



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



CARACTERIZACIÓN Y AJUSTE DE DOSIS DE ADITIVO AL PROCESO DE IMPREGNACIÓN DE PAPEL MELAMINIZADO

POR

Isabel Catalina Winkler Enríquez

Proyecto de Tesis

Profesor Guía
Andrés Mejía M.

Profesores de Comisión
Pedro Toledo
Miguel Angel Pereira
Claudio Faundez A.

Octubre 2023
Concepción, Chile

© 2023, Isabel Winkler Enríquez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Resumen

La presente tesis se enfoca en la optimización de propiedades superficiales en procesos de impregnación y laminación de tableros, mediante la investigación y análisis detallado de surfactantes y humectantes utilizados en estos procesos industriales. El objetivo principal es comprender cómo las concentraciones de estos aditivos afectan las propiedades interfaciales de las superficies laminadas y cómo estas propiedades influyen en la calidad y durabilidad del producto final.

El trabajo de investigación se divide en diferentes etapas. En primer lugar, se llevaron a cabo experimentos de medición de tensión superficial y ángulo de contacto para evaluar los efectos de diferentes concentraciones de surfactantes aniónicos, catiónicos y no iónicos en soluciones acuosas. Además, se analizó cómo las concentraciones de humectantes impactan en la tensión superficial y el ángulo de contacto de los tableros con papel impregnados y del papel sin impregnar.

En conjunto, esta tesis proporciona una visión completa y detallada de cómo las concentraciones de surfactantes y humectantes influyen en las propiedades superficiales y en la calidad de los productos en los procesos de impregnación y laminación de tableros. Los resultados tienen implicaciones directas en la optimización de estos procesos industriales y en la producción de productos de alta calidad y durabilidad.

El alcance de esta tesis se centra en la evaluación individual de los surfactantes para la optimización del proceso productivo en cuestión. Como trabajo futuro, se sugiere considerar la evaluación de los surfactantes en combinación y explorar otros aspectos que puedan proporcionar una comprensión más profunda de su rendimiento en este entorno industrial específico.

Palabras Claves – Surfactante, ARAUCO, CMC, Impregnación, Ángulo de contacto

Abstract

This thesis focuses on optimizing surface properties in impregnation and lamination processes of boards through detailed investigation and analysis of surfactants and humectants used in these industrial processes. The primary objective is to understand how the concentrations of these additives affect the interfacial properties of laminated surfaces and how these properties influence the quality and durability of the final product.

The research work is divided into different stages. Firstly, experiments were conducted to measure surface tension and contact angle effects of different concentrations of anionic, cationic, and non-ionic surfactants in aqueous solutions. Additionally, the impact of humectant concentrations on the surface tension and contact angle of impregnated boards and untreated paper was analyzed.

In conclusion, this thesis provides a comprehensive and detailed insight into how concentrations of surfactants and humectants influence surface properties and product quality in board impregnation and lamination processes. The results have direct implications for optimizing these industrial processes and producing high-quality, durable products.

The scope of this thesis is centered around the individual evaluation of surfactants for optimizing the specific production process. As a future work suggestion, considering the evaluation of surfactants in combination and exploring other aspects that may provide a deeper understanding of their performance in this specific industrial context is recommended.

Keywords – Surfactant, ARAUCO, CMC, impregnation, contact angle

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Lista de Abreviaciones	VIII
Lista de Símbolos	IX
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación y Alcance	2
2. Marco Teórico	4
2.1. Surfactantes	4
2.1.1. Clasificación de Surfactantes	5
2.1.1.1. Aniónicos	5
2.1.1.2. Catiónicos	6
2.1.1.3. No Iónicos	6
2.1.1.4. Zwitterionic	6
2.1.2. Comportamiento en fases (Propiedades fisicoquímicas)	7
2.1.2.1. Tensión superficial y formación de micelas	8
2.1.2.2. Concentración Micelar Crítica (CMC)	9
2.1.2.3. Krafft, Cloud Point o Pour Point	11
2.1.2.4. Ángulo de Contacto	13
2.2. Teoría Termodinámica Micelar (MTT)	17
2.3. Estimación de la concentración micelar crítica a partir de datos de tensiometría	22
2.4. Hipótesis	23
2.5. Objetivos	23
2.5.1. Objetivos Generales	23
2.5.2. Objetivos Específicos	23
3. Metodología Experimental	24
3.1. Tensiometría	24
3.2. Goniometría	26
3.3. Proceso de impregnación de papel con resinas amónicas	28
3.3.1. Aditivos proceso de impregnación de papel	31
3.4. Pruebas de Calidad del Producto Final	34

3.4.0.1.	Comportamiento frente al vapor de agua	34
3.4.0.2.	Control cerrado superficial tableros laminados	34
3.4.0.3.	Control dureza superficial tableros laminados	35
3.4.0.4.	Ensayo de abrasión en tableros laminados	36
4.	Resultados	37
4.1.	Resultados	37
4.1.1.	Resultados Valores Experimentales	37
4.1.1.1.	Concentración Crítica Micelar	37
4.1.1.2.	Ángulo de Contacto	45
4.1.1.3.	Ángulo de Contacto de papel sin impregnar	48
4.1.1.4.	Resultados Laboratorio Bioforest	50
4.1.2.	Resultados Modelamiento Teórico	53
5.	Conclusión	56
6.	Apéndices	64
A1.	Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea	64
A2.	Reticulado	77
	Apéndices	77

Índice de tablas

4.1. Cantidad de surfactante agregado a la solución	38
4.2. Propiedades de surfactantes	38
4.3. Concentración de surfactante [mM]	39
4.4. Comparación del porcentaje de error en la medición de surfactantes entre la literatura y los resultados experimentales	41
4.5. Comparación de las concentraciones micelares críticas a 25°C	41
4.6. Evolución del ángulo de contacto sobre tableros con respecto al tiempo . .	48
4.7. Ensayo con tipo de recubrimiento Melamina	50
4.8. Control cerrado superficial	52
4.9. Resultados Abrasión	52
4.10. Propiedades de surfactantes para la aplicación de la teoría termodinámica de micelización	53
4.11. Los valores de CMC se han tomado de: <i>a.</i> Técnica de tensión superficial [38] <i>b.</i> MMT (este trabajo) y <i>c.</i> Datos de la literatura	55
A1.1. Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0 mL de Humectante . . .	65
A1.2. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0 mL de Humectante	66
A1.3. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0 mL de Humectante	67
A1.4. Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.02 mL de Humectante . .	68
A1.5. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.02 mL de Humectante	69
A1.6. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.02 mL de Humectante	70
A1.7. Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.04 mL de Humectante . .	71
A1.8. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.04 mL de Humectante	72
A1.9. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.04 mL de Humectante	73
A1.10. Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.06 mL de Humectante . .	74
A1.11. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.06 mL de Humectante	75
A1.12. Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.06 mL de Humectante	76

Índice de figuras

2.1. Estructura de un surfactante [5]	4
2.2. Tensión interfacial entre agua y aceite en presencia de surfactante [2]	5
2.3. Cambios de un rango de propiedades fisicoquímicas en función de la concentración de surfactante [1]	8
2.4. Representación de una micela [5]	9
2.5. Tensión superficial de un surfactante al incrementar su concentración [5]	10
2.6. Solubilidad y CMC versus Temperatura de SDS en agua [1]	12
2.7. Ángulo de contacto [6]	13
2.8. Ángulo de contacto de mercurio, aceite y agua [6]	14
3.1. Probetas de distinto radio $r_1 \neq r_2$ [4]	25
3.2. Uso de la gota o burbuja sesil para la determinación del ángulo de contacto	26
3.3. Figura esquemática de primera etapa de impregnación, sección de rodillos (izquierda) y sección de secado (derecha)	29
3.4. Imagen segundo baño de resina melamínica	30
3.5. Papel impregnado final	33
4.1. Concentración de Surfactante en solución de agua vs Tensión Superficial de SDS [2]	39
4.2. Concentración de Surfactante en solución de agua vs Tensión Superficial de CTAB [3]	40
4.3. Concentración de Surfactante en solución de agua vs Tensión Superficial de DGME [4]	40
4.4. Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactantes de impregnación de papel en solución de agua (● Antiblocking, ● Humectante, ● Antipolvo, ● Desmoldante, ● Antiespumante)	42
4.5. Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Antiblocking en solución de agua.	42
4.6. Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Humectante en solución de agua.	43
4.7. Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Antipolvo en solución de agua.	43
4.8. Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Desmoldante en solución de agua.	44

4.9. Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Antiespumante en solución de agua. . .	44
4.10. Ángulo de contacto sobre tableros melaminizados	46
4.11. Evolución del ángulo de contacto sobre tableros con respecto al tiempo donde: ● Tablero STD vs Ángulo de Contacto ○ Tablero -1 vs Ángulo de Contacto ▲ Tablero +1 vs Ángulo de Contacto	47
4.12. Evolución del ángulo de contacto de Urea sobre papel sin impregnar donde: — tiempo vs ángulo de contacto + 0 humectante — tiempo vs ángulo de contacto + 2 humectante — tiempo vs ángulo de contacto + 4 humectante — tiempo vs ángulo de contacto + 6 humectante	49
4.13. Ángulo de contacto de Urea + humectante sobre papel sin impregnar . . .	50
4.14. Comportamiento frente al vapor de agua Estandar	51
4.15. Comportamiento frente al vapor de agua -1	51
4.16. Comportamiento frente al vapor de agua +1	51
4.17. Diferencia estándar de energía libre predicha ($\Delta\mu_{0g}$) para soluciones acuosas de Surfactante con diferentes formas de agregación a 25 °C Siendo n el número de agregación y g_{mic} denota el número medio de esta distribución. (- micelas esféricas; - micelas elipsoidales; - micelas esferocilíndricas)	54
A2.1. Norma ASTM D3359	77

Lista de Abreviaciones

CMC Concentración crítica micelar

SDS Sodium lauryl sulfate

CTAB Hexadecyltrimethylammonium bromide

DGME Decaethylene Glycol Monododecyl Ether

Lista de Símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad
T	Temperatura	K
σ	Tensión interfacial	mNm^{-1}
γ	Tensión superficial	mNm^{-1}
P	Presión ejercida por el flujo de gas	bar
r_n	radio	mm
Π	Presión de la superficie	bar
$\Delta\mu_g^0$	Diferencia de potencial químico estándar	$Jmol^{-1}$
k_B	Constante de Boltzmann	JK^{-1}
T	Temperatura absoluta	K
N	Número de segmento de la cadena hidrocarbonada	-
L	Longitud de un segmento	\AA
l_s	Longitud del surfactante	\AA
V_s	Volumen del surfactante	\AA^3
$n_{c,tail}$	Número de carbonos en la cola	-
b	Radio del eje semimayor	\AA
a	Número de moléculas de surfactante	-
a_0	Contribución de la energía de interfaz	$J m^{-2}$
σ_{tail}^{VL}	Tensión interfacial vapor líquido del alcano puro	mNm^{-1}
σ_{0W}^{VL}	Tensión interfacial vapor líquido del agua pura	mNm^{-1}
a_p	Área transversal del grupo de cabeza polar	\AA^2
x	Fracción molar de tensioactivo en solución acuosa	-
g_n	Media del número de agregación	-
γ^*	Tensión interfacial modificada	mNm^{-1}
C^*	Concentración de surfactante modificada	$mol m^{-3}$
γ^{max}	Tensión interfacial máxima	mNm^{-1}
C^{max}	Concentración máxima de surfactante	$mol m^{-3}$

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Los agentes tensoactivos o surfactantes se aplican en prácticamente todas las industrias químicas, como la industria petrolera, minera, alimentos, fabricación de celulosa y papel, telas, etc.

Sin embargo, para poder elegir la molécula adecuada para una aplicación específica, es esencial comprender los fenómenos básicos que intervienen en cualquiera de estas aplicaciones.

Los surfactantes son moléculas anfipáticas que constan de una porción hidrofóbica no polar unida a una porción polar o iónica (hidrofílica). La porción hidrofílica puede, por tanto, ser no iónica, iónica o anfótera. El grado de adsorción del tensoactivo en la interfaz depende de la estructura del tensoactivo y de la naturaleza de las dos fases que se encuentran en la interfaz.

Por lo tanto, es esencial comprender la fisicoquímica de los surfactantes, sus propiedades inusuales y su comportamiento de fase. Además, la comprensión de los fenómenos básicos que intervienen en la aplicación de los tensoactivos, como la preparación de emulsiones o suspensiones y su posterior estabilización es de vital importancia para llegar a la composición y el control adecuados del sistema en cuestión.

En la industria de la celulosa y el papel, los aditivos surfactantes se utilizan en varias etapas del proceso. En el caso de ARAUCO, en el área de impregnación de papel, los surfactantes se utilizan para ayudar a dispersar y estabilizar los pigmentos y resinas que se aplican en el papel. Estos surfactantes ayudan a reducir la tensión superficial del líquido que se aplica sobre el papel, lo que permite una distribución uniforme del pigmento y la

resina en toda la superficie del papel. Esto es esencial para lograr una calidad consistente en el producto final.

