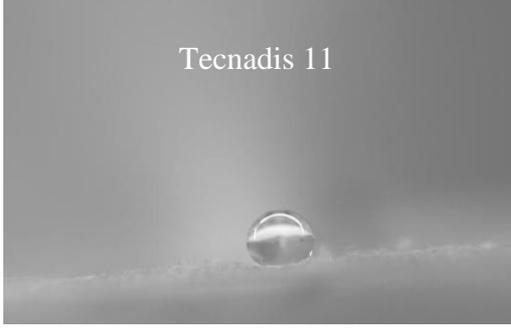
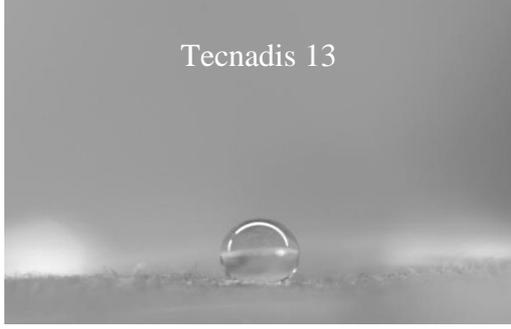
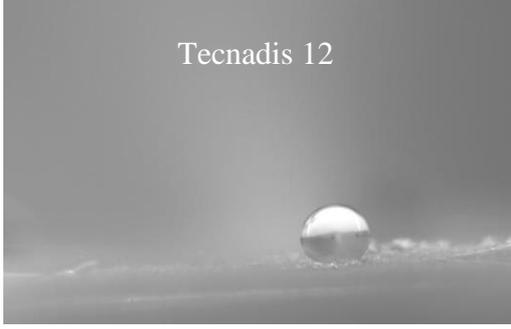
Tabla A2-0-42 Resultados de los ángulos de contacto de la 2ª y 3ª aplicación

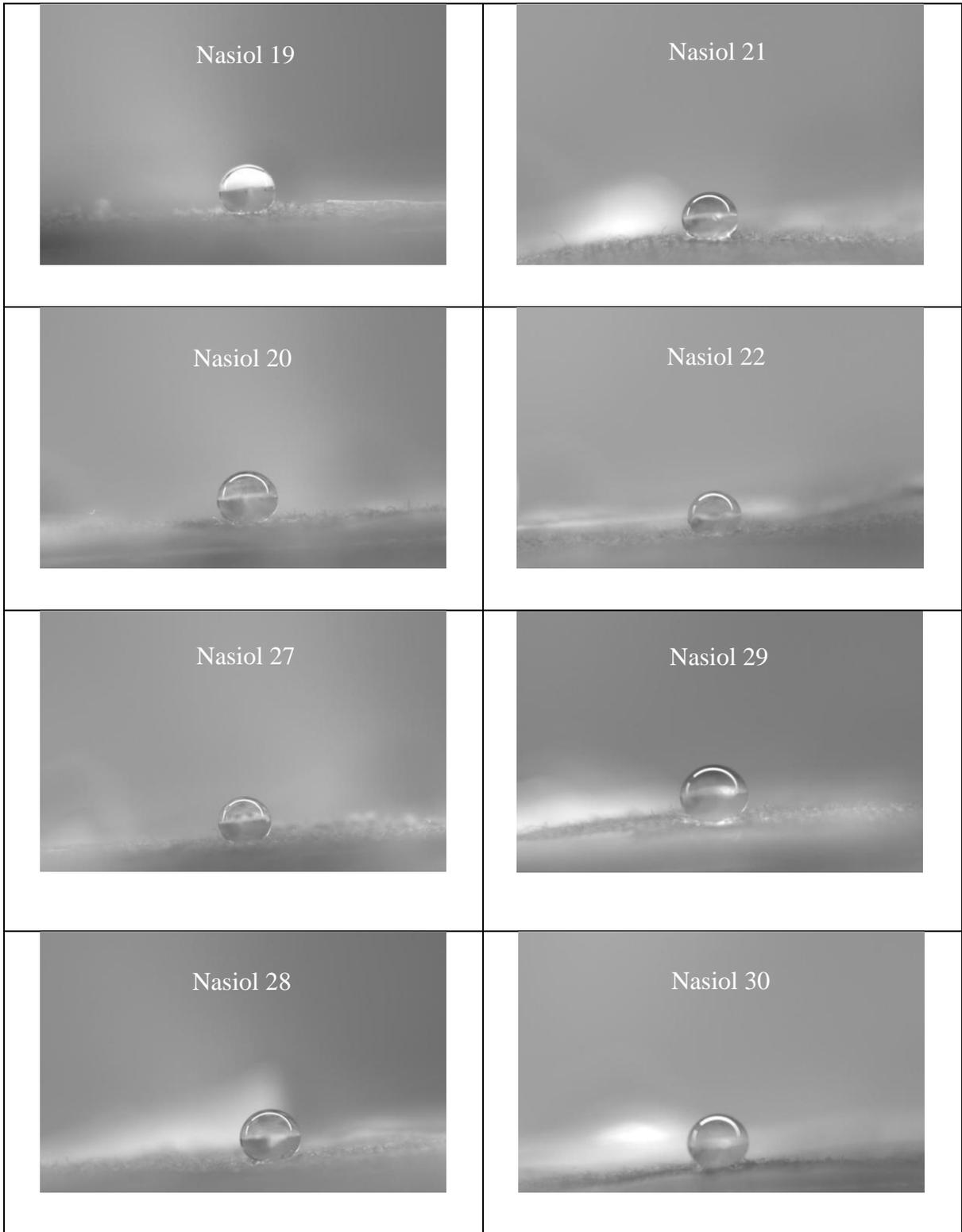
6.12 Ciclos térmicos

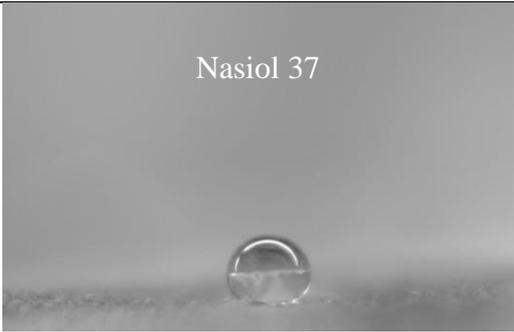
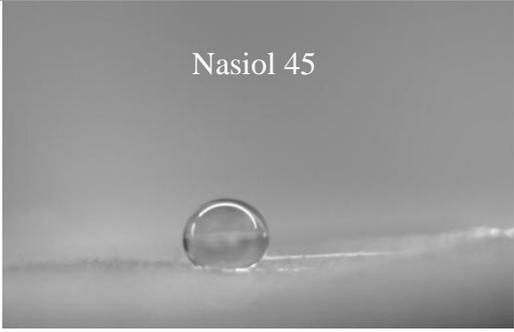
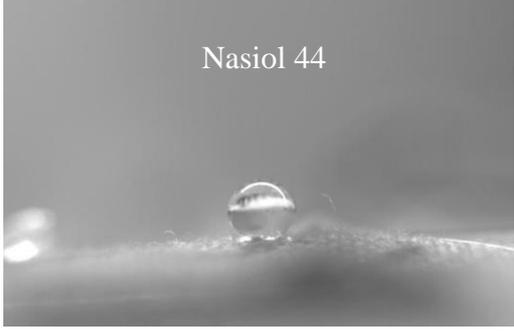
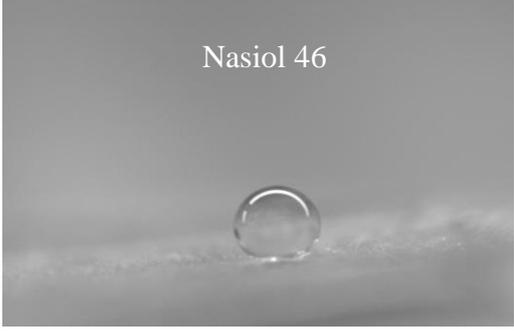
- **Primer ensayo (5 primeros ciclos):**

| SALES | | HIELO-DESHELO | |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------|
| Nº MUESTRA | ÁNGULO | Nº MUESTRA | ÁNGULO |
| Tecnadis 3 | 138,36° | Tecnadis 5 | 121,77° |
| Tecnadis 4 | 119,99° | Tecnadis 6 | 132,23° |
| Tecnadis 11 | 127,56° | Tecnadis 13 | 126,57° |
| Tecnadis 12 | 143,18° | Tecnadis 14 | 125,94° |
| ÁNGULO MEDIO | 132,27° | ÁNGULO MEDIO | 126,63° |
| DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 10,47$ | DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 4,30$ |
| Nasiol 19 | 124,55° ¹ | Nasiol 21 | 136,87° |
| Nasiol 20 | 119,08° | Nasiol 22 | 128,48° |
| Nasiol 27 | 135,57° | Nasiol 29 | 126,17° |
| Nasiol 28 | 120,94° | Nasiol 30 | 127,99° |
| ÁNGULO MEDIO | 125,03° | ÁNGULO MEDIO | 129,88° |
| DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 7,38$ | DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 4,76$ |
| Hendlex 35 | 118,76° | Hendlex 37 | 142,45° |
| Hendlex 36 | 129,87° | Hendlex 38 | 137,23° |
| Hendlex 43 | 124,62° | Hendlex 45 | 140,84° |
| Hendlex 44 | 141,57° | Hendlex 46 | 139,27° |
| ÁNGULO MEDIO | 128,70° | ÁNGULO MEDIO | 139,95° |
| DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 9,71$ | DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 2,23$ |
| Nikwax 51 | 148,00° | Nikwax 53 | 143,80° |
| Nikwax 52 | 145,14° | Nikwax 54 | 137,39° |
| Nikwax 59 | 147,10° | Nikwax 61 | 123,33° |
| Nikwax 60 | 146,00° | Nikwax 62 | 125,36° |
| ÁNGULO MEDIO | 146,56° | ÁNGULO MEDIO | 132,47° |
| DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 1,25$ | DESVIACIÓN TÍPICA | $\pm 9,78$ |