Después de la impregnación, el papel se prensa en las caras del tablero y se somete a altas temperaturas y presiones para crear los tableros melaminizados. En este proceso, los aditivos surfactantes también se utilizan para ayudar a dispersar las partículas de melamina y otros componentes en el papel, lo que permite una distribución uniforme de los materiales y una adhesión adecuada al sustrato.

La comprensión de la fisicoquímica de los surfactantes y su comportamiento de fase es esencial para elegir el aditivo adecuado para cada etapa del proceso y asegurar la calidad consistente del producto final.

1.2. Motivación y Alcance

La motivación que impulsa esta investigación surge de la necesidad de evaluar una mejora al proceso de impregnación de papel a través de la comprensión de las propiedades fisicoquímicas de los aditivos usados en el proceso. Este estudio se origina en el interrogante de si es posible discernir un enfoque más eficaz para establecer la concentración óptima de aditivos en el ámbito de la impregnación de papel. La conexión con esta problemática se identificó al trabajar en dicho entorno y observar cómo los operadores ajustaban las cantidades de aditivos en función de las circunstancias diarias. Estas variaciones carecían de una base sólida, ya que la receta proporcionada por el proveedor originalmente estaba diseñada para condiciones atmosféricas y operativas que difieren de las específicas de la planta en cuestión. Este desajuste entre la receta genérica y las circunstancias reales generó una inquietud y fomentó un análisis más exhaustivo de este escenario particular en la planta TENO ARAUCO.

El objetivo de esta tesis es evaluar los surfactantes a través de una serie de pruebas, incluyendo la tensión interfacial, la concentración micelar crítica (CMC), el ángulo de contacto, y las pruebas de calidad del producto final. Las pruebas de calidad del producto final se realizarán para evaluar el comportamiento frente al vapor de agua, el control cerrado superficial de los tableros laminados, el control de la dureza superficial de los tableros laminados, y la resistencia a la abrasión de los tableros laminados. Los resultados de estas pruebas se utilizarán para mejorar el proceso productivo del proceso de impregnación de papel.

En el horizonte de futuros trabajos, queda la posibilidad de examinar los surfactantes

en términos de sus propiedades de mezcla y otros aspectos que puedan contribuir a una comprensión más completa de su rendimiento en este contexto industrial. Además, se considera la perspectiva de futuros trabajos en el laboratorio de Arauco, así como la posibilidad de colaboraciones con la universidad para ampliar y profundizar el conocimiento en esta área.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Surfactantes

La palabra "Surfactante" proviene de la abreviación del término en inglés "surface active agent", que se utiliza para caracterizar las sustancias activas en la superficie. Estas sustancias reducen la tensión superficial entre un líquido y el aire, así como la tensión interfacial en sistemas de dos fases, debido a su absorción en la superficie o interfase, respectivamente.

Su estructura comúnmente consiste en una región hidrofóbica (no polar) y una región hidrofílica (polar). Debido a la diferencia en la longitud de la cadena carbonada y del núcleo, se hace referencia a la región hidrofílica como la "cabeza" y a la hidrofóbica como la "cola".

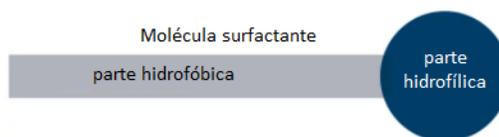


Figura 2.1: Estructura de un surfactante [5]

La mayoría de las veces, los surfactantes se disuelven en agua y su región hidrofóbica se orienta hacia afuera, tal como se muestra en la imagen:

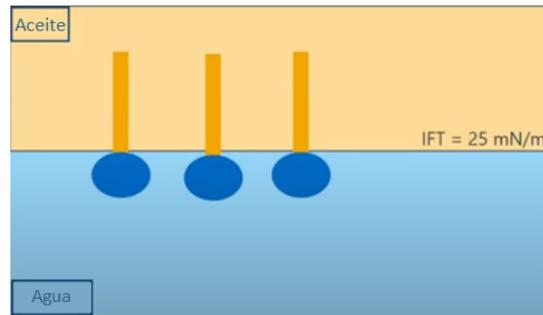


Figura 2.2: Tensión interfacial entre agua y aceite en presencia de surfactante [2]

2.1.1. Clasificación de Surfactantes

Dependiendo si la naturaleza de la porción hidrofílica de la estructura, los surfactantes se pueden clasificar en 4 grupos principales:

1. Aniónicos
2. Catiónicos
3. No Iónicos
4. Anfóteros (Zwitterionic)

2.1.1.1. Aniónicos

Estos son los más usados en la industria, debido a su bajo costo comercial. Son usados en casi todos los tipos de detergentes en el comercio. La fórmula general de los diferentes surfactantes aniónicos es la siguiente:

1. Carboxilatos: $C_n H_{2n+1} COO^- X$

La cadena alcalina tiene insaturaciones. Mayormente usado en jabones debido a su bajo costo, son bastante biodegradables y tienen bajos niveles de toxicidad. Son compatibles con compuestos inorgánicos y son buenos emulsionantes.

2. Sulfatos: $C_n H_{2n+1} OSO_3^- X$

Son usados para producir alcohol sulfatado. Sin embargo, debido a su inestabilidad química se ocupan los sulfonatos que son químicamente estables.

3. Sulfonatos: $C_n H_{2n+1} SO_3^- X$

Son bastante estables debido a que el átomo de carbono está directamente unido con la cadena alcalina. Son bastante buenos para la preparación de micro emulsiones

de agua en aceite (*W/O*).

4. Fosfatos: $C_n H_{2n+1} OPO(OH)O^- X$

Son usados en la industria de los metales debido a sus propiedades anticorrosivas.

Con $n=8-16$ átomos X es Na^+

2.1.1.2. Catiónicos

Los surfactantes catiónicos suelen ser solubles en agua cuando tienen una cadena alquílica. Estos compuestos son bastante resistentes a los cambios de pH (ácido o básico), químicamente estables y tienen una buena tolerancia a los electrolitos. Si tienen dos cadenas alquílicas, son solubles en hidrocarburos.

El uso principal de los surfactantes catiónicos es como agentes anticorrosivos, para el método de flotación de metales, dispersantes de pigmentos inorgánicos, acondicionador para el pelo y como bactericidas para las plantas. Esto se debe a su tendencia de absorberse en superficies con carga negativa.

2.1.1.3. No Iónicos

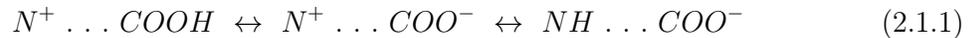
Las propiedades generales y comportamiento de los agentes tensoactivos se deben al carácter dual de sus moléculas (grupo hidrófilo y lipófilo). El grupo hidrófilo ejerce un efecto solubilizante y tiende a llevar a la molécula a disolución completa. El grupo hidrófobo, en cambio, debido a su insolubilidad tiende a contrarrestar la tendencia del otro, concentrándose en la interfase.

En el caso de la industria de pulpa y papel estos se ocupan en el proceso de lavado de pulpa, desentintado de papel, humectantes y suavizantes.

2.1.1.4. Zwitterionic

Estos surfactantes se conocen como anfóteros ya que contienen grupos aniónicos y catiónicos en su estructura molecular. Su característica principal es que su comportamiento varía dependiendo del pH de la solución. En soluciones ácidas, la molécula adquiere una carga positiva y se comporta como un surfactante catiónico, mientras que en soluciones alcalinas adquiere carga negativa y se comporta como un surfactante aniónico. El punto isoelectrico de la molécula es el pH específico en el cual la molécula adopta un comportamiento particular, y en este punto la partícula muestra su máxima actividad. El comportamiento

de un surfactante anfótero se puede ejemplificar de la siguiente manera:



En donde el compuesto de la izquierda se forma con pH menor a 3 (ácido), en la mitad el compuesto está en su punto isoeléctrico y finalmente a la derecha está el compuesto que se forma con pH mayor a 6 (alcalino). Estos surfactantes presentan buenas propiedades dermatológicas por lo que son utilizados en shampoos y cosméticos.

Los surfactantes tienen la capacidad de formar micelas, las cuales se originan por la reducción de la superficie de contacto entre la cadena hidrocarbonada y el agua, disminuyendo la energía libre del sistema. Cuando las micelas se encuentran en un solvente polar, la parte hidrofóbica se ubica en el interior de la micela, mientras que la parte hidrofílica se ubica en el exterior. Asimismo, las micelas pueden encapsular compuestos apolares en su interior, en el caso de que el solvente sea polar.

Los surfactantes tienen bastantes aplicaciones en la industria química como en los detergentes, pinturas, cosméticos, farmacéutica, agroquímicos, plásticos, entre otros. También son muy importantes en la recuperación del aceite: El uso de surfactantes hace que el aceite se mezcle con el agua, y así se pueda extraer más aceite de los suelos.

2.1.2. Comportamiento en fases (Propiedades fisicoquímicas)

Una de las características más importantes de los surfactantes es el cambio en sus propiedades ^a sobre una concentración crítica. La Figura 2.3 muestra la gráfica de varias propiedades físicas (presión osmótica, turbidez, solubilidad, resonancia magnética, tensión superficial, conductividad y difusividad) en función de la concentración de surfactante iónico.

En bajas concentraciones la mayoría de las propiedades se asemejan al comportamiento de un electrolito simple, excepto la tensión superficial, pues luego de la concentración crítica se mantiene estable.

La concentración donde ocurre este fenómeno es llamado concentración crítica micelar (CMC) y cada molécula de surfactante tiene su CMC distinto, dependiendo de la temperatura y de la concentración de electrolitos. Aun así, independiente del tipo de surfactante, **la CMC disminuye al aumentar la cadena de hidrocarburos del surfactante.**

referencia

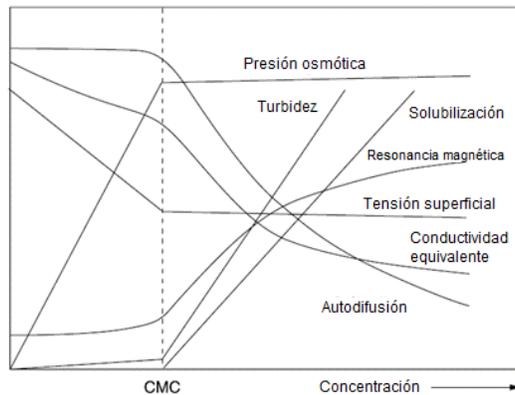


Figura 2.3: Cambios de un rango de propiedades fisicoquímicas en función de la concentración de surfactante [1]

2.1.2.1. Tensión superficial y formación de micelas

La tensión superficial se origina debido a que, desde el punto de vista energético, es más favorable que las moléculas líquidas se encuentren en la fase homogénea en lugar de en una superficie o interfaz. Sin embargo, gracias a la estructura de los surfactantes, la presencia de moléculas líquidas en la interfaz se vuelve más ventajosa, lo que conduce a una reducción en el trabajo necesario para formar la superficie (también conocida como tensión superficial) cuando los tensioactivos están presentes.

Cuando los tensioactivos se encuentran en una superficie, se disponen en una capa de manera que la región hidrofóbica esté en contacto con la superficie y la región hidrofílica quede expuesta al medio acuoso. Cuando la cantidad de tensioactivo presente en la superficie alcanza cierto nivel crítico, las moléculas de tensioactivo comienzan a formar estructuras esféricas llamadas micelas en la fase líquida circundante. Las micelas pueden incorporar sustancias que no son solubles en el líquido, como el aceite en agua, ya que su estructura interna hidrofóbica proporciona un entorno adecuado para alojar estas moléculas. Este proceso es fundamental en la acción de los tensioactivos, como en el caso de los detergentes.

¿?

cómo relaciona con la estructura de la capa?

Una descripción termodinámica del proceso de formación de micelas debe tener en cuenta las contribuciones electrostáticas e hidrofobas a la energía de Gibbs del sistema. El agua y los hidrocarburos no son miscibles debido a la naturaleza hidrofoba de los hidrocarburos. La solubilidad limitada de especies hidrofobas en agua puede atribuirse a la energía de Gibbs hidrofóbica, también conocida como energía de Gibbs de transferencia. Esta energía se define como la energía de Gibbs necesaria para transferir un soluto de hidrocarburo

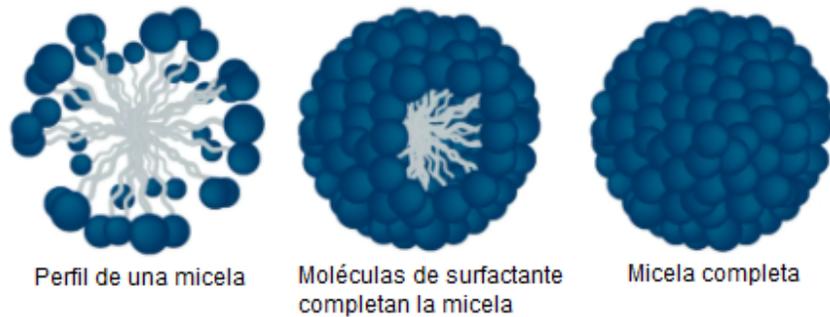


Figura 2.4: Representación de una micela [5]

desde un disolvente de hidrocarburo al agua.