Tabla A2-0-43 Resultados de los ángulos de contacto de los primeros 5 ciclos

| SALES | HIELO-DESHIELO |
|--|---|
| Tecnadis | |
| <p data-bbox="443 331 577 362" style="text-align: center;">Tecnadis 3</p>  | <p data-bbox="1043 331 1177 362" style="text-align: center;">Tecnadis 5</p>  |
| <p data-bbox="437 723 584 754" style="text-align: center;">Tecnadis 4</p>  | <p data-bbox="1037 723 1184 754" style="text-align: center;">Tecnadis 6</p>  |
| <p data-bbox="430 1106 590 1137" style="text-align: center;">Tecnadis 11</p>  | <p data-bbox="1031 1106 1190 1137" style="text-align: center;">Tecnadis 13</p>  |
| <p data-bbox="427 1489 593 1520" style="text-align: center;">Tecnadis 12</p>  | <p data-bbox="1034 1489 1187 1520" style="text-align: center;">Tecnadis 14</p>  |
| Nasiol | |



| Hendlex | |
|--|---|
| <p>Nasiol 35</p>  | <p>Nasiol 37</p>  |
| <p>Nasiol 36</p>  | <p>Nasiol 38</p>  |
| <p>Nasiol 43</p>  | <p>Nasiol 45</p>  |
| <p>Nasiol 44</p>  | <p>Nasiol 46</p>  |

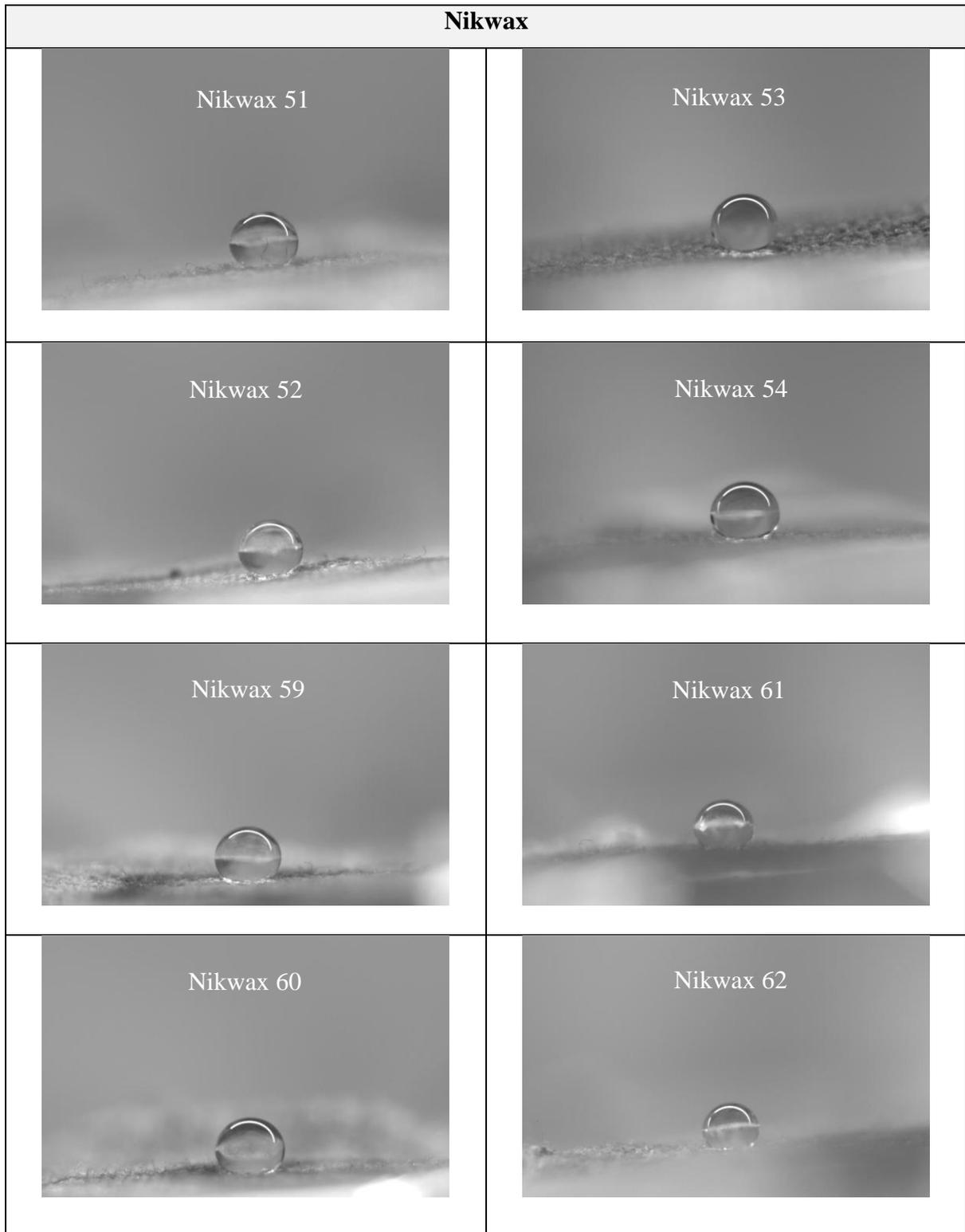


Tabla A2-0-44 Imágenes ángulo de contacto primer ensayo térmico

| SALES PRIMER ENSAYO | | HIELO-DESHIELO PRIMER ENSAYO | |
|---------------------|-------|------------------------------|-----------------|
| MUESTRAS | PESOS | MUESTRAS | PESOS INICIALES |
| Tecnadis 3 | 0,54 | Tecnadis 5 | 0,52 |
| Tecnadis 4 | 0,54 | Tecnadis 6 | 0,51 |
| Tecnadis 11 | 0,59 | Tecnadis 13 | 0,55 |
| Tecnadis 12 | 0,59 | Tecnadis 14 | 0,53 |

| | | | |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| PESOS MEDIOS | 0,57 | PESOS MEDIOS | 0,53 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,03 | DESV. TÍPICA | ± 0,02 |
| Nasiol 19 | 0,51 | Nasiol 21 | 0,44 |
| Nasiol 20 | 0,45 | Nasiol 22 | 0,43 |
| Nasiol 27 | 0,47 | Nasiol 29 | 0,43 |
| Nasiol 28 | 0,45 | Nasiol 30 | 0,47 |
| PESOS MEDIOS | 0,47 | PESOS MEDIOS | 0,44 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,03 | DESV. TÍPICA | ± 0,02 |
| Henclex 35 | 0,36 | Henclex 37 | 0,4 |
| Henclex 36 | 0,38 | Henclex 38 | 0,34 |
| Henclex 43 | 0,44 | Henclex 45 | 0,45 |
| Henclex 44 | 0,44 | Henclex 46 | 0,43 |
| PESOS MEDIOS | 0,41 | PESOS MEDIOS | 0,40 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,04 | DESV. TÍPICA | ± 0,05 |
| Nikwax 51 | 0,48 | Nikwax 53 | 0,41 |
| Nikwax 52 | 0,44 | Nikwax 54 | 0,4 |
| Nikwax 59 | 0,45 | Nikwax 61 | 0,49 |
| Nikwax 60 | 0,42 | Nikwax 62 | 0,51 |
| PESOS MEDIOS | 0,45 | PESOS MEDIOS | 0,45 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,03 | DESV. TÍPICA | ± 0,06 |

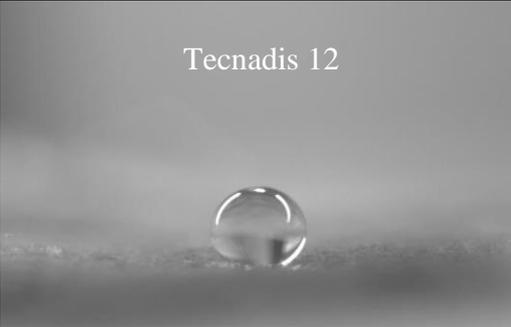
Tabla A2-0-45 Pesos después del primer ensayo de sales y hielo-deshielo