2.1.2.2. Concentración Micelar Crítica (CMC)

La concentración de transición a la que comienzan a formarse las micelas se describe como la concentración micelar crítica (CMC). La CMC es una característica importante de los tensioactivos.

Por encima del valor de CMC, las propiedades fisicoquímicas del surfactante cambian drásticamente, lo que indica que se está llevando a cabo un proceso de asociación altamente cooperativo.

Los valores de CMC son importantes en prácticamente todos los tensioactivos de la industria de procesos. Aplicaciones, desde el procesamiento de minerales hasta la formulación de productos para el cuidado personal y alimentos, sistemas de administración de fármacos y nuevas tecnologías de remediación de tensioactivos. En estos procesos, el tensioactivo debe estar presente normalmente en una concentración superior a la CMC porque el mayor efecto del tensioactivo ya sea en la reducción de la tensión interfacial, emulsificación o estabilización de la suspensión, se logra cuando está presente una concentración significativa de micelas.

La concentración micelar crítica (CMC) es un valor de concentración a partir del cual la absorción de tensioactivos en interfaces aumenta muy poco. Es decir, la CMC representa la concentración máxima de tensioactivo en una solución que puede absorberse en las interfaces, como se muestra en la siguiente figura.

redacción...
La Fig 2.3 muestra que se estabilizan

redacción

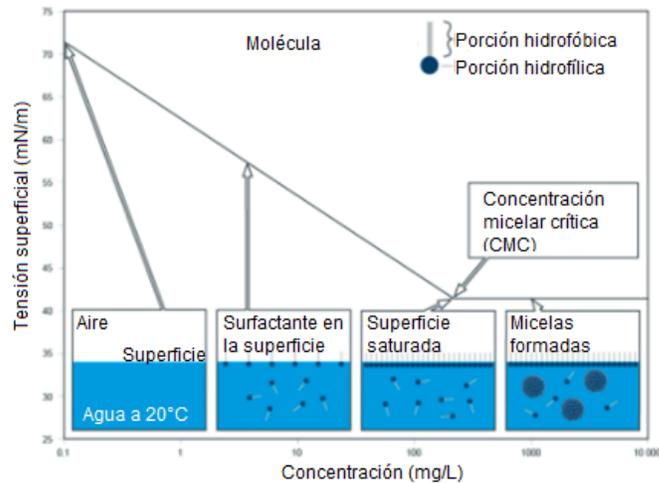


Figura 2.5: Tensión superficial de un surfactante al incrementar su concentración [5]

Factores que afectan la concentración micelar crítica:

Entre los factores que afectan la CMC se pueden distinguir: presencia de aditivos orgánicos, temperatura, pH, tipo y concentración de los electrolitos añadidos, entre otros.

Dentro de los más comunes se encuentran:

■ Temperatura del medio:

En términos generales, la concentración crítica micelar en los surfactantes iónicos se ve afectada por la temperatura, no solo en soluciones agua-alcohol, sino también en otros sistemas solventes, como soluciones de ésteres o hidrocarburos. Se ha observado que la CMC disminuye al principio y luego aumenta con la temperatura. Esto se debe al aumento del movimiento y la desorganización de las moléculas de agua cercanas al grupo apolar a medida que la temperatura aumenta, lo que desfavorece la formación de micelas.

■ pH del medio acuoso:

El efecto del pH en el surfactante depende de cómo el surfactante reaccione a la presencia de iones H^+ o H^- . En surfactantes catiónicos la CMC aumenta en medios ácidos y disminuye en básicos. En aniónicos se requiere un medio levemente básico para formar micelas. En no iónicos el pH no influye en la CMC. En anfóteros el pH determina el comportamiento del surfactante, ya sea catiónico en pH ácido o aniónico en pH alcalino.

■ Presencia de aditivos orgánicos:

Cuando se agregan alcoholes a un sistema de surfactantes, se produce una disminución en la concentración micelar crítica. Los alcoholes, al ser moléculas orgánicas, interactúan con las cabezas hidrófilas y las colas hidrófobas de los surfactantes, alterando la estructura de las micelas y reduciendo la energía necesaria para formarlas. La magnitud de esta disminución depende del peso molecular y la ramificación molecular del alcohol, así como de su concentración en la solución. Por ejemplo, al agregar alcoholes de cadena larga como el octanol, se produce una disminución significativa en la CMC, mientras que al agregar alcoholes de cadena corta como el metanol, el efecto es menos pronunciado.

■ Adición de electrolitos:

Al agregar electrolitos, se reducen las repulsiones electrostáticas entre las cabezas de los tensioactivos haciendo que sean más hidrofóbicos. Esto provoca un aumento de la aparición de micelas, disminuyendo la CMC.

La CMC a menudo exhibe una dependencia débil tanto de la temperatura como de la presión, aunque se ha observado que algunos CMC de tensioactivos aumentan notablemente con temperatura superior a 100 °C.

La adición de electrolitos a soluciones de tensioactivos iónicos da como resultado una dependencia lineal bien establecida de $\log(\text{CMC})$ de la concentración de sal agregada.

2.1.2.3. Krafft, Cloud Point o Pour Point

Las solubilidades de los tensioactivos formadores de micelas muestran un fuerte aumento por encima de una determinada temperatura, denominado punto de Krafft. Debajo el punto de Krafft, la solubilidad del tensioactivo es demasiado baja para la micelación, por lo que la solubilidad solo determina la concentración de monómero tensioactivo. Por encima del punto Krafft se puede dispersar una cantidad relativamente grande de tensioactivo en micelas y la solubilidad aumenta enormemente. Los tensioactivos no iónicos no presentan puntos Krafft; su solubilidad disminuye con el aumento de temperatura y estos tensioactivos pueden comenzar a perder sus propiedades tensioactivas por encima de una temperatura de transición denominada punto de enturbiamiento (cloud point).

Esto ocurre porque por encima del punto de enturbiamiento hay una fase rica en tensioactivos de micelas; la transición es visible como un marcado aumento de la turbidez de la dispersión.

Los estudios sugieren que un aumento en el punto de enturbiamiento puede atribuirse a la carga superficial de la micela, por lo que el aumento de la repulsión electrostática reduce la coalescencia de las micelas responsable de la nubosidad.

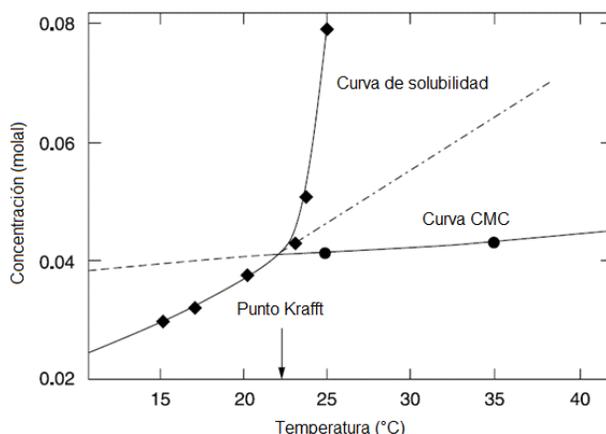


Figura 2.6: Solubilidad y CMC versus Temperatura de SDS en agua [1]

La figura 2.6 muestra la variación del punto CMC con respecto a la temperatura. Se ve que la CMC aumenta gradualmente con la temperatura en todo el rango. Se ve que la solubilidad aumenta considerablemente a los 22 °C. En este punto en particular la solubilidad es igual al CMC (las curvas se intersectan). Este punto es llamado “Krafft point” y es distinto para cada surfactante. En este punto se encuentran en equilibrio el surfactante sólido hidratado, las micelas y monómeros. Es por esto que el “Krafft point” también es un punto triple. El punto Krafft aumenta a medida que aumenta la cadena alquílica del surfactante o al agregar electrolitos. Este punto Krafft es bastante importante dado que, como se menciona anteriormente, la solubilidad aumenta considerablemente en el punto Krafft, por lo que bastantes industrias requieren de un punto Krafft bajo para sus aplicaciones.

El punto de fluidez de un líquido o pour point es la temperatura por debajo de la cual el líquido pierde sus características de fluidez. Los puntos de fluidez de los tensoactivos no iónicos son una indicación semicuantitativa de la liquidez, que es una propiedad importante para el almacenamiento y la manipulación.

2.1.2.4. Ángulo de Contacto

Se observa que, en la mayoría de los casos, un líquido colocado sobre un sólido no lo moja, sino que permanece como una gota que tiene un ángulo de contacto definido entre las fases líquida y sólida. Como se ilustra en la Figura 2.7:

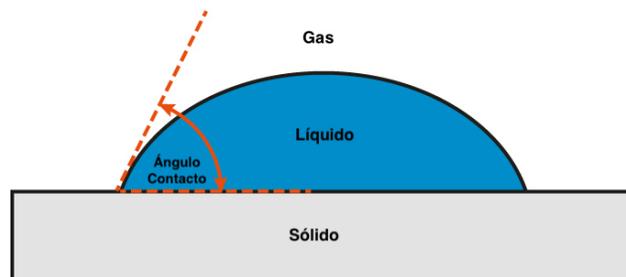


Figura 2.7: Ángulo de contacto [6]

Cuando un líquido entra en contacto con un sólido, se produce un cambio en la energía libre superficial. Este cambio se debe al desplazamiento del líquido, que provoca un cambio en el área del sólido cubierto. El cambio en la energía libre superficial, representado por la variable ΔG^s , se puede describir utilizando la ecuación de Young-Dupré. Dicha ecuación proporciona una relación entre la energía libre superficial, la tensión superficial del líquido y la energía de la superficie del sólido. La ecuación se utiliza ampliamente para calcular la energía libre superficial de un sólido en contacto con un líquido, lo que es fundamental para comprender el comportamiento de los surfactantes y otros aditivos en diversas aplicaciones industriales[42]:

$$\Delta G^s = \Delta A(\gamma_{SL} - \gamma_{SV^0}) + \Delta A\gamma_{LV}\cos(\theta - \Delta\theta)$$

donde γ_{SL} es la tensión interfacial entre la superficie sólida y el líquido, γ_{SV^0} es la tensión interfacial entre el sólido y el gas a la presión de vapor, y finalmente γ_{LV} es la tensión interfacial entre el líquido y el gas.

En el equilibrio, las fuerzas que actúan sobre la superficie son iguales y opuestas, por lo que $\Delta G^s = 0$:

$$\gamma_{LV}\cos(\theta) = \gamma_{SV^0} - \gamma_{SL}$$

¿puede decir algo respecto al balance de fuerzas-tensiones en la dirección vertical?

En el área de la superficie, la mojabilidad es un fenómeno importante que se refiere a la capacidad de un líquido para extenderse sobre una superficie sólida. En este contexto, uno de los factores importantes que afecta la mojabilidad es la heterogeneidad de la superficie. Estos conceptos se explicarán en la siguiente sección.

1. Mojabilidad

La mojabilidad se define como la tendencia de un fluido a extenderse o adherirse a una superficie sólida en presencia de otros fluidos inmiscibles.

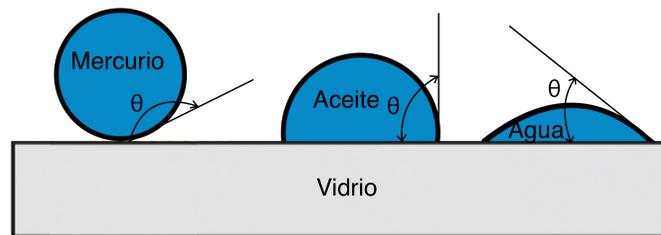


Figura 2.8: Ángulo de contacto de mercurio, aceite y agua [6]

El concepto de mojabilidad se ilustra en la Figura 2.8. Se colocan pequeñas gotas de tres líquidos (mercurio, aceite y agua) en una placa de vidrio limpia. Las tres gotas se observan desde un lado como se ilustra en la Figura 2.8. Se observa que el mercurio mantiene una forma esférica, la gota de aceite desarrolla una forma aproximadamente semiesférica, pero el agua tiende a esparcirse por la superficie del vidrio, por lo cual su mojabilidad es mayor.

En esta investigación se medirá la mojabilidad a través del ángulo de contacto (Goniometría) para determinar a partir de qué concentración el aditivo humectante cumple el propósito de disminuir al máximo el ángulo de contacto.

2. Histéresis del ángulo de contacto en superficies heterogéneas

El fenómeno de la histéresis del ángulo de contacto ha sido reconocido y estudiado durante mucho tiempo. Numerosos investigadores han estudiado su origen de forma experimental y teórica [9, 10]. La observación general es que el ángulo de contacto medido para un líquido que avanza a través de una superficie supera al de uno que se aleja de la superficie. Un ejemplo cotidiano se encuentra en el aspecto de una gota de lluvia que se desplaza por el cristal de una ventana o por una superficie inclinada [11-13]. Esta diferencia, conocida como histéresis del ángulo de contacto, puede ser bastante grande, hasta 50° para el agua sobre superficies minerales. Esto puede ser muy importante en los procesos de recubrimiento. Aunque no se entiende del todo, la histéresis de la línea de contacto se atribuye generalmente a la rugosidad de la superficie, la heterogeneidad de la superficie, las impurezas de la solución que se adsorben en la superficie, o al hinchamiento, reordenación o alteración de la superficie por el disolvente. La inclinación local de una superficie rugosa o la variación local de las energías interfaciales en una superficie heterogénea pueden hacer variar el ángulo de contacto. Todavía no está claro si, al igual que otros fenómenos históricos (como los que se dan en el magnetismo) la histéresis del ángulo de contacto puede describirse mediante transiciones irreversibles o "saltos" entre dominios de estados de equilibrio [14].

Superficies heterogéneas: Las superficies con heterogeneidades debidas a impurezas o policristalinidad en pequeñas escalas de longitud pueden ser modeladas con la ecuación de Cassie [15]

$$\cos(\theta_c) = f_1 \cos(\theta_1) + f_2 \cos(\theta_2) \quad (2.1.3)$$

Donde f_1 y f_2 son las fracciones de la superficie ocupada por los tipos de superficie que tienen ángulos de contacto θ_1 y θ_2 .

Rugosidad: El efecto de la rugosidad de la superficie sobre el ángulo de contacto fue modelado por varios autores hace unos 50 años. La idea básica era tener en cuenta la rugosidad a través de r , la relación entre el área real y la proyectada. Así, $\Delta A_{SL} = r \Delta A_{SLaparente}$. Luego la ecuación de Young [42] queda:

$$\cos(\theta_{rugoso}) = r \cos(\theta_{real}) \quad (2.1.4)$$

Por lo que los ángulos menores de 90° disminuyen por la rugosidad, mientras que si θ es mayor de 90° , el ángulo aumenta.

2.2. Teoría Termodinámica Micelar (MTT)

En términos generales, cuando las moléculas de un compuesto anfílico, como un surfactante, se añaden al agua, forman agregados de todas las formas y tamaños posibles si se supera una concentración crítica del compuesto anfílico en la solución acuosa. Esta concentración crítica se conoce como concentración micelar crítica o CMC. Para comprender el comportamiento de estas mezclas, es importante describir las estructuras formadas, la distribución de tamaños de los agregados y su CMC. Estas propiedades se predicen utilizando la teoría termodinámica micelar (MTT) propuesta originalmente por Tanford [28] y extendida, refinada y aplicada por varios autores (ver Refs. Nagarajan y Ruckenstein [29], Blankschtein et al. [30], Puvvada y Blankschtein [31], Nagarajan y Ruckenstein [32], Nagarajan [33], Enders y Häntzschel [8] y sus referencias). Para calcular la CMC experimental se utiliza una función de hipérbola, que proporciona valores precisos y reproducibles. En esta sección se describen tanto la MTT como el uso de la función hipérbola.

En el marco del MTT, la distribución micelar de un tensioactivo no iónico se calcula a partir de la diferencia de potencial químico estándar, $\Delta\mu_g^0$, entre una molécula de tensioactivo en un agregado de tamaño g y otra en estado de dispersión simple. Para el tipo de tensioactivos explorados en este trabajo, $\Delta\mu_g^0$ puede describirse como una suma de cuatro contribuciones:([31], [30], [32], [33])

$$\left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_b T}\right) = \left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_b T}\right)_{tr} + \left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_b T}\right)_{def} + \left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_b T}\right)_{ster} + \left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_b T}\right)_{int} \quad (2.2.1)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, y los subíndices denotan la contribución energética de los grupos metileno y metilo en una cola alifática, tr ; deformación, def , estérica, $ster$, e interfase, int .

Ruckenstein [32] y Nagarajan [33] propusieron evaluar la contribución tr en función del número de carbonos de la cola del tensioactivo, n_c , tail , y de la temperatura, $T[K]$, mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_bT}\right)_{tr} &= \left(3,38 \ln(T) + \frac{4064}{T} - 44,13 + 0,02595T\right) + \\ &(n_{c,tail} - 1) \left(5,85 \ln(T) + \frac{896}{T} - 36,56 + 0,0056T\right) \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

La contribución energética de la deformación es función de la forma geométrica de la micela, que tiene en cuenta los correspondientes parámetros de empaquetamiento ([32], [33]). En este trabajo, se consideran tres geometrías diferentes (es decir, esférica, elipsoidal y esferocilíndrica), donde la correspondiente contribución energética de la deformación viene dada por:

$$\left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_bT}\right)_{def} = \frac{9\pi^2}{240NL^2} \left(\frac{3gV_s}{4\pi}\right)^{2/3} : \text{micelas esféricas} \quad (2.2.3)$$

$$\left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_bT}\right)_{def} = \frac{9\pi^2 l_s V_s}{80NL^2 a} : \text{micelas elipsoidales} \quad (2.2.4)$$

$$\left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_bT}\right)_{def} = \frac{g_{cyl}/g}{5\pi^2 r_c^2 / 80NL^2 a} + \frac{g_{cap}/g}{9\pi^2 l_s V_a / 80NL^2 a} : \text{micelas esferocilíndricas} \quad (2.2.5)$$

En estas últimas expresiones, N es el número de segmento de la cadena hidrocarbonada. L es la longitud de un segmento, que se fija en $4,6 \text{ \AA}$ [31]. Para las micelas elipsoidales y esferocilíndricas, N y L se relacionan con la longitud de la cola del surfactante, l_s , mediante: $N = l_s/L$, y esta última puede calcularse utilizando el valor de $n_{c,tail}$: $l_s/\text{\AA} = (1,5 + 1,265n_{c,tail})$. V_s es el volumen molecular de la cola del surfactante, y es función de n_c y T : $V_s/\text{\AA}^3 = [54,6 + 0,124(T - 298)] + (n_{c,tail} - 1)[26,9 + 0,0146(T - 298)]$, y g representa el número de agregación. En las ecuaciones 2.2.4 y 2.2.5, a representa el área del grupo de cabeza, que se calcula a partir de consideraciones geométricas. Concretamente, a para la micela elipsoidal viene dada por la siguiente expresión:

$$a = \frac{2\pi l_s^2}{g} \left[1 + \frac{\sin^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{l_s}{b}\right)^2} \right)}{\left(\frac{l_s}{b}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{l_s}{b}\right)^2}} \right] \quad (2.2.6)$$

donde l_s denota el radio del eje semiminor y b es el radio del eje semimayor, que viene dado por $b = (3gV_s/4\pi l_s^2)^{1/2}$. Para el caso de las micelas esferocilíndricas, a está relacionado con el número de moléculas de surfactante presentes en la parte cilíndrica, g_{cyl} , el número de moléculas de surfactante presente en las tapas, g_{cap} , el área correspondiente de la parte cilíndrica, a_{cyl} , y el área de la tapa, a_{cap} , mediante la siguiente media:

$$a = \frac{g_{cyl}}{g} a_{cyl} + \frac{g_{cap}}{g} a_{cap} \quad (2.2.7)$$

Donde:

$$a_{cyl} = \frac{2V_s g_{cyl}}{r_c n_{cyl}} ; a_{cap} = \frac{24\pi r_s (2r_s - H)}{n_{cap}} \quad (2.2.8)$$

$$g_{cyl} = g - g_{cap} ; g_{cap} = \frac{2\pi(4r_s^3 - H^2(3r_s - H))}{3V_s} \quad (2.2.9)$$

donde H viene dado por la relación: $H = r_s[1 - (1 - \sqrt{1 - (r_c/r_s)^2})]$.

En las estas expresiones el radio de la parte cilíndrica, r_c , y la parte cilíndrica, r_s , se obtienen a partir de las condiciones: $\left(\frac{\partial \Delta \mu_g^0}{\partial r_c}\right) r_s = \left(\frac{\partial \Delta \mu_g^0}{\partial r_s}\right) r_c = 0$.

La contribución energética de los efectos de repulsión estérica entre las cabezas surfactantes presentes en la corona micelar se expresa como: ([32], [33])

$$\left(\frac{\Delta \mu_g^0}{k_b T}\right)_{ster} = -\ln\left(1 - \frac{a_p}{a}\right) \quad (2.2.10)$$

donde a_p es el área transversal del grupo de cabeza polar, que es función de la temperatura, [35] $a_p = 30,35(1 - 0,0167169(T - 303) - 0,000320338(T - 303)^2)$, y el área del grupo de cabeza, a , es igual a $a = 3gV_s^2/4\pi$ para micelas esféricas, mientras que la ecuación 2.2.8 proporciona las expresiones correspondientes para micelas elipsoidales y esferocilíndricas. Finalmente, la contribución energética de la interfase se expresa como: ([32], [33])

$$\left(\frac{\Delta\mu_g^0}{k_bT}\right)_{int} = \frac{\sigma_{agg}}{k_bT}(a - a_0) \quad (2.2.11)$$

En la 2.2.11, a_0 es la contribución de la energía de interfase ($a_0 = L^2$) [31], a se define previamente, y σ_{agg} es la tensión interfacial núcleo-agua agregada, que puede calcularse aproximadamente a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_{agg} = \sigma_{tail}^{VL} + \sigma_{OW}^{VL} - 1,1\sqrt{\sigma_{tail}^{VL}\sigma_{OW}^{VL}} \quad (2.2.12)$$

donde σ_{tail}^{VL} y σ_{OW}^{VL} son la tensión interfacial vapor-líquido del alcano puro y del agua, respectivamente. En este se estiman ambas tensiones interfaciales utilizando las siguientes correlaciones:

$$\sigma_{tail}^{VL}/mNm^{-1} = 35 - 325(M_{w,tail})^{-2/3} - 0,098(T - 298) \quad (2.2.13)$$

$$\sigma_{OW}^{VL}/mNm^{-1} = 72 - 0,016(T - 298) \quad (2.2.14)$$

donde $M_{w,tail}$ denota el peso molecular de la cola, que se calcula utilizando el valor de $n_{c,tail}$: $M_{w,tail}/kgmol^{-1} = [14,0268(n_{c,tail} - 1) + 15,0347]10 - 3$. En resumen, las ecuaciones 2.2.1 a 2.2.14 proporcionan una vía para calcular la distribución micelar de un surfactante no iónico a partir de $\Delta\mu_g^0$ en función de g para una temperatura T y una configuración geométrica de la micela dadas (es decir, esférica, elipsoidal y esferocilíndrica). A partir de los resultados de $\Delta\mu_g^0 - g$, será posible definir la configuración de micela más estable. El tamaño de las micelas puede calcularse a partir de su geometría y temperatura.

Concretamente, para el caso de las micelas esféricas, el tamaño se caracteriza por los radios, r_s , que viene dado por $r_s = (3gV_s/4\pi)^{1/3}$. Las micelas elipsoidales se caracterizan por el tamaño de l_s y b , que se describieron anteriormente. El tamaño de las micelas esferocilíndricas se define por tres términos, el largo cilíndrico, l_{cyl} , que viene dado por: $l_{cyl} = (V_s g_{cyl})/(\pi r_c^2)$, y los dos radios: r_c , y r_s , que se definieron previamente. A partir de estos últimos resultados, y considerando el principio de equilibrio químico múltiple [36] entre agregados de diferentes tamaños y monómeros, (es decir, $g = g_1$), es posible obtener la siguiente expresión para la distribución del tamaño micelar: ([30], [31], [32])

$$x = \sum_{g=1}^{\infty} g x_g = \sum_{g=1}^{\infty} g \exp \left[g \left(1 + \ln x - \frac{\Delta\mu_g^0}{k_b T_{\text{mín}}} \right) - 1 \right] \quad (2.2.15)$$

donde x , x_g , x_1 denotan la fracción molar de surfactante en la solución acuosa, de los agregados y del monómero, respectivamente. El subíndice *min* indica que esta evaluación se realiza en la configuración más estable. Resolviendo la Ec. 2.2.15, para cada valor de x , se calculan g y x_1 . Finalmente, el número medio de esta distribución, g_n , puede calcularse a partir de la expresión:

$$g_n(x_1) = \frac{\sum_{g=1}^{\infty} g x_g(x_1)}{\sum_{g=1}^{\infty} x_g(x_1)} \quad (2.2.16)$$

A partir de la Ec. 2.2.16, la concentración micelar crítica x_{CMC} de un surfactante se define como el punto de inflexión de $g_n(x_1^{CMC})$:

$$\frac{\partial^2 g_n(x_1^{CMC})}{\partial (x_1^{CMC})^2} = 0 \quad (2.2.17)$$

2.3. Estimación de la concentración micelar crítica a partir de datos de tensiometría

La práctica más común para estimar la concentración micelar crítica (CMC), en una condición isotérmica, a partir de la tensiometría es mediante la intercepción de dos funciones lineales. La primera línea va de baja a alta concentración y describe linealmente la reducción de la tensión interfacial de la mezcla a medida que aumenta la concentración. La segunda línea va de alta a baja concentración en el intervalo en el que la tensión interfacial es constante. Este procedimiento se acepta tradicionalmente, pero a veces la definición de la intercepción es ambigua y depende de la elección de los rangos de a y b de cada línea.

sobresimplificación

ambigua no es! depende de lo complejo que es el comportamiento de algunos surfactantes, especialmente industriales

Para evitar este procedimiento, la CMC puede encontrarse mediante la regresión de una versión adaptada de la función de hipérbola de la temperatura de transición vítrea, [37]. Para la aplicación CMC, esta función puede ser expresada por la siguiente expresión:

corregir cita

$$\gamma^* = \gamma_0^* - a(C^* - C_0^*) - b\left(\frac{1}{2}C^* - C_0^*\right) + \sqrt{\left(\frac{C^* - C_0^*}{2}\right)^2 + \exp(c)} \quad (2.18)$$

γ^* y C^* son la tensión interfacial modificada y la concentración de tensioactivo, respectivamente. (γ_0^*, C_0^*) es el centro de la hipérbola, y a , b y c son parámetros constantes. En esta versión adaptada de la función de hipérbola de la temperatura de transición vítrea, γ^* y C^* se definen como $\gamma_0^* = \gamma_{max} - \gamma$ y $C^* = C_{max} - C$, donde γ_{max} y C_{max} son el valor máximo de la tensión interfacial experimental y la concentración de surfactante, respectivamente. A partir de los valores regresivos de la Ec. 2.2.18, se calcula la CMC a partir de la relación: $C^{CMC} = C_0^* + C_{max}$. En este trabajo, γ_0^* , C_0^* , a , b , c se obtienen mediante regresión no lineal de los datos de tensión interfacial-concentración.