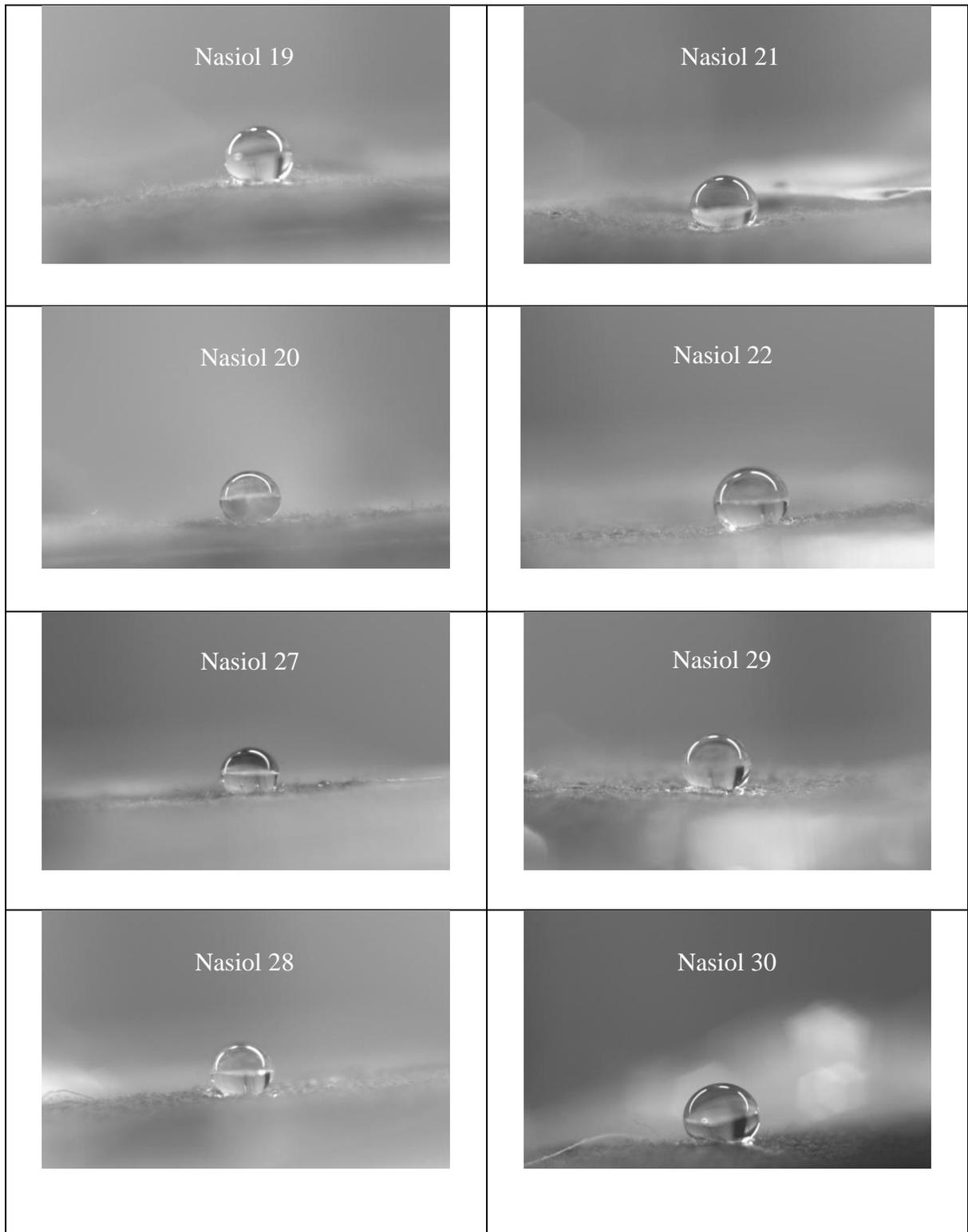
- Segundo ensayo (5 últimos ciclos):

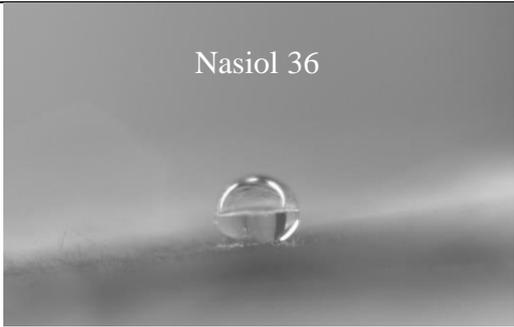
| SALES | | HIELO-DESHIELO | |
|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
| Nº MUESTRA | ÁNGULO | Nº MUESTRA | ÁNGULO |
| Tecnadis 3 | 135º | Tecnadis 5 | 136,31º |
| Tecnadis 4 | 140,82º | Tecnadis 6 | 139,42º |
| Tecnadis 11 | 130,3º | Tecnadis 13 | 138,96º |
| Tecnadis 12 | 134,65º | Tecnadis 14 | 140,17º |
| ÁNGULO MEDIO | 135,19º | ÁNGULO MEDIO | 138,72º |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 4,32 | DESVIACIÓN TÍPICA | ± 1,68 |
| Nasiol 19 | 133,58º | Nasiol 21 | 131,48º |
| Nasiol 20 | 132,68º | Nasiol 22 | 133,48º |
| Nasiol 27 | 132,58º | Nasiol 29 | 138,06º |
| Nasiol 28 | 131,15º | Nasiol 30 | 136,39º |
| ÁNGULO MEDIO | 132,50º | ÁNGULO MEDIO | 134,85º |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 1,00 | DESVIACIÓN TÍPICA | ± 2,94 |
| Hendlex 35 | 132,95º | Hendlex 37 | 134,37º |
| Hendlex 36 | 138,81º | Hendlex 38 | 135,41º |
| Hendlex 43 | 133,42º | Hendlex 45 | 144,55º |
| Hendlex 44 | 144,68º | Hendlex 46 | 143,11º |
| ÁNGULO MEDIO | 137,47º | ÁNGULO MEDIO | 139,36º |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 5,49 | DESVIACIÓN TÍPICA | ± 6,55 |
| Nikwax 51 | 145,40º | Nikwax 53 | 138,89º |
| Nikwax 52 | 137,02º | Nikwax 54 | 141,36º |
| Nikwax 59 | 143º | Nikwax 61 | 140,25º |

| | | | |
|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
| Nikwax 60 | 144,64° | Nikwax 62 | 130,74° |
| ÁNGULO MEDIO | 142,52° | ÁNGULO MEDIO | 137,81° |
| DESVIACIÓN TÍPICA | ± 3,80 | DESVIACIÓN TÍPICA | ± 4,82 |

Tabla A2-0-46 Resultados de los ángulos de contacto de los últimos 10 ciclos

| SALES | HIELO-DESHIELO |
|--|---|
| Tecnadis | |
| Tecnadis 3  | Tecnadis 5  |
| Tecnadis 4  | Tecnadis 6  |
| Tecnadis 11  | Tecnadis 13  |
| Tecnadis 12  | Tecnadis 14  |
| Nasiol | |



| Hendlex | |
|--|---|
| <p>Nasiol 35</p>  | <p>Nasiol 37</p>  |
| <p>Nasiol 36</p>  | <p>Nasiol 38</p>  |
| <p>Nasiol 43</p>  | <p>Nasiol 45</p>  |
| <p>Nasiol 44</p>  | <p>Nasiol 46</p>  |