Sería muy bueno que incluyera una gráfica de una rama de hipérbola, indicando ejes, centro, y máximos

Para el trabajo realizado pudo construir una mejor hipótesis... me pregunto cómo la identificación de relaciones interfaciales fundamentales podría ayudar a optimizar el proceso de impregnación del papel? y mirando los resultados cuáles son esas relaciones?

2.4. Hipótesis

La medición de la tensión superficial y la evaluación de los parámetros de mojabilidad, como el ángulo de contacto, permitirán identificar relaciones interfaciales fundamentales en el proceso de impregnación del papel, lo que podría conducir a la optimización de dicho proceso.

2.5. Objetivos

2.5.1. Objetivos Generales

en el objetivo general no aparece la mojabilidad

- Desarrollar y validar una metodología para determinar la concentración crítica micelar (CMC) con surfactantes conocidos de uso industrial considerando el efecto del ángulo de contacto, y empleando la técnica de tensiometría de presión máxima de burbuja.

2.5.2. Objetivos Específicos

- Predecir el comportamiento de los surfactantes no iónicos experimentalmente obtenidos a través de la teoría termodinámica micelar.
- Explorar el impacto del ángulo de contacto en la determinación de la CMC, lo que permitiría mejorar la comprensión de los fenómenos que ocurren en las interfaces líquido-sólido y líquido-gas.
- Perfeccionar el proceso de impregnación de papel de ARAUCO.

Capítulo 3

Metodología Experimental

3.1. Tensiometría

Existen varios métodos para medir la tensión superficial, y el tipo de equipo adecuado depende de la física utilizada en cada uno de ellos. Entre estos métodos se encuentran la placa de Wilhelmy, la gota colgante, el anillo de Du Nouys, la gota giratoria y la presión máxima. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y limitaciones.

El método de presión máxima de burbuja con dos probetas fue desarrollada por Suden en 1922 y desarrollada posteriormente con mayor precisión por Schrödinger con bases y ecuaciones teóricas. Debido a que esta técnica considera dos probetas de distinto diámetro, el experimento se simplifica, puesto que se elimina el efecto hidrostático que presenta el experimento con una probeta. Este último es el que se utilizará en esta investigación, ya que el método de presión máxima de burbuja es más adecuado para medir la tensión interfacial entre dos fases líquidas miscibles.

El procedimiento consiste en formar una burbuja de gas a presión, a través de dos probetas de diámetro conocido, en el líquido al que se le desea medir la tensión superficial. La presión necesaria alcanza un máximo cuando el diámetro de burbuja alcanza el diámetro del capilar (Figura 5.1). En esta medida, supone una burbuja esférica y mojabilidad completa.

El método de la máxima presión de burbuja es ampliamente utilizado debido a su alta precisión. A diferencia de otros métodos, no depende del ángulo de contacto y sólo requiere conocer los radios de los capilares y un gradiente de presión para su aplicación. Estas características lo hacen muy útil y práctico en la medición de tensiones interfaciales.

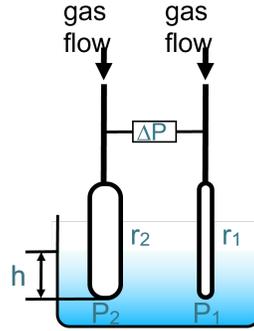


Figura 3.1: Probetas de distinto radio $r_1 \neq r_2$ [4]

En este trabajo se utilizó un tensiómetro de presión diferencial máxima de burbuja modelo PC500-LV fabricado por Sensadyne Inc. (EE.UU.). El método utilizado para medir las tensiones superficiales consiste en preparar una mezcla de los fluidos que se van a analizar mediante la adición de volúmenes apropiados de cada líquido puro. A continuación, se introduce la muestra en el recipiente, donde se calienta hasta la temperatura experimental y se mantiene durante 30 minutos mediante un agitador magnético. A continuación, el nitrógeno de ultra alta pureza (UHP=99,995 %) fluye a través de os probetas de vidrio de diferentes radios de orificio ($r_1 = 0,125 \pm 0,01$ mm y $r_2 = 2,0 \pm 0,01$ mm) y la unidad del sensor traduce la medición de la señal de voltaje (Δv) a una señal de ΔP . La relación entre $\Delta v - \Delta P$ se obtiene mediante la calibración del software de la unidad sensora utilizando dos fluidos de referencia con tensiones interfaciales bien caracterizadas en el rango de mediciones previstas. Para garantizar una alta precisión y reducir los errores de medición, el orificio pequeño se posicionó 2,5 mm por debajo del orificio grande. En este trabajo, utilizamos agua desionizada como fluido de referencia de alta tensión interfacial, mientras que el etanol como fluido de referencia de baja tensión interfacial.

De acuerdo con la ecuación de Laplace, ΔP y r_1 , r_2 se relacionan con la tensión interfacial como:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2\gamma(r_1^{-1} - r_2^{-1}) \quad (3.1.1)$$

donde P es la presión ejercida por el flujo de gas en la probeta de radio r. Las presiones diferenciales medidas estaban en el rango de (279 a 373) Pa (aproximadamente), mientras que la frecuencia de burbujeo estaba en el rango de (1,50 a 1,80) burbujas/seg. El flujo de gas está controlado por una unidad de sensor conectada a un ordenador personal a través de una placa de interfaz (PCI-DAS08, Measuring Computing USA). Además de un controlador de flujo de volumen constante, esta unidad de sensores incluye un transductor

de presión diferencial, un transductor de temperatura y un regulador de presión. La temperatura de la muestra en el recipiente se mide mediante una probeta Pt 100, y se mantiene constante con una precisión de $0,001K$ mediante un baño termostático (Julabo, Alemania). Finalmente, la tensión interfacial se calcula a partir del software Sensadyne de acuerdo con la ecuación de Laplace dentro de $0,1mNm^{-1}K$. Este cálculo se realiza para una concentración constante de la mezcla, y durante un período de tiempo en el que la tensión interfacial alcanza un valor constante estático.

Como parte del procedimiento experimental, las probetas se limpian periódicamente antes de cada medición experimental. El procedimiento de limpieza consiste en lavar las probetas con acetona y luego, en secarlas con toallitas sin aditivos (Kimwipes, Kimberly-Clark Co.).

3.2. Goniometría

La determinación de ángulos de contacto se realiza por medio de métodos ópticos. En el caso de esta investigación se usará el método de ángulo de contacto en gota sésil.

Una gota de fluido se deposita sobre una superficie de sólido limpiada previamente y luego es iluminada para obtener una imagen clara de los bordes para así definir las coordenadas del perfil de la gota. La imagen de la gota es captada a través de un sistema de video conectado a un computador en el que es posible captar y procesar una imagen. El equipo utilizado para realizar estas medidas es llamado goniómetro.

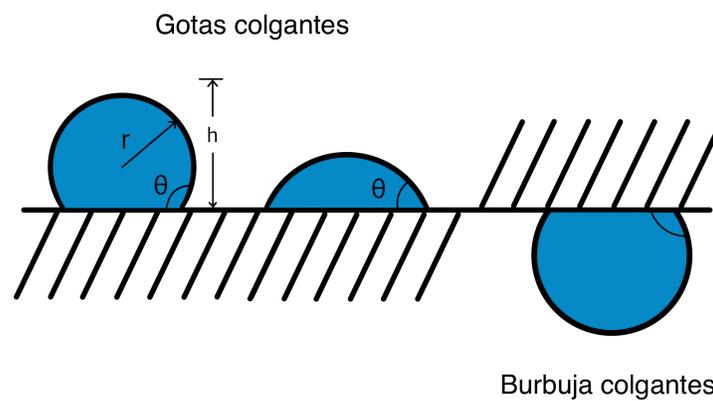


Figura 3.2: Uso de la gota o burbuja sésil para la determinación del ángulo de contacto

La técnica de análisis de la forma de la gota también puede aplicarse a las imágenes tomadas de las gotas sésiles superiores para determinar los ángulos de contacto [25]. Este enfoque sólo es aplicable a sistemas en los que el ángulo de contacto es inferior a 90° , ya que el diámetro observado superará el diámetro de contacto cuando $\theta > 90^\circ$. Para estos casos de no humectación, se puede medir el diámetro ecuatorial máximo para determinar el ángulo de contacto [26]. El ángulo de contacto también puede calcularse a partir de la medición interferométrica del perfil del menisco de una película horizontal en un capilar [27].

Para la medición de ángulos de contacto se utilizó una cámara de medición de acero inoxidable con una capacidad de 42 cm^3 , la cual cuenta con un sistema de iluminación por LED y una cámara de video CCD de alta resolución. La temperatura se controla mediante una banda térmica y se utiliza el software DROPimage Avancé versión 1.5 (Rame-Hart instruments, co USA) para el procesamiento de imágenes y análisis de datos. El ángulo de contacto se determina midiendo la tangente del ángulo formado por la línea de contacto de la gota y la superficie sólida, con una resolución de 0.1° . El goniómetro TEMCO modelo IFT-10 cuenta con un sistema de control de temperatura que permite la medición de ángulos de contacto a diferentes temperaturas. Las ventajas comparativas del sistema armado frente a un goniómetro es que es posible medir dicho ángulo de contacto en un rango amplio de temperatura y presión.

Para la medición de ángulo de contacto se coloca la muestra en el soporte del equipo. La muestra debe ser una superficie plana y homogénea. Luego se ajusta la cámara del equipo de manera que la superficie de la muestra quede en el centro de la pantalla. Se selecciona el líquido que se va a utilizar en la medición y se prepara una solución con la concentración adecuada. Se carga la jeringa del equipo con la solución del líquido seleccionado. Se posiciona la jeringa del equipo justo por encima de la muestra, asegurándose de que la punta de la jeringa esté a pocos milímetros de la superficie de la muestra. Se presiona la jeringa para aplicar una pequeña gota del líquido sobre la superficie de la muestra. Se establece el eje de medición del ángulo de contacto. Este eje debe ser perpendicular a la superficie de la muestra y debe atravesar el punto donde la gota toca la superficie de la muestra. Se captura una imagen de la gota y la superficie de la muestra utilizando el sistema de visualización y la iluminación del equipo. Finalmente se utiliza el software del equipo para medir el ángulo de contacto entre el sólido con y sin resina y con el fluido empleado. El software analiza la forma de la gota y establece el ángulo formado entre la superficie de la muestra y la interfaz líquido-aire. Se repiten los pasos por triplicado para obtener un promedio del ángulo de contacto y asegurarse de que los resultados sean

precisos y reproducibles.

La técnica de tensiometría de presión máxima de burbuja se utiliza de manera precisa y sistemática para determinar la CMC de surfactantes industriales. Al considerar el efecto del ángulo de contacto en la medición, se aborda un aspecto clave que puede influir en la comprensión de los fenómenos en las interfaces líquido-sólido y líquido-gas. Además, al emplear la teoría termodinámica micelar, se busca predecir el comportamiento de los surfactantes no iónicos. La optimización del proceso de impregnación de papel de ARAUCO también se beneficia de esta metodología, ya que la precisión en la medición de tensiones interfaciales es esencial para mejorar la calidad y eficiencia del proceso. En resumen, la metodología experimentalmente presentada actúa como un puente que conecta los objetivos planteados y permite obtener información valiosa sobre los surfactantes y sus interacciones en interfaces.