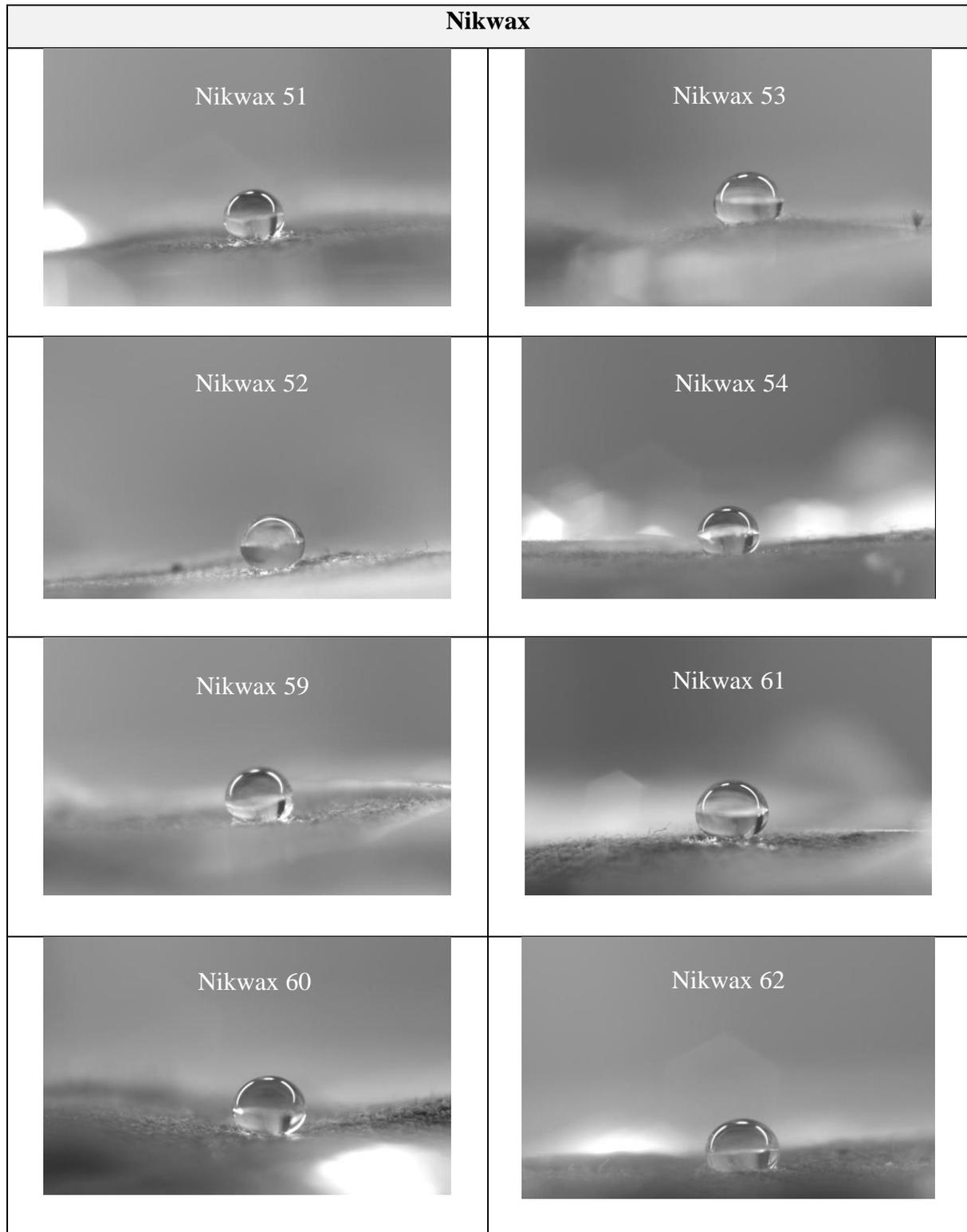


Tabla A2-0-47 Imágenes ángulo de contacto segundo ensayo térmico

| SALES SEGUNDO ENSAYO | | HIELO-DESHIELO SEGUNDO ENSAYO | |
|----------------------|-------|-------------------------------|-------|
| MUESTRAS | PESOS | MUESTRAS | PESOS |
| Tecnadis 3 | 0,53 | Tecnadis 5 | 0,51 |
| Tecnadis 4 | 0,52 | Tecnadis 6 | 0,51 |
| Tecnadis 11 | 0,57 | Tecnadis 13 | 0,54 |
| Tecnadis 12 | 0,57 | Tecnadis 14 | 0,51 |

| | | | |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| PESO MEDIO | 0,55 | PESO MEDIO | 0,52 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,03 | DESV. TÍPICA | ± 0,02 |
| Nasiol 19 | 0,49 | Nasiol 21 | 0,43 |
| Nasiol 20 | 0,43 | Nasiol 22 | 0,42 |
| Nasiol 27 | 0,46 | Nasiol 29 | 0,41 |
| Nasiol 28 | 0,44 | Nasiol 30 | 0,45 |
| PESO MEDIO | 0,46 | PESO MEDIO | 0,43 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,03 | DESV. TÍPICA | ± 0,02 |
| Henclex 35 | 0,35 | Henclex 37 | 0,38 |
| Henclex 36 | 0,38 | Henclex 38 | 0,33 |
| Henclex 43 | 0,42 | Henclex 45 | 0,42 |
| Henclex 44 | 0,42 | Henclex 46 | 0,42 |
| PESO MEDIO | 0,39 | PESO MEDIO | 0,39 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,03 | DESV. TÍPICA | ± 0,04 |
| Nikwax 51 | 0,45 | Nikwax 53 | 0,39 |
| Nikwax 52 | 0,42 | Nikwax 54 | 0,38 |
| Nikwax 59 | 0,42 | Nikwax 61 | 0,47 |
| Nikwax 60 | 0,4 | Nikwax 62 | 0,49 |
| PESO MEDIO | 0,42 | PESO MEDIO | 0,43 |
| DESV. TÍPICA | ± 0,02 | DESV. TÍPICA | ± 0,06 |

Tabla A2-0-48 Pesos después del segundo ensayo de sales y hielo-deshielo

6.13 Desorción

| SALES | | HIELO-DESHIELO | |
|-------------|-----------------|----------------|-----------------|
| MUESTRAS | PESOS INICIALES | MUESTRAS | PESOS INICIALES |
| Tecnadis 3 | 0,51 | Tecnadis 5 | 0,49 |
| Tecnadis 4 | 0,51 | Tecnadis 6 | 0,49 |
| Tecnadis 11 | 0,53 | Tecnadis 13 | 0,5 |
| Tecnadis 12 | 0,53 | Tecnadis 14 | 0,47 |
| Nasiol 19 | 0,51 | Nasiol 21 | 0,43 |
| Nasiol 20 | 0,45 | Nasiol 22 | 0,43 |
| Nasiol 27 | 0,45 | Nasiol 29 | 0,4 |
| Nasiol 28 | 0,44 | Nasiol 30 | 0,44 |
| Henclex 35 | 0,34 | Henclex 37 | 0,39 |
| Henclex 36 | 0,37 | Henclex 38 | 0,33 |
| Henclex 43 | 0,4 | Henclex 45 | 0,42 |
| Henclex 44 | 0,4 | Henclex 46 | 0,39 |
| Nikwax 51 | 0,44 | Nikwax 53 | 0,39 |
| Nikwax 52 | 0,41 | Nikwax 54 | 0,38 |
| Nikwax 59 | 0,36 | Nikwax 61 | 0,4 |
| Nikwax 60 | 0,35 | Nikwax 62 | 0,41 |

Tabla A2-0-49 Pesos iniciales de los ensayos de hielo-deshielo y sales

| REFERENCIAS | |
|-------------|-----------------|
| MUESTRAS | PESOS INICIALES |
| Ref. 65 | 0,35 |
| Ref. 66 | 0,4 |
| Ref. 67 | 0,43 |
| Ref. 68 | 0,4 |
| Ref. 69 | 0,37 |
| Ref. 70 | 0,4 |
| Ref. 71 | 0,54 |
| Ref. 72 | 0,49 |

Tabla A2-0-50 Pesos de las muestras de referencia

| MUESTRAS | SALES | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|------|------|------|------|------|------|--------|--------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | 5' | 10' | 20' | 30' | 40' | 50' | 1h | 1h 20' | 1h 40' | 2h | 2h 30' | 4h | 6h | 8h | 24h | 48h |
| Teonadis 3 | 1,28 | 1,18 | 1,05 | 0,96 | 0,93 | 0,90 | 0,86 | 0,81 | 0,74 | 0,63 | 0,55 | 0,57 | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 0,53 |
| Teonadis 4 | 1,17 | 1,14 | 1,05 | 1,04 | 0,97 | 0,95 | 0,91 | 0,84 | 0,75 | 0,69 | 0,57 | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 0,52 | 0,52 |
| Teonadis 11 | 1,18 | 1,13 | 1,08 | 1,01 | 0,99 | 0,93 | 0,90 | 0,80 | 0,76 | 0,66 | 0,59 | 0,56 | 0,57 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |
| Teonadis 12 | 1,20 | 1,12 | 1,12 | 1,04 | 1,01 | 0,96 | 0,92 | 0,87 | 0,75 | 0,69 | 0,61 | 0,57 | 0,55 | 0,58 | 0,58 | 0,58 |
| Nasiol 19 | 1,13 | 1,06 | 0,92 | 0,88 | 0,83 | 0,80 | 0,74 | 0,70 | 0,59 | 0,53 | 0,52 | 0,56 | 0,49 | 0,51 | 0,51 | 0,51 |
| Nasiol 20 | 0,91 | 0,86 | 0,79 | 0,74 | 0,70 | 0,67 | 0,64 | 0,55 | 0,52 | 0,45 | 0,45 | 0,50 | 0,47 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| Nasiol 27 | 1,02 | 0,88 | 0,81 | 0,75 | 0,74 | 0,70 | 0,66 | 0,61 | 0,53 | 0,48 | 0,46 | 0,51 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,46 |
| Nasiol 28 | 1,03 | 0,89 | 0,75 | 0,67 | 0,66 | 0,64 | 0,61 | 0,53 | 0,51 | 0,45 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| Henclex 35 | 0,75 | 0,69 | 0,58 | 0,54 | 0,53 | 0,49 | 0,47 | 0,42 | 0,36 | 0,36 | 0,35 | 0,36 | 0,35 | 0,36 | 0,36 | 0,35 |
| Henclex 36 | 0,67 | 0,67 | 0,65 | 0,60 | 0,56 | 0,54 | 0,51 | 0,45 | 0,43 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 0,38 |
| Henclex 43 | 0,63 | 0,61 | 0,73 | 0,72 | 0,66 | 0,65 | 0,61 | 0,55 | 0,47 | 0,43 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,42 |
| Henclex 44 | 0,80 | 0,83 | 0,74 | 0,71 | 0,66 | 0,64 | 0,61 | 0,56 | 0,52 | 0,46 | 0,43 | 0,43 | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,42 |
| Nikwax 51 | 0,99 | 0,98 | 0,89 | 0,80 | 0,78 | 0,76 | 0,72 | 0,65 | 0,60 | 0,52 | 0,46 | 0,46 | 0,44 | 0,45 | 0,44 | 0,44 |
| Nikwax 52 | 1,01 | 0,95 | 0,87 | 0,84 | 0,81 | 0,77 | 0,74 | 0,66 | 0,58 | 0,52 | 0,46 | 0,43 | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Nikwax 53 | 0,69 | 0,67 | 0,65 | 0,63 | 0,59 | 0,58 | 0,54 | 0,51 | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Nikwax 60 | 0,76 | 0,72 | 0,67 | 0,64 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,50 | 0,45 | 0,42 | 0,41 | 0,40 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,40 |
| MUESTRAS | HIELO-DESHIELO | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5' | 10' | 20' | 30' | 40' | 50' | 1h | 1h 20' | 1h 40' | 2h | 2h 30' | 4h | 6h | 8h | 24h | 48h |
| Teonadis 5 | 1,07 | 1 | 0,98 | 0,96 | 0,89 | 0,87 | 0,85 | 0,74 | 0,72 | 0,62 | 0,55 | 0,55 | 0,52 | 0,5 | 0,5 | 0,49 |
| Teonadis 6 | 1,09 | 0,98 | 1,01 | 0,94 | 0,9 | 0,88 | 0,84 | 0,8 | 0,69 | 0,62 | 0,54 | 0,52 | 0,51 | 0,51 | 0,43 | 0,45 |
| Teonadis 13 | 1,15 | 0,98 | 0,91 | 0,89 | 0,86 | 0,81 | 0,78 | 0,72 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,54 | 0,54 | 0,52 | 0,49 | 0,47 |
| Teonadis 14 | 1,06 | 1 | 0,88 | 0,85 | 0,84 | 0,8 | 0,78 | 0,69 | 0,65 | 0,55 | 0,53 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,41 | 0,43 |
| Nasiol 21 | 0,9 | 0,81 | 0,73 | 0,71 | 0,68 | 0,65 | 0,63 | 0,54 | 0,51 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Nasiol 22 | 0,91 | 0,77 | 0,82 | 0,73 | 0,72 | 0,66 | 0,62 | 0,57 | 0,48 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,41 |
| Nasiol 29 | 0,88 | 0,85 | 0,69 | 0,64 | 0,61 | 0,57 | 0,55 | 0,47 | 0,46 | 0,43 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,4 | 0,38 | 0,37 |
| Nasiol 30 | 1,05 | 0,95 | 0,81 | 0,76 | 0,73 | 0,72 | 0,66 | 0,62 | 0,52 | 0,49 | 0,47 | 0,47 | 0,48 | 0,47 | 0,45 | 0,36 |
| Henclex 37 | 0,77 | 0,72 | 0,64 | 0,63 | 0,6 | 0,56 | 0,52 | 0,47 | 0,41 | 0,41 | 0,39 | 0,4 | 0,39 | 0,38 | 0,36 | 0,28 |
| Henclex 38 | 0,7 | 0,71 | 0,59 | 0,55 | 0,52 | 0,5 | 0,48 | 0,41 | 0,35 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,3 | 0,24 |
| Henclex 45 | 0,88 | 0,83 | 0,73 | 0,69 | 0,67 | 0,62 | 0,59 | 0,56 | 0,48 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,44 | 0,45 | 0,43 | 0,38 |
| Henclex 46 | 0,77 | 0,7 | 0,65 | 0,62 | 0,62 | 0,57 | 0,56 | 0,49 | 0,45 | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,38 | 0,34 |
| Nikwax 53 | 0,87 | 0,81 | 0,75 | 0,73 | 0,69 | 0,65 | 0,62 | 0,59 | 0,51 | 0,47 | 0,41 | 0,4 | 0,39 | 0,41 | 0,36 | 0,31 |
| Nikwax 54 | 0,77 | 0,74 | 0,72 | 0,69 | 0,64 | 0,64 | 0,6 | 0,55 | 0,48 | 0,43 | 0,4 | 0,41 | 0,4 | 0,4 | 0,34 | 0,32 |
| Nikwax 61 | 0,83 | 0,7 | 0,71 | 0,65 | 0,62 | 0,59 | 0,55 | 0,53 | 0,48 | 0,48 | 0,46 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,39 | 0,36 |
| Nikwax 62 | 0,76 | 0,69 | 0,72 | 0,66 | 0,65 | 0,63 | 0,59 | 0,56 | 0,51 | 0,51 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,49 | 0,45 | 0,43 |
| MUESTRAS | REFERENCIAS | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5' | 10' | 20' | 30' | 40' | 50' | 1h | 1h 20' | 1h 40' | 2h | 2h 30' | 4h | 6h | 8h | 24h | 48h |
| Ref. 65 | 0,93 | 0,79 | 0,76 | 0,7 | 0,68 | 0,66 | 0,62 | 0,58 | 0,5 | 0,43 | 0,38 | 0,37 | 0,36 | 0,34 | 0,35 | 0,35 |
| Ref. 66 | 1 | 1,04 | 0,92 | 0,88 | 0,83 | 0,79 | 0,74 | 0,67 | 0,59 | 0,53 | 0,46 | 0,44 | 0,43 | 0,41 | 0,41 | 0,4 |
| Ref. 67 | 1,11 | 1,06 | 1,01 | 0,94 | 0,88 | 0,86 | 0,83 | 0,72 | 0,7 | 0,61 | 0,5 | 0,47 | 0,45 | 0,42 | 0,42 | 0,42 |
| Ref. 68 | 0,98 | 0,92 | 0,9 | 0,82 | 0,79 | 0,77 | 0,74 | 0,68 | 0,58 | 0,53 | 0,45 | 0,43 | 0,42 | 0,4 | 0,4 | 0,39 |
| Ref. 69 | 0,91 | 0,89 | 0,89 | 0,81 | 0,75 | 0,73 | 0,67 | 0,63 | 0,54 | 0,49 | 0,41 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| Ref. 70 | 1,01 | 1,01 | 0,89 | 0,85 | 0,82 | 0,77 | 0,72 | 0,66 | 0,59 | 0,54 | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,4 | 0,39 | 0,39 |
| Ref. 71 | 1,33 | 1,22 | 1,19 | 1,12 | 1,07 | 1,03 | 1,01 | 0,96 | 0,85 | 0,77 | 0,67 | 0,6 | 0,58 | 0,55 | 0,54 | 0,53 |
| Ref. 72 | 1,18 | 1,15 | 1,13 | 1,02 | 0,96 | 0,9 | 0,87 | 0,82 | 0,7 | 0,63 | 0,53 | 0,51 | 0,5 | 0,48 | 0,48 | 0,48 |

Tabla A2-0-51 Proceso de secado

| SALES | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| MUESTRAS | 5' | 10' | 20' | 30' | 40' | 50' | 1h | 1h 20' | 1h 40' | 2h | 2h 30' | 4h | 6h | 8h | 24h | 48h |
| Tecnadis 3 | 1.510 | 1.314 | 1.059 | 0.882 | 0.824 | 0.765 | 0.686 | 0.588 | 0.451 | 0.235 | 0.078 | 0.18 | 0.039 | 0.059 | 0.059 | 0.039 |
| Tecnadis 4 | 1.294 | 1.235 | 1.059 | 1.039 | 0.902 | 0.863 | 0.784 | 0.647 | 0.471 | 0.353 | 0.118 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.020 | 0.020 |
| Tecnadis 11 | 1.226 | 1.132 | 1.038 | 0.906 | 0.868 | 0.755 | 0.698 | 0.509 | 0.434 | 0.245 | 0.113 | 0.057 | 0.075 | 0.075 | 0.075 | 0.075 |
| Tecnadis 12 | 1.264 | 1.113 | 1.113 | 0.962 | 0.906 | 0.811 | 0.736 | 0.642 | 0.415 | 0.302 | 0.151 | 0.075 | 0.038 | 0.094 | 0.094 | 0.094 |
| Nasiol 19 | 1.216 | 1.078 | 0.804 | 0.725 | 0.627 | 0.569 | 0.451 | 0.373 | 0.157 | 0.039 | 0.020 | 0.098 | -0.039 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Nasiol 20 | 1.022 | 0.911 | 0.756 | 0.644 | 0.556 | 0.489 | 0.422 | 0.222 | 0.156 | 0.000 | 0.000 | 0.111 | 0.044 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Nasiol 27 | 1.267 | 0.956 | 0.800 | 0.667 | 0.644 | 0.596 | 0.467 | 0.356 | 0.178 | 0.067 | 0.022 | 0.133 | 0.022 | 0.022 | 0.022 | 0.022 |
| Nasiol 28 | 1.341 | 1.023 | 0.705 | 0.523 | 0.500 | 0.485 | 0.386 | 0.205 | 0.159 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Henclex 35 | 1.206 | 1.029 | 0.706 | 0.588 | 0.559 | 0.441 | 0.382 | 0.235 | 0.059 | 0.059 | 0.029 | 0.059 | 0.029 | 0.059 | 0.059 | 0.029 |
| Henclex 36 | 0.811 | 0.811 | 0.757 | 0.622 | 0.514 | 0.459 | 0.378 | 0.216 | 0.162 | 0.054 | 0.027 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| Henclex 43 | 1.075 | 1.025 | 0.825 | 0.800 | 0.650 | 0.625 | 0.525 | 0.375 | 0.175 | 0.075 | 0.100 | 0.075 | 0.100 | 0.075 | 0.050 | 0.050 |
| Henclex 44 | 1.000 | 1.075 | 0.850 | 0.775 | 0.650 | 0.600 | 0.525 | 0.400 | 0.300 | 0.150 | 0.075 | 0.075 | 0.050 | 0.050 | 0.050 | 0.050 |
| Nikwax 51 | 1.250 | 1.227 | 1.023 | 0.818 | 0.773 | 0.727 | 0.636 | 0.477 | 0.364 | 0.182 | 0.045 | 0.045 | 0.000 | 0.023 | 0.000 | 0.000 |
| Nikwax 52 | 1.463 | 1.317 | 1.122 | 1.049 | 0.976 | 0.878 | 0.805 | 0.610 | 0.415 | 0.288 | 0.122 | 0.049 | 0.024 | 0.049 | 0.049 | 0.049 |
| Nikwax 59 | 0.917 | 0.861 | 0.806 | 0.750 | 0.639 | 0.611 | 0.500 | 0.417 | 0.250 | 0.222 | 0.194 | 0.222 | 0.194 | 0.194 | 0.194 | 0.194 |
| Nikwax 60 | 1.171 | 1.057 | 0.914 | 0.829 | 0.771 | 0.657 | 0.543 | 0.429 | 0.286 | 0.200 | 0.171 | 0.143 | 0.171 | 0.171 | 0.171 | 0.143 |