3.3. Proceso de impregnación de papel con resinas amínicas

La impregnación de papeles melamínicos es un proceso sencillo en cuanto a los equipos y espacio requerido, pero altamente complejo cuando se desea entender que ocurre a lo largo de la línea de producción. La dificultad radica en que los cambios no son macroscópicos (como cuando se fabrica un mueble) si no que ocurren en el pequeño espacio que define una hoja de papel. Por otro lado, la información disponible es escasa o está dispersa y en muchos casos es información que ha circulado en la consciencia colectiva de la empresa sin llegar a quedar registrada.

Impregnar significa saturar los papeles con resina. El fin es hacer que los papeles absorban resina en cantidad necesaria y deseable. Esta saturación por absorción ocurre como una penetración de resinas a través de las fibras de celulosa del papel. El proceso de impregnación se usa para lograr impregnar resina al interior del papel, teniendo así, un producto final con características de resistencia mecánica, física, química, además de estética decorativa.

El papel impregnado se utiliza en diversas aplicaciones, incluyendo la fabricación de chapas de aglomerado y MDF, laminados de alta presión (HPL), laminados técnicos y materiales de soporte para filtros de aire y líquidos, así como papel de lija. En la fabricación de chapas de aglomerado y MDF, el papel impregnado se utiliza como material de soporte para

una resina termoestable, que se cura bajo calor y presión para formar las chapas. En los laminados de alta presión, el papel impregnado se fusiona con capas de papel kraft y un laminado decorativo para formar un laminado resistente. En la fabricación de laminados técnicos, el papel se impregna con una variedad de resinas y se fusiona con capas de otros materiales para formar un laminado duradero.

El proceso de impregnación se inicia en la etapa en la cual ocurre la saturación del papel al ser puesto en contacto con la resina y luego sumergido por completo. Finalizada la saturación se regula la carga de resina en el papel y su homogeneidad en toda la superficie impregnada, para luego proceder a su secado. Si realizamos un seguimiento al recorrido que el papel debe realizar, éste pasa por diferentes procesos. En un comienzo una de las caras del papel es puesta en contacto con la resina, humectándolo (Figura 2.9). Ya humectado, es aireado para lograr el desplazamiento del aire contenido en su interior, una vez aireado se sumerge en la resina logrando su total saturación, como la cantidad de resina o carga en este punto es excesiva, el papel pasa por un juego de rodillos de dosificación que controlan la cantidad de resina que debe quedar en él, de manera independiente para cada lado a lo ancho del papel.

Una de las principales variables que afectan la calidad de la impregnación es la heterogeneidad de la superficie del papel. La heterogeneidad puede deberse a la presencia de irregularidades en la superficie, tales como protuberancias, depresiones, fibras levantadas o restos de polvo. Estos defectos pueden afectar la absorción de la resina y, por lo tanto, la calidad de la impregnación.



Figura 3.3: Figura esquemática de primera etapa de impregnación, sección de rodillos (izquierda) y sección de secado (derecha)

En la segunda etapa del proceso de impregnación (Figura 2.10), el papel impregnado con UF es recubierto con resina melamínica para brindar resistencia a la humedad, abrasión y

ataque químico, y un acabado de calidad.

En este proceso de impregnación del papel con resinas, es importante controlar varias variables para asegurar la calidad del producto final. Por ejemplo, es necesario controlar la cantidad y tipo de resinas utilizadas, la velocidad de los rodillos reticulados, la presión, la longitud y temperatura del canal de secado y la velocidad de enfriamiento en la zona de refrigeración. Además, la calidad del papel utilizado también influye en el resultado final. Es importante tener en cuenta todas estas variables y asegurar su correcto control para obtener un producto de alta calidad y con las características deseadas.



Figura 3.4: Imagen segundo baño de resina melamínica

Los "papeles melamínicos", son aquellos papeles los cuales ya recibieron un proceso de impregnación de resina y están listos para ser laminados en prensas de ciclo corto o de alta presión. Dentro de los dos baños de melamina se utilizan aditivos con la función de evitar espuma en el proceso, que la resina se disperse mejor en el papel, entre otros. La combinación y dosis óptima de estos aditivos da lugar a un papel melamínico de alta calidad y resistencia.

3.3.1. Aditivos proceso de impregnación de papel

Los aditivos son sustancias químicas que se agregan a la resina para mejorar sus propiedades o para conferir nuevas propiedades al papel impregnado.

Los aditivos que se utilizan en la impregnación del papel se clasifican en tres categorías:

Aditivos para mejorar la adhesión Estos aditivos ayudan a que la resina se adhiera mejor al papel.

Aditivos para mejorar la resistencia Estos aditivos mejoran la resistencia del papel a la abrasión, el rasgado y la humedad.

Aditivos para mejorar la apariencia Estos aditivos mejoran la apariencia del papel, como su blancura y opacidad.

Los aditivos se agregan a la resina en cantidades muy pequeñas, generalmente del 0,1 al 5. La cantidad de aditivo que se agrega depende del tipo de resina y del uso previsto del papel impregnado.

Los humectantes se utilizan en la impregnación del papel para ayudar a que la resina se adhiera mejor al papel. Esto se debe a que las micelas de humectante actúan como puentes entre la resina y el papel. Las micelas se adhieren a la superficie del papel y a la resina, lo que ayuda a que la resina se disperse uniformemente sobre el papel.

La concentración crítica micelar (CMC) es la concentración a la que una sustancia forma micelas. En el caso de los humectantes, las micelas se forman cuando la concentración del humectante es lo suficientemente alta como para que las moléculas se atraigan entre sí y formen una estructura estable.

Si la concentración del humectante es superior a la CMC, las micelas se aglomeran y pierden su capacidad de actuar como puentes. Esto puede provocar una disminución de la adhesión de la resina al papel, lo que puede dar lugar a problemas de calidad, como el desprendimiento de la resina o la formación de burbujas.

Por lo tanto, es importante que la concentración del humectante en la resina de impregnación sea inferior a la CMC. Esto se puede lograr mediante la selección de un humectante con una CMC baja o mediante la adición de un agente reductor de la CMC a la resina.

Para producir láminas, es necesario impregnar papel con resinas amínicas de impregnación, las cuales están compuestas por la resina madre Urea-Formaldehído (UF) o Melamina-Formaldehído (MF), junto con una serie de aditivos. Estos aditivos incluyen humectantes, desmoldantes, catalizadores, antipolvo, antiespumantes, agentes anti-blocking y anti-

microbianos, los cuales proporcionan diferentes propiedades a la resina, al papel y, en última instancia, al producto terminado.

El equipo de impregnación, que utiliza rodillos, es capaz de eliminar el exceso de resina del papel impregnado y dosificar la cantidad necesaria.

En el proceso de impregnación de papel, se requieren tres componentes clave para lograr un resultado óptimo: el equipo de impregnación CHM, el marco y contramarco para papeles y la estufa con aire forzado. El equipo de impregnación CHM es responsable de la aplicación uniforme de la resina sobre las hojas de papel y consta de un depósito de resina, un rodillo dosificador, un rodillo recogedor y un sistema de secado por infrarrojos. La velocidad de los rodillos es controlada electrónicamente para garantizar la precisión y uniformidad en la aplicación de la resina.

Por otro lado, el marco y contramarco para papeles es utilizado para cortar los papeles a la medida deseada. Este componente se compone de dos marcos, uno superior y otro inferior, que se ajustan a la medida del plato de cartón utilizado como molde para la impregnación. De esta manera se asegura que los papeles cortados tengan las dimensiones requeridas para el proceso de impregnación.

Finalmente, la estufa con aire forzado es utilizada para el secado de los papeles impregnados. Este componente se encarga de proporcionar el flujo de aire caliente necesario para acelerar el proceso de secado y garantizar que los papeles queden completamente secos antes de ser utilizados en la fabricación de los materiales compuestos.

En el proceso de impregnación de papel, se requiere de materiales específicos para asegurar la calidad y cantidad del papel impregnado. Entre estos materiales se encuentran las hojas de papel para impregnación, un molde en forma de plato de cartón para cortar los papeles a la medida, y una balanza analítica para medir con precisión la cantidad de resina utilizada en cada impregnación. Además, se requieren otros materiales como vasos precipitados, una bagueta, un cronómetro y brochas de media pulgada, cada uno con una función específica en el proceso. Es fundamental contar con los materiales adecuados para garantizar los resultados esperados en la impregnación de papel.

En el proceso de impregnación de papel, se utilizan diversos reactivos para mejorar las propiedades del papel impregnado y garantizar la calidad del producto final. Estos reactivos incluyen la resina melamina-formaldehído para impregnación, el agente anti-blocking, el agente humectante, el agente desmoldante, el antipolvo, el antiespumante, el catalizador y los agentes anti-microbianos. Cada uno de estos reactivos tiene una función específica en el proceso de impregnación, como evitar que las láminas se peguen entre sí, facilitar la

saturación del papel con la resina, evitar que las láminas queden adheridas en los platos de la prensa, reducir la formación de espuma en la solución de impregnación, acelerar el proceso de policondensación de la resina, y prevenir el crecimiento de microorganismos. Para impregnar los papeles se preparan 500g de resina UF y 300g de resina MF y se agregan aditivos según la receta. Para impregnar el papel, se sumerge en un baño de resina UF preparado previamente, asegurándose de que esté completamente impregnado. Luego, se retira el exceso de resina pasando el papel una vez por los rodillos lisos, evitando cortar el papel con una tracción excesiva. Después, el papel impregnado se lleva a un marco y se introduce en la estufa de secado para un secado completo. Una vez que el papel está seco (Figura 5.3), se realizan las pruebas de calidad correspondientes, como medir el gramaje y espesor del papel, la resistencia a la tracción, la absorción de agua, entre otras.



Figura 3.5: Papel impregnado final

Para aplicar la resina MF al papel ya impregnado con resina UF, se utiliza una piceta con resina MF para saturar los rodillos reticulados y se pasa el papel varias veces para asegurarse de que esté impregnado adecuadamente sin exceso de resina. Luego, se lleva el marco con el papel impregnado a la estufa de secado nuevamente. Después de que el papel está completamente seco, se procede a realizar las pruebas de calidad correspondientes para asegurar la calidad del producto final. Controlar la temperatura durante el proceso de secado es esencial para evitar dañar el papel y garantizar una adecuada curado de la resina.

3.4. Pruebas de Calidad del Producto Final

En esta sección, se describen las pruebas clásicas que se realizan a los tableros impregnados en la industria para asegurar la calidad del producto final.

3.4.0.1. Comportamiento frente al vapor de agua

El ensayo de comportamiento frente al vapor de agua es una medida de la resistencia a la humedad que tiene la superficie laminada. El comportamiento frente al vapor de agua se controla a todos los tableros recubiertos.

En el matraz Erlenmeyer se calientan hasta la ebullición 200 ml de agua. La muestra a controlar se coloca con la superficie recubierta hacia abajo, sobre la boca del Erlenmeyer, y se deja actuar el vapor de agua durante 30 minutos. Luego se retira y se seca. Se controla si se han producido cambios en la superficie de la muestra (ampollas, pérdida de brillo, decoloración, hinchamiento, etc.)

3.4.0.2. Control cerrado superficial tableros laminados

La determinación de la ausencia de poros de la superficie de tableros recubiertos sirve como índice de la sensibilidad de la superficie a ensuciarse. El cerrado superficial se controla a todos los tableros recubiertos.

La superficie se unta con pasta de grafito y enseguida se limpia con el papel embebido en alcohol. En las partes abiertas de la superficie permanece la pasta. El cerrado superficial se califica de acuerdo a una escala de 1 a 6:

Grado

-
1. Sin poros
 2. Poros aislados
 3. Pocos poros
 4. Numerosos poros
 5. Abundantes sitios abiertos
 6. No se aprecia cerrado superficial

3.4.0.3. Control dureza superficial tableros laminados

La determinación del grado de endurecimiento de la superficie es un criterio importante para el control de calidad y está dado por el grado de curado de la resina. Un curado excesivo origina la aparición de grietas y un curado insuficiente disminuirá la resistencia a la abrasión. La dureza superficial se controla a todos los tableros recubiertos.

Se aplica una gota de la solución de ácido sobre el tablero a temperatura ambiente. Se deja actuar durante 5 minutos y luego se la limpia con papel.

La solución de ácido se prepara con una cierta proporción de colorante de manera que mientras mas intenso sea el daño que ocasione el ácido sobre el revestimiento, mayor será la cantidad de colorante que se deposite y mas intenso el color. El ácido ataca mas fácilmente aquellas superficies menos endurecidas de manera que la intensidad del color que deja la solución de ácido sobre la superficie es una medida de la resistencia de la misma y del grado de curado de la resina.