| HIELO-DESHIELO | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| MUESTRAS | 5' | 10' | 20' | 30' | 40' | 50' | 1h | 1h 20' | 1h 40' | 2h | 2h 30' | 4h | 6h | 8h | 24h | 48h |
| Tecnadis 5 | 1.184 | 1.041 | 1.000 | 0.959 | 0.816 | 0.776 | 0.735 | 0.510 | 0.469 | 0.265 | 0.122 | 0.122 | 0.061 | 0.020 | 0.020 | 0.000 |
| Tecnadis 6 | 1.224 | 1.000 | 1.061 | 0.918 | 0.837 | 0.796 | 0.714 | 0.633 | 0.408 | 0.265 | 0.102 | 0.061 | 0.041 | -0.122 | -0.122 | -0.082 |
| Tecnadis 13 | 1.300 | 0.960 | 0.820 | 0.780 | 0.720 | 0.620 | 0.560 | 0.440 | 0.260 | 0.160 | 0.100 | 0.080 | 0.080 | 0.040 | -0.020 | -0.060 |
| Tecnadis 14 | 1.255 | 1.128 | 0.872 | 0.809 | 0.787 | 0.702 | 0.660 | 0.468 | 0.383 | 0.170 | 0.128 | 0.106 | 0.106 | 0.106 | -0.128 | -0.085 |
| Nasiol 21 | 1.093 | 0.884 | 0.698 | 0.651 | 0.581 | 0.512 | 0.465 | 0.256 | 0.186 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Nasiol 22 | 1.116 | 0.791 | 0.907 | 0.698 | 0.674 | 0.535 | 0.442 | 0.326 | 0.116 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | -0.047 |
| Nasiol 29 | 1.200 | 1.125 | 0.725 | 0.600 | 0.525 | 0.425 | 0.375 | 0.175 | 0.150 | 0.075 | 0.075 | 0.050 | 0.025 | 0.000 | -0.050 | -0.075 |
| Nasiol 30 | 1.386 | 1.159 | 0.841 | 0.727 | 0.659 | 0.636 | 0.500 | 0.409 | 0.182 | 0.114 | 0.068 | 0.068 | 0.091 | 0.068 | 0.023 | -0.182 |
| Henclex 37 | 0.974 | 0.846 | 0.641 | 0.615 | 0.538 | 0.436 | 0.333 | 0.205 | 0.051 | 0.051 | 0.000 | 0.026 | 0.000 | -0.026 | -0.077 | -0.282 |
| Henclex 38 | 1.121 | 1.152 | 0.788 | 0.667 | 0.576 | 0.515 | 0.455 | 0.242 | 0.061 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.091 | -0.273 |
| Henclex 45 | 1.095 | 0.976 | 0.738 | 0.643 | 0.595 | 0.476 | 0.405 | 0.333 | 0.143 | 0.048 | 0.024 | 0.048 | 0.048 | 0.071 | 0.167 | -0.095 |
| Henclex 46 | 0.974 | 0.795 | 0.667 | 0.590 | 0.590 | 0.462 | 0.436 | 0.256 | 0.154 | 0.077 | 0.051 | 0.077 | 0.051 | 0.051 | -0.026 | -0.128 |
| Nikwax 53 | 1.231 | 1.077 | 0.923 | 0.872 | 0.769 | 0.667 | 0.590 | 0.513 | 0.308 | 0.205 | 0.051 | 0.026 | 0.000 | 0.051 | -0.077 | -0.205 |
| Nikwax 54 | 1.026 | 0.947 | 0.895 | 0.816 | 0.684 | 0.684 | 0.579 | 0.447 | 0.263 | 0.132 | 0.053 | 0.079 | 0.053 | 0.053 | -0.105 | -0.158 |
| Nikwax 61 | 1.075 | 0.750 | 0.775 | 0.625 | 0.550 | 0.475 | 0.375 | 0.325 | 0.200 | 0.200 | 0.150 | 0.175 | 0.175 | 0.175 | -0.025 | -0.100 |
| Nikwax 62 | 0.854 | 0.683 | 0.756 | 0.610 | 0.585 | 0.537 | 0.439 | 0.366 | 0.244 | 0.244 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.195 | 0.098 | 0.049 |

| REFERENCIAS | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| MUESTRAS | 5' | 10' | 20' | 30' | 40' | 50' | 1h | 1h 20' | 1h 40' | 2h | 2h 30' | 4h | 6h | 8h | 24h | 48h |
| Ref. 65 | 1.657 | 1.257 | 1.171 | 1.000 | 0.943 | 0.896 | 0.771 | 0.657 | 0.429 | 0.229 | 0.086 | 0.057 | 0.029 | -0.029 | 0.000 | 0.000 |
| Ref. 66 | 1.500 | 1.600 | 1.300 | 1.200 | 1.075 | 0.975 | 0.850 | 0.675 | 0.475 | 0.325 | 0.150 | 0.100 | 0.075 | 0.025 | 0.025 | 0.000 |
| Ref. 67 | 1.581 | 1.465 | 1.349 | 1.186 | 1.047 | 1.000 | 0.930 | 0.674 | 0.628 | 0.419 | 0.163 | 0.093 | 0.047 | -0.023 | -0.023 | -0.023 |
| Ref. 68 | 1.450 | 1.300 | 1.250 | 1.050 | 0.975 | 0.925 | 0.850 | 0.700 | 0.450 | 0.325 | 0.125 | 0.075 | 0.050 | 0.000 | 0.000 | -0.025 |
| Ref. 69 | 1.459 | 1.405 | 1.405 | 1.189 | 1.027 | 0.973 | 0.811 | 0.703 | 0.459 | 0.324 | 0.108 | 0.054 | 0.027 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ref. 70 | 1.525 | 1.525 | 1.225 | 1.125 | 1.050 | 0.925 | 0.800 | 0.650 | 0.475 | 0.350 | 0.125 | 0.100 | 0.075 | 0.000 | -0.025 | -0.025 |
| Ref. 71 | 1.463 | 1.259 | 1.204 | 1.074 | 0.981 | 0.907 | 0.870 | 0.778 | 0.574 | 0.426 | 0.241 | 0.111 | 0.074 | 0.019 | 0.000 | -0.019 |
| Ref. 72 | 1.408 | 1.347 | 1.306 | 1.082 | 0.959 | 0.837 | 0.776 | 0.673 | 0.429 | 0.286 | 0.082 | 0.041 | 0.020 | -0.020 | -0.020 | -0.020 |

Tabla A2-0-52 Proceso de desorción

6.14 Potencias asociadas al amperaje y las frecuencias del láser de CO₂

| | | Frecuencias | | | |
|----------|--------|-------------|---------|---------|---------|
| | | 200 kHz | 400 kHz | 600 kHz | 800 kHz |
| Amperaje | 1,0 A | 0,65 W | 0,65 W | 0,75 W | 0,8 W |
| | 1,5 A | 1,06 W | 1,06 W | 1,12 W | 1,14 W |
| | 2,0 A | 1,49 W | 1,49 W | 1,51 W | 1,54 W |
| | 2,5 A | 1,97 W | 1,97 W | 1,97 W | 1,89 W |
| | 3,0 A | 2,51 W | 2,51 W | 2,42 W | 2,45 W |
| | 3,5 A | 3,03 W | 3,03 W | 2,91 W | 2,93 W |
| | 4,0 A | 3,50 W | 3,50 W | 3,37 W | 3,39 W |
| | 4,5 A | 3,96 W | 3,96 W | 3,89 W | 3,88 W |
| | 5,0 A | 4,40 W | 4,40 W | 4,4 W | 4,35 W |
| | 5,5 A | 4,80 W | 4,80 W | 4,89 W | 4,84 W |
| | 6,0 A | 5,20 W | 5,20 W | 5,41 W | 5,34 W |
| 6,5 A | 5,54 W | 5,54 W | 5,89 W | 5,75 W | |

| | | | | | |
|--|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 7,0 A | 5,87 W | 5,87 W | 6,37 W | 6,24 W |
| | 7,5 A | 5,94 W | 5,94 W | 6,87 W | 6,71 W |

Tabla A2-0-53 Equivalencias de potencia del láser de CO₂

ANEXO III: COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS

6.15 Nikwax Cotton Proof

- Composición:**

| Compuesto | EC No. | %/(W/W) | Símbolo | Expresión R |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------------|
| Agua | 231-791-2 | >50 % | | |
| Acetato de zirconio | 231-492-7 | 2-5 % | Xi | R36 |
| Propano | 200-338-0 | 2-3 % | | |
| Ácido acético | 200-580-7 | 1-2 % | Xi | R36 |

Tabla A3-0-1 Composición del Nikwax

- Propiedades físicas y químicas:**

| | |
|--|---|
| Apariencia: | Líquido blanco aspecto lechoso |
| Olor: | Levemente avinagrado |
| pH: | 4.0 – 4.6 |
| Punto de ebullición: | 100 °C |
| Punto de fusión: | -2 °C |
| Punto de inflamación: (°C): | N/A |
| Flamabilidad: | N/A |
| Autoinflamabilidad: | N/A |
| Propiedades explosivas: | N/A |
| Propiedades de oxidación: | No determinadas |
| Presión de vapor: | No determinada, considerar como agua |
| Densidad relativa: | 0.997 |
| Solubilidad: (agua y aceite): | Completamente soluble en agua, parcialmente miscible en aceites |
| Coefficiente de partición: (n-octanol/agua): | No determinado |
| Viscosidad: | No determinada, considerar como agua |
| Densidad de vapor: | No determinada, considerar como agua |

| | |
|----------------------|--------------------------------------|
| Tasa de evaporación: | No determinado, considerar como agua |
|----------------------|--------------------------------------|

Tabla A3-0-2 Propiedades físicas y químicas del Nikwax

6.16 Tecnadis Coatex

- **Composición:**

Este producto está basado en una nanopartícula agua-dispersión tratada con agentes activos y otros ingredientes necesarios para la formulación final.