Grado

1. Coloración muy leve
2. Coloración leve
3. Coloración notoria
4. Numerosos poros
5. Coloración fuerte
6. Coloración muy fuerte
7. Coloración muy fuerte y superficie ablandada

3.4.0.4. Ensayo de abrasión en tableros laminados

La superficie revestida con melamina o folio debe tener una determinada resistencia a la acción mecánica para garantizar la durabilidad del producto que estará expuesto al uso habitual. Como norma general la melamina es un producto de mayor calidad respecto al folio en este aspecto. El ensayo de abrasión se realiza a todos los tableros recubiertos.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados ~~Valores~~ Experimentales

4.1.1.1. Concentración Crítica Micelar

~~Los surfactantes desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones industriales, como la impregnación, donde cumplen funciones como agentes humectantes, antibloqueo, antiespumantes y antipolvo. En esta investigación, se ha realizado un riguroso estudio experimental en el entorno de laboratorio, cuyos resultados han demostrado ser prometedores.~~ Se realizaron mediciones de la tensión superficial para un surfactante aniónico, uno catiónico y uno no iónico, manteniendo una temperatura constante de 25°C. Los datos experimentales se compararon con información disponible en la literatura para evaluar la precisión y validez de los resultados obtenidos. Además, se procedió a medir la tensión superficial de seis surfactantes suministrados por la empresa, bajo la misma temperatura constante de 25°C. Como culminación, se logró determinar el punto crítico micelar para cada uno de los surfactantes analizados.

aquí ya está en resultado

Para realizar las mediciones de tensión superficial de los surfactantes, se agregó surfactante a un vaso precipitado, se añadieron los siguientes volúmenes y gramos:

???

Posteriormente, se añadió agua ultra pura hasta llegar a un volumen final de 75 ml y se disolvió completamente mediante agitación con un agitador magnético. La concentración

Tabla 4.1: Cantidad de surfactante agregado a la solución

Antiblocking [mL]	Humectante [mL]	Antipolvo [mL]	Desmoldante [mL]	Antiespumante [mL]	SDS [mg]	CTAB [mg]	DGME [mg]
0,01	0,01	0,10	0,22	1,00	0,07	0,03	0,00
0,29	0,05	0,46	6,24	2,00	0,43	0,04	1,10
0,42	1,00	0,60	7,67	3,00	0,49	0,05	4,22
0,72	2,00	1,17	12,41	4,00	0,74	0,14	10,72
0,79	3,00	1,71	15,37	5,00	0,89	0,11	11,94
1,01	5,00	2,96	24,88	8,00	1,05	0,13	13,24

de todos los surfactantes utilizados en este trabajo fue obtenida de la siguiente manera:

$$Concentracion [mol/L] = \frac{Surfactante [mL] \times Densidad [g/mL]}{0,075 [L] \times Peso molecular [g/mol]} \quad (4.1.1)$$

$$Concentracion [mol/L] = \frac{Surfactante [mg]}{0,075 [L] \times Peso molecular [g/mol] \times 1000[mg/g]} \quad (4.1.2)$$

Usando los datos de peso molecular y densidad de la siguiente tabla:

Tabla 4.2: Propiedades de surfactantes

Surfactante	Peso Molecular [g/mol]	Densidad [g/mL]
Antiblocking	825	1.080
Humectante	152	0.306
Antipolvo	625	1.070
Desmoldante	1310	1.080
Antiespumante	456	0.919
SDS	288	1.010
CTAB	364	0.971
DGME	134	0.904

Por ejemplo para el surfactante SDS:

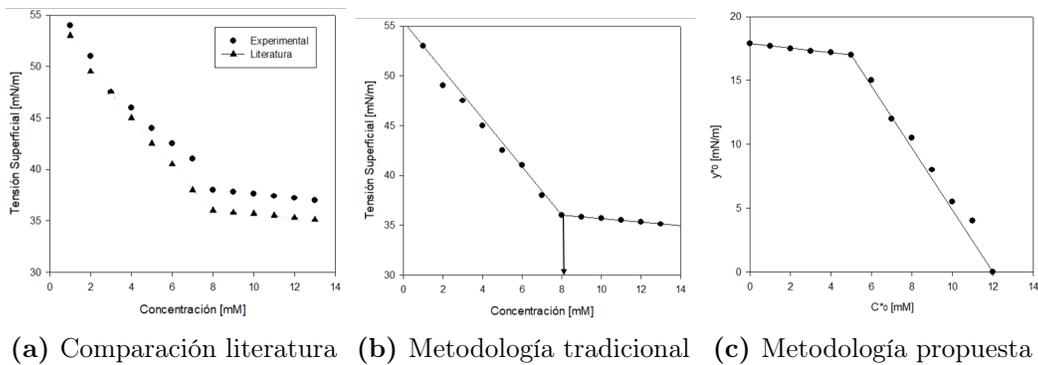
$$Concentracion [mol/L] = \frac{0,07 [mg]}{0,075 [L] \times 288,38 [g/mol] \times 1000[mg/g]} = 0,9 [mol/L] \quad (4.1.3)$$

Tabla 4.3: Concentración de surfactante [mM]

Antiblocking	Humectante	Antipolvo	Desmoldante	Antiespumante	SDS	CTAB	DGME
0,2	0,5	2,3	2,4	5,4	0,9	0,4	0,0
5,1	2,4	10,6	68,6	26,5	5,6	0,6	0,1
7,4	4,3	13,6	84,3	96,4	9,8	0,7	0,4
12,5	31,5	26,8	136,5	102,5	9,8	2,0	1,1
13,8	97,8	39,0	168,9	132,5	11,8	1,6	1,2
17,7	161,0	67,7	273,5	206,8	13,9	1,8	1,3

De esta manera, se obtuvieron las soluciones de surfactante con la concentración adecuada para realizar las mediciones de tensión superficial.

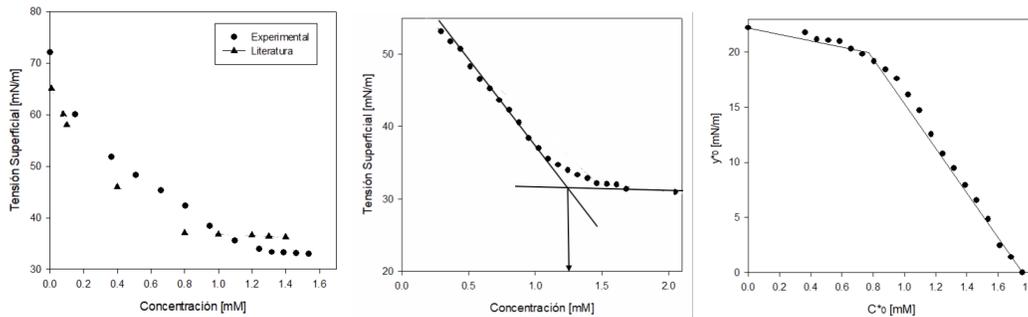
El surfactante aniónico (SDS) es el más conocido dentro de la industria de surfactantes y es muy utilizado para el desarrollo de microemulsiones. La gráfica se presenta a continuación:



cuál es la variable independiente? corrija las leyendas de las figuras

Figura 4.1: Concentración de Surfactante en solución de agua vs Tensión Superficial de SDS [2]

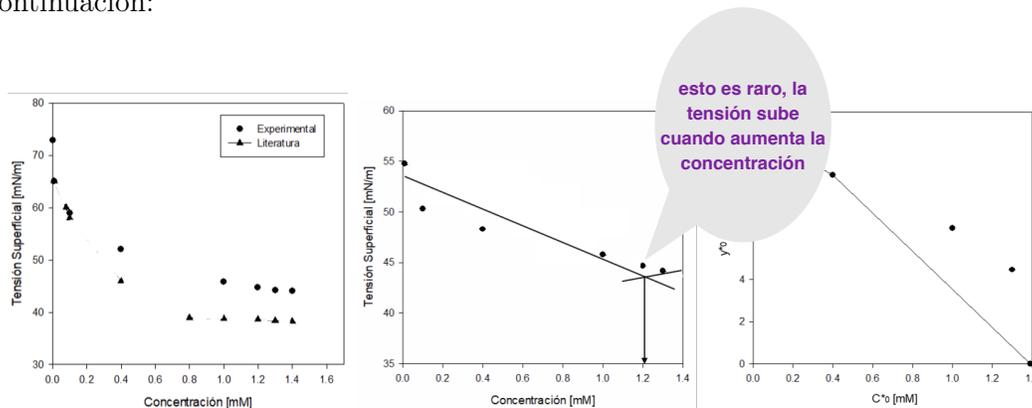
Luego se midió el surfactante catiónico (CTAB) y la gráfica se presenta a continuación:



(a) Comparación literatura (b) Metodología tradicional (c) Metodología propuesta

Figura 4.2: Concentración de Surfactante en solución de agua vs Tensión Superficial de CTAB [3]

Finalmente se midió el surfactante no iónico (DGME). El surfactante no iónico DGME es importante en la industria debido a sus propiedades de reducción de tensión superficial, baja toxicidad, buena solubilidad en agua y capacidad para formar micelas. Estas propiedades hacen que DGME sea un aditivo útil en muchos procesos industriales. La gráfica se presenta a continuación:



(a) Comparación literatura (b) Metodología tradicional (c) Metodología propuesta

Figura 4.3: Concentración de Surfactante en solución de agua vs Tensión Superficial de DGME [4]

A continuación, se presenta una tabla que muestra el porcentaje de error entre la CMC experimental y la CMC de la literatura:

Tabla 4.4: Comparación del porcentaje de error en la medición de surfactantes entre la literatura y los resultados experimentales

Surfactante	Error
SDS	1.89 %
CTAB	2.19 %
DGME	13.08 %

Estimación de la concentración micelar crítica a partir de datos de tensiometría

A partir de estos datos, se estimó la CMC mediante el ajuste de la curva de la tensión superficial vs concentración, como se muestra a continuación:

Tabla 4.5: Comparación de las concentraciones micelares críticas a 25°C

Surfactante	a	b	c	$y_0^*[mN/m]$	$C_0^*[mM]$	$C_{cmc}[mM]$
DGME	6.871	-0.029	9.484	8.298	-0.0461	1.354
Antiespumante	0.0665	-0.007	16.771	5.723	-101.896	106.933
Desmoldante	0.062	-0.007	17.861	5.932	-295.588	142.368
Antipolvo	0.363	-0.015	16.109	8.299	-37.454	25.320
Humectante	0.229	-0.015	16.559	7.594	-59.3915	102.271
Antiblocking	0.661	-0.0380	10.201	7.855	-2.699	15.564

Se observa para el caso de los 3 surfactantes que los datos **experimentales** no coinciden exactamente con los de la literatura. Los datos de la literatura pueden haber sido obtenidos utilizando una técnica de medición diferente o utilizando un instrumento de medición diferente al utilizado en el laboratorio.

Luego de haber realizado estos experimentos, se **replico** la metodología, esta vez con surfactantes provistos por el área de impregnación de papel para tableros de la empresa **ARAUCO**. Se tomaron muestras de 5 aditivos, donde a cada una de ellas se midió su tensión. Se muestran los resultados crudos en el siguiente gráfico:

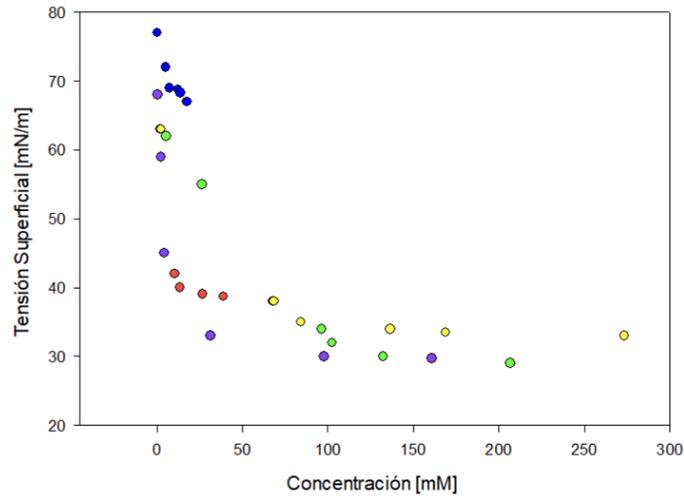
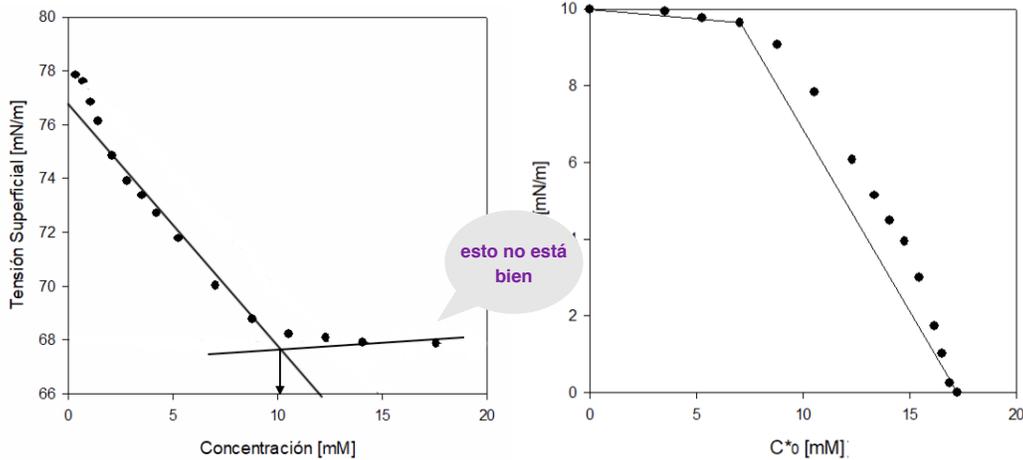


Figura 4.4: Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactantes de impregnación de papel en solución de agua (● Antiblocking, ● Humectante, ● Antipolvo, ● Desmoldante, ● Antiespumante)

El gráfico ilustra, preliminarmente, como todos los aditivos elegidos se comportan como surfactante, reduciendo la tensión superficial a medida que aumenta la concentración de aditivo en la solución. Los resultados de estas mediciones se presentan individualmente en las figuras ~~6.4-6.8~~.