- **Propiedades físicas y químicas:**

| | |
|--|---|
| Apariencia: | Líquido blanco aspecto lechoso |
| Olor: | Levemente avinagrado |
| pH: | 4.0 – 4.6 |
| Punto de ebullición: | 100 °C |
| Punto de fusión: | -2 °C |
| Punto de inflamación: (°C): | N/A |
| Flamabilidad | N/A |
| Autoinflamabilidad: | N/A |
| Propiedades explosivas: | N/A |
| Propiedades de oxidación: | No determinadas |
| Presión de vapor: | No determinada, considerar como agua |
| Densidad relativa: | 0.997 |
| Solubilidad: (agua y aceite): | Completamente soluble en agua, parcialmente miscible en aceites |
| Coefficiente de partición: (n-octanol/agua): | No determinado |
| Viscosidad: | No determinada, considerar como agua |
| Densidad de vapor: | No determinada, considerar como agua |
| Tasa de evaporación: | No determinado, considerar como agua |

Tabla A3-0-3 Propiedades físicas y químicas del Tecnadis

6.17 Hendlex Carbon Protect

- **Composición, propiedades físicas y químicas:**

No existe información facilitada por el fabricante en relación a la composición y propiedades físico-químicas de este producto.

6.18 Nasiol

- **Composición:**

| Compuesto | EC No. | %/(W/W) | CAS No | EC INDEX No. | PELIGROS |
|--|-----------|---------|------------|--------------|---------------------|
| Hidrocarburos | 265-149-8 | >85 % | 64742-47-8 | 649-422-00-2 | Asp. Tox. 1 H304 |
| Fórmula comercialmente reservada | - | >35 % | - | - | - |

Tabla A3-0-4 Composición del Nasiol

- **Propiedades físicas y químicas:**

| | |
|---------------------------------|------------------|
| Apariencia: | Líquido incoloro |
| Olor: | Característico |
| Punto de ebullición: | 175 °C |
| Gravedad específica: | 0.88 |
| Densidad de vapor (Aire=1): | >2.52 |
| Volatilidad | 100 % |
| Temperatura de autoignición: | 275 °C |
| Límites de explosión: | 0.9 % – 12% v/v |
| Punto de fusión: | - 25 °C |
| Presión de vapor: | 10 mmHg (20 °C) |
| Solubilidad en agua: | No miscible |
| Tasa de evaporación: | 1.4 |
| Punto de inflamación: | 69 °C |

Tabla A3-0-5 Propiedades físicas y químicas del Nasiol

ANEXO IV: FICHAS TÉCNICAS



PowerLine E Series

Laser Marking with Ultimate Quality

The PowerLine E Series is designed for demanding applications that benefit from the excellent marking performance of vanadate lasers. Whenever aesthetics and legibility are paramount, PowerLine E laser markers offer distinct advantages. They combine sophisticated laser technology (infrared, green, or ultraviolet) with a modular laser marker design. This allows for configuring optimal solutions for your marking requirement.

FEATURES & BENEFITS

- Excellent control of marking quality
- Compact modular design
- First-pulse suppression feature
- Powerful VLM marking software
- Through-the-lens alignment
- Laser positioning help (optional)
- Greyscale marking feature (optional)
- Sky marking feature (optional)
- Fast-focus module (optional)

APPLICATIONS

- Marking of organic materials, metals, glass
- Marking on-the-fly (conveyor belt or rotational axis)
- Greyscale Marking
- Day and Night Design Marking
- Label Marking
- 3D Marking

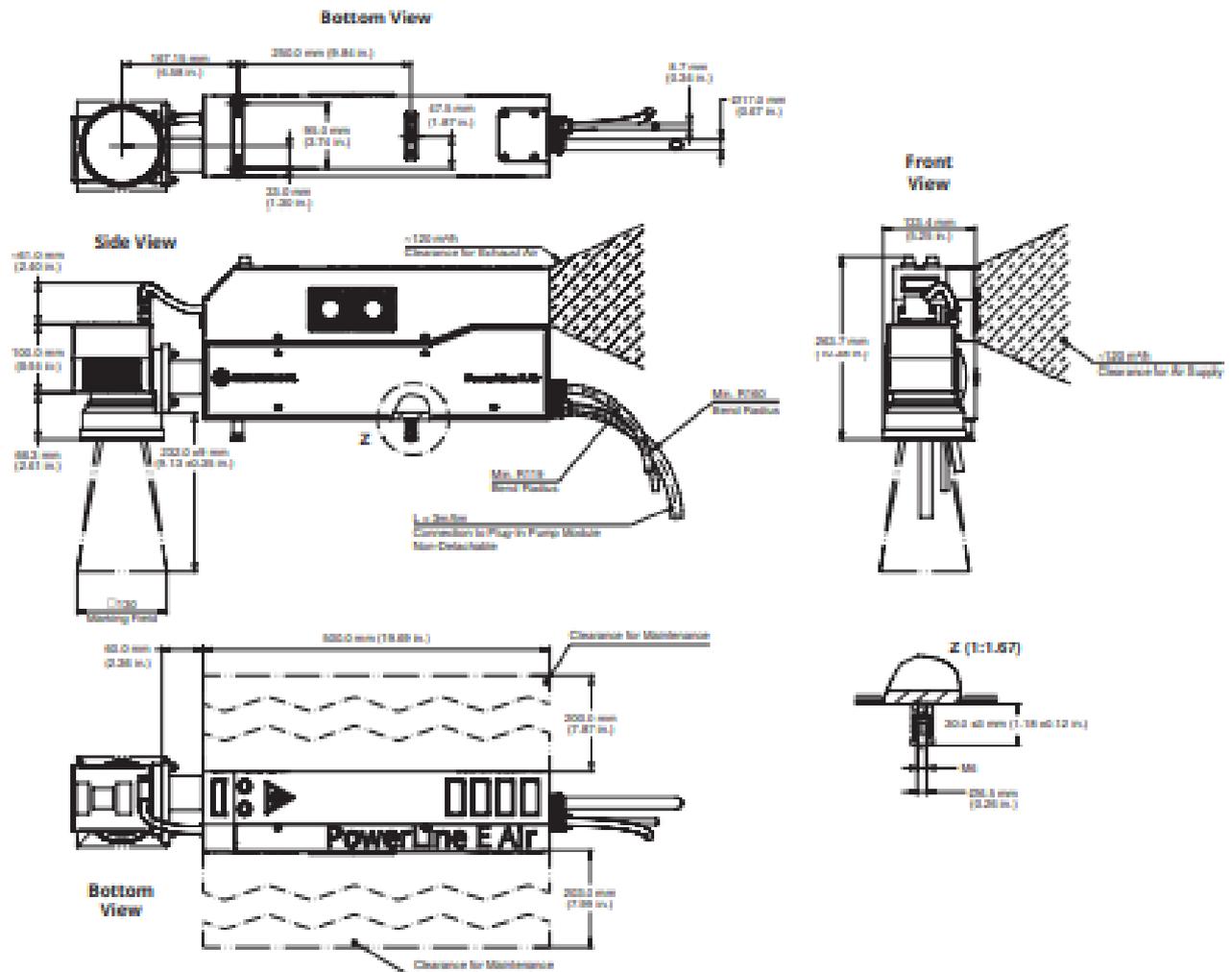


| MODEL | PL E Air 10-1064 | PL E Air 10-1064 | PL E Air 25-1064 | PL E Air 30-1064 IC | PL E 30 |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Laser Type | YVO ₄ | YVO ₄ | YVO ₄ | YVO ₄ | YVO ₄ |
| Wavelength (nm) | 1064 | 1064 | 1064 | 1064 | 1064 |
| Average CW Power (W) | 8.5 | 10.5 | 24 | 25 | 25 |
| Average Power (W) | 6 (20 kHz) | 6.5 (20 kHz) | 18 (20 kHz) | 20 (60 kHz) | 20 (60 kHz) |
| Frequency Range (kHz) | CW, 0 to 200 | CW, 0 to 200 |
| Pulse Width (ns) | 10 (20 kHz) | 10 (20 kHz) | 20 (20 kHz) | 40 (60 kHz) | 40 (60 kHz) |
| M ² | 1.5 | 2.0 | 1.3 | 2 – 4 | 2 – 4 |
| Cooling | Air | Air | Air | Air | Water/Air |
| Control System | RCU-ITX | RCU-ITX | RCU-ITX | RCU-ITX | RCU |

| MODEL | PL E 40 | PL E 12 SHG | PL E 20 SHG | PL E 25 SHG | PL E 20 THG |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Laser Type | YVO ₄ |
| Wavelength (nm) | 1064 | 532 | 532 | 532 | 355 |
| Average CW Power (W) | 40 | - | - | - | - |
| Average Power (W) | 35 (60 kHz) | 6 (50 kHz) | 12 (50 kHz) | 18 (50 kHz) | 2 (15 kHz) |
| Frequency Range (kHz) | CW, 30 to 200 | 5 to 200 | 15 to 200 | 15 to 200 | 15 to 100 |
| Pulse Width (ns) | 35 (60 kHz) | 40 (50 kHz) | 25 (50 kHz) | 32 (50 kHz) | 10 (15 kHz) |
| M ² | 2 – 4 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Cooling | Water/Air | Water/Air | Water/Air | Water/Air | Water/Air |
| Control System | RCU | RCU | RCU | RCU | RCU |

MECHANICAL SPECIFICATIONS

PowerLine E Air 10-1064/25-1064/30-1064



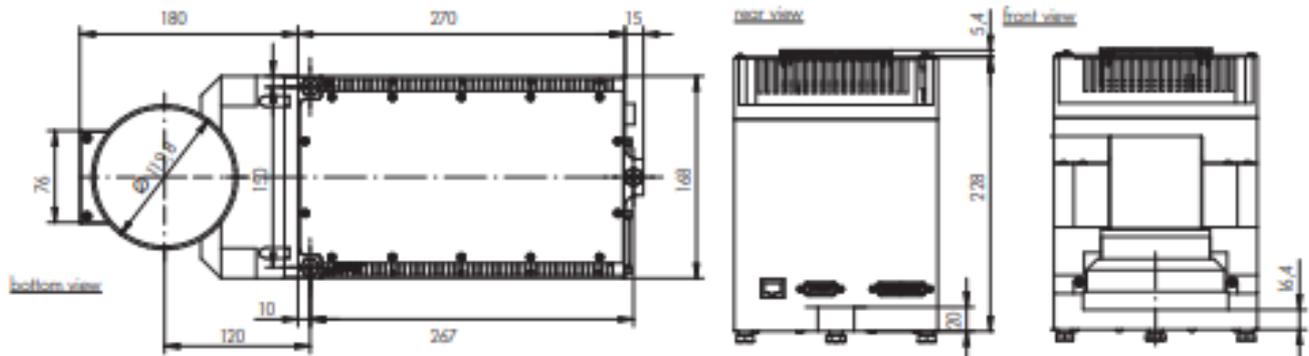
Coherent, Inc.,
 5100 Patrick Henry Drive Santa Clara, CA 95054
 p. (800) 527-3786 | (408) 764-4083
 f. (408) 764-4646

tech.sales@coherent.com www.coherent.com

Coherent follows a policy of continuous product improvement. Specifications are subject to change without notice. Coherent's scientific and industrial lasers are certified to comply with the Federal Regulations (21 CFR Subchapter J) as administered by the Center for Devices and Radiological Health on all systems ordered for shipment after August 2, 1976.

Coherent offers a limited warranty for all PowerLine E Series Lasers. For full details of this warranty coverage, please refer to the Service section at www.coherent.com or contact your local Sales or Service Representative. 502-056-119-081119 Copyright ©2019 Coherent, Inc.

TECHNICAL DATA POWERLINE PICO



PowerLine Pico Laser Beam Source IR

| | |
|--|------------------------------------|
| Wavelength [nm] | 1064 |
| Average power [W] | 8 @ 400 kHz |
| Pulse frequency [kHz] | 200 – 800 |
| Pulse width [ns] | 0,8 ns @ 200 kHz |
| Beam quality | TEM ₀₀ |
| M ² | < 1.5 |
| Energy per pulse [μJ] | 20 μJ @ 400 kHz 10 μJ @ 800 kHz |
| Peak power [kW] | 20 kW @ 400 kHz |
| Beam diameter approx. [mm] | 2 |
| Divergence angle full radius, approx. [mrad] | collimated |
| Polarization | linear; > 100:1 |
| Voltage [V DC] | 24 |
| Ambient temperature range [° C] | 15 – 35 |

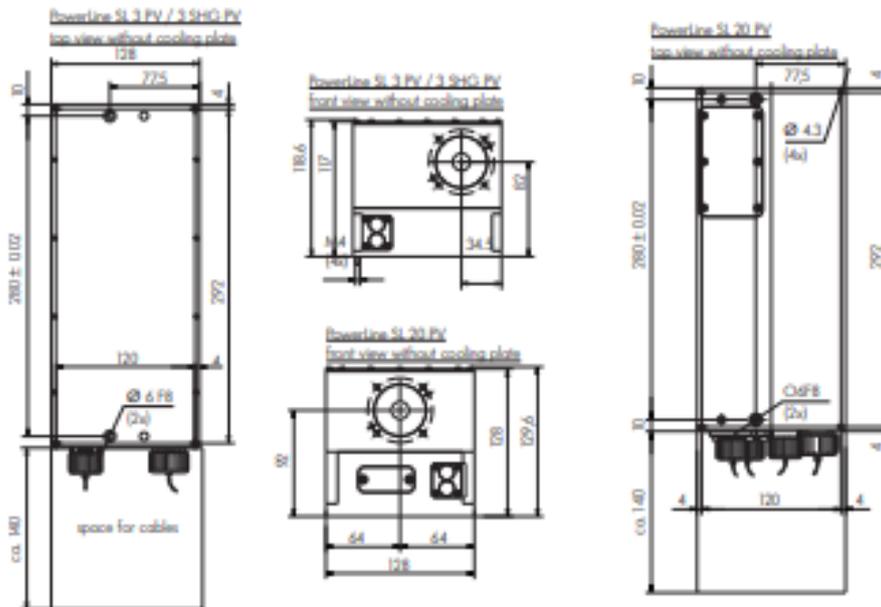
SHG

| | |
|--|--------------------------------------|
| Wavelength [nm] | 532 |
| Average power [W] | 3 @ 400 kHz |
| Pulse frequency [kHz] | 200 – 800 |
| Pulse width [ns] | 0,7 ns @ 200 kHz |
| Beam quality | TEM ₀₀ |
| M ² | < 1.5 |
| Energy per pulse [μJ] | 7,5 μJ @ 400 kHz 3,5 μJ @ 800 kHz |
| Peak power [kW] | 7,5 μJ @ 400 kHz |
| Beam diameter approx. [mm] | 2 |
| Divergence angle full radius, approx. [mrad] | collimated |
| Polarization | linear; > 100:1 |
| Voltage [V DC] | 24 |
| Ambient temperature range [° C] | 15 – 35 |

PowerLine Pico Laser Marker IR

| | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| Wavelength [nm] | 1064 | 532 |
| Pulse frequency [kHz] | 200 – 800 | 200 – 800 |
| Dimensions W x L x H [mm] | 168 x 465 x 230 | 168 x 465 x 230 |
| Air flow approx. [m ³ /h] | 180 | 180 |
| Marking field size [mm] | 120 x 120 or 240 x 240 | 120 x 120 or 240 x 240 |
| Focus distance [mm] | 193 (+/- 7) or 432 (+/- 25) | 193 (+/- 7) or 432 (+/- 25) |
| Supply unit dimensions, W x L x H approx. [mm] | 400 x 300 x 85 or 19" rack, 2 ru | 400 x 300 x 85 or 19" rack, 2 ru |
| Software | VLM | VLM |
| Air flow 19" supply unit approx. [m ³ /h] | 80 | 80 |
| Voltage [V] | 115 - 240, +/- 10%; 1 P/N/PE | 115 - 240, +/- 10%; 1 P/N/PE |
| Ambient temperature range [° C] | 15 – 35 | 15 – 35 |

TECHNICAL DATA POWERLINE SL



| PowerLine SL | 3 PV/SL 20 PV | 3 SHG PV |
|--|---|--|
| Wavelength [nm] | 1064 | 532 |
| Average power [W] | 3.0 @ 50 kHz / 15 @ 100 kHz | 2.0 @ 50 kHz |
| Pulse frequency [kHz] | 0 – 400 | 15 – 400 |
| Pulse width [ns] | 16 @ 50 kHz / 45 @ 100 kHz | 13 @ 50 kHz |
| Beam quality | TEM ₀₀ | TEM ₀₀ |
| M ² | < 1.3 / < 1.2 | < 1.2 |
| Energy per pulse [μJ] | 60 @ 50 kHz / 150 @ 50 kHz | 40 @ 50 kHz |
| Peak power [kW] | 3.75 @ 50 kHz / 3.3 @ 100 kHz | 3.0 @ 50 kHz |
| Beam diameter approx. [mm] | 6 / 1 w/o beam expansion | 1 w/o beam expansion, beam expansion on request |
| Divergence angle full radius, approx. [mrad] | < 1, collimated with beam expansion 4 w/o beam expansion | 2 w/o beam expansion, beam expansion on request |
| Polarization | linear; > 100:1 | linear; > 100:1 |
| Voltage [V AC] | 100 – 240 +/- 10% | 100 – 240 +/- 10% |
| Ambient temperature range [° C] | 1 P/N/PE 50/60 Hz 15 – 25 | 1 P/N/PE 50/60 Hz 15 – 35 |
| Mounting plate temperature [° C] | 20 - 35 / 15 – 25 | 20 – 35 |