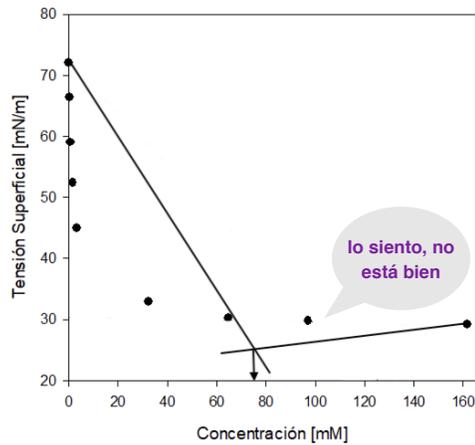
No hay Cap 6



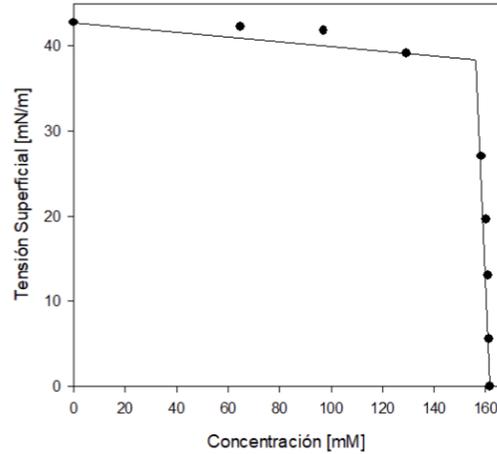
(a) Metodología tradicional

(b) Metodología propuesta

Figura 4.5: Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Antiblocking en solución de agua.

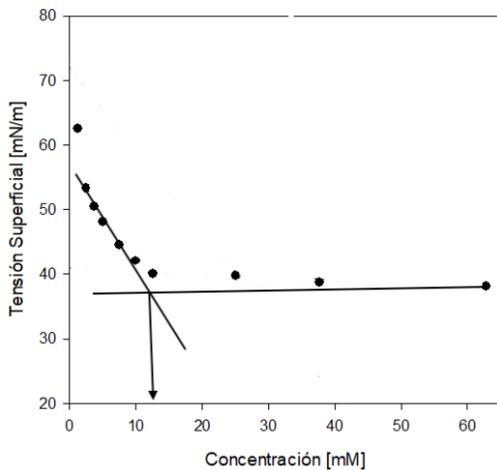


(a) Metodología tradicional

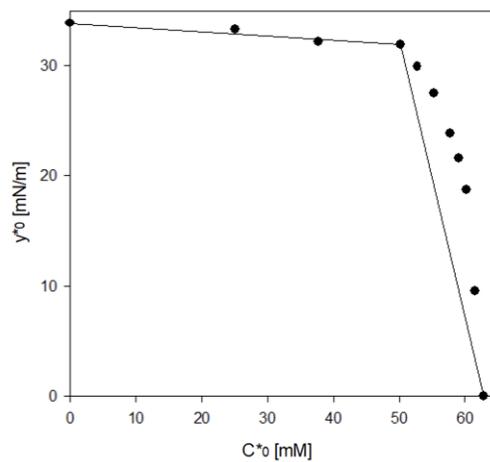


(b) Metodología propuesta

Figura 4.6: Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Humectante en solución de agua.

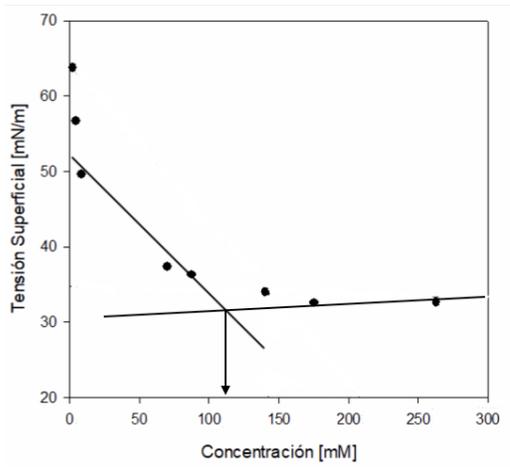


(a) Metodología tradicional

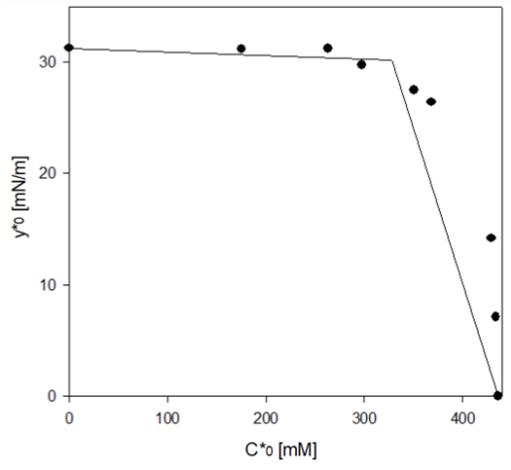


(b) Metodología propuesta

Figura 4.7: Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Antipolvo en solución de agua.

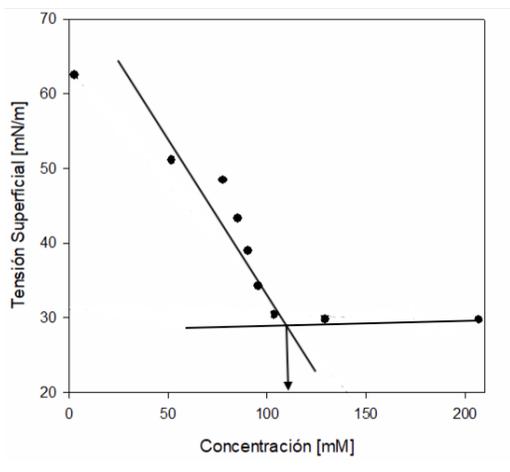


(a) Metodología tradicional

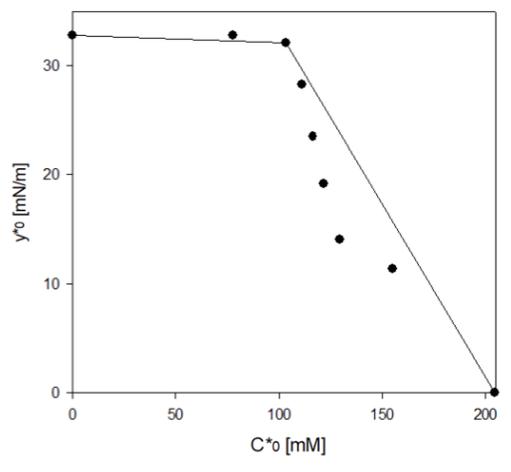


(b) Metodología propuesta

Figura 4.8: Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante Desmoldante en solución de agua.



(a) Metodología tradicional



(b) Metodología propuesta

Figura 4.9: Evolución de la tensión superficial con respecto al aumento de la concentración total de surfactante...

Insisto que la candidata no conoce el método tradicional, lo que es complejo porque propone un método nuevo como alternativa

4.1.1.2. Ángulo de Contacto

La impregnación del papel es un proceso que consiste en saturar el papel con una solución o resina para mejorar sus propiedades físicas, como la resistencia, la durabilidad y la resistencia a la humedad. Uno de los aditivos más importantes utilizados en este proceso es el agente humectante, que desempeña un papel crucial para garantizar la penetración efectiva de la solución o resina en las fibras de papel. Para los siguientes resultados se eligió el Humectante como surfactante variable, para observar el cambio del ángulo de contacto mientras se cambia la cantidad de humectante adicionado a la receta de impregnación.

La función principal del agente humectante es reducir la tensión superficial del líquido y mejorar su capacidad para extenderse uniformemente por la superficie del papel. Esto ayuda a garantizar que la solución o resina se distribuya uniformemente por las fibras de papel, lo que a su vez mejora la calidad general del papel.

Además de mejorar la penetración y distribución de la solución o resina, el agente humectante también ayuda a prevenir la formación de bolsas de aire o huecos dentro del papel. Estas bolsas de aire pueden causar debilidades en el papel, reduciendo su resistencia y durabilidad, y potencialmente conducir a la delaminación u otros tipos de fallos.

Además, el agente humectante también puede mejorar la adhesión de la solución o resina a las fibras de papel, garantizando que permanezca firmemente en su lugar incluso en condiciones extremas, como alta humedad o exposición a productos químicos.

En general, el uso de un agente humectante de alta calidad es esencial para garantizar el éxito del proceso de impregnación y producir productos de papel de alta calidad con propiedades físicas superiores. Sin este importante aditivo, el proceso sería mucho menos eficaz y los productos de papel resultantes serían de menor calidad y durabilidad.

Ángulo de Contacto de tablero impregnado

Se impregnaron los papeles para 3 tableros en ARAUCO. Uno de estos tiene la concentración de humectante bajo la concentración estandar, la cual es la concentración química micelar encontrada (Tablero -1). Se impregno papel en un segundo tablero a la concentración de humectante estandar (Tablero STD). Finalmente se impregno papel en un tablero con concentración de humectante sobre la concentración estándar con el fin de ver los resultados con exceso de humectante en la receta.



Figura 4.10: Ángulo de contacto sobre tableros melaminizados

Se midieron los ángulos de contacto que el agua forma sobre los tres tableros impregnados con papel melaminizado, con la medición de los ángulos realizada a temperatura ambiente. Este experimento permite la oportunidad de evaluar el efecto de la concentración de humectante en la tensión superficial del tablero impregnado con papel.

Para llevar a cabo la medición del ángulo de contacto de manera precisa, se buscó mantener un tamaño de gota constante en todas las mediciones para mitigar la introducción de errores relacionados con factores humanos. Para lograr esto, se enfocó en controlar la uniformidad del tamaño de las gotas al realizar las mediciones en el goniómetro. Este enfoque meticuloso garantizó la coherencia en los resultados y mejoró la confiabilidad de la evaluación del impacto de la concentración de humectante en la tensión superficial del tablero impregnado.

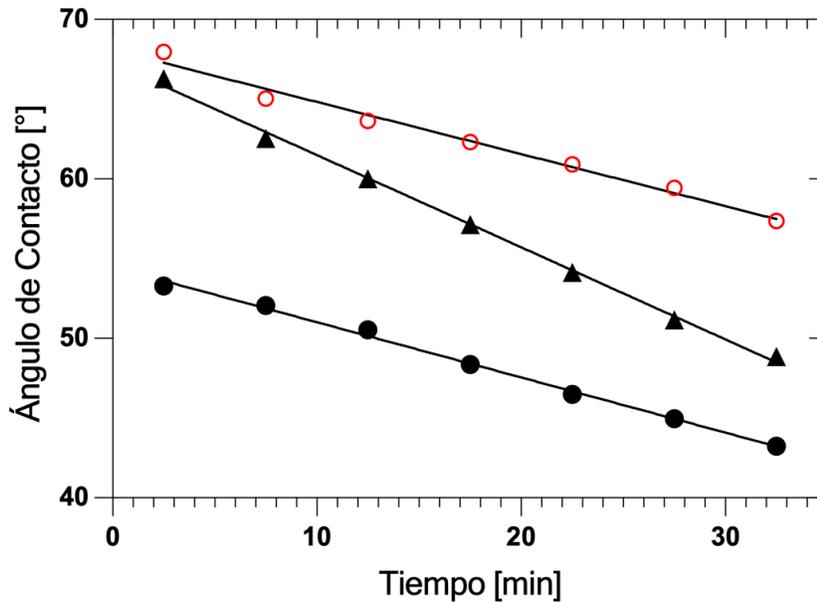


Figura 4.11: Evolución del ángulo de contacto sobre tableros con respecto al tiempo donde: ● Tablero STD vs Ángulo de Contacto ○ Tablero -1 vs Ángulo de Contacto ▲ Tablero +1 vs Ángulo de Contacto

Se presentan los resultados en forma de gráfico. Se observa como el tablero estándar tienen el menor ángulo de contacto, con respecto al tiempo. Luego el tablero con la concentración en exceso de humectante, tiene ángulo de contacto bajo y finalmente, el ángulo de contacto mayor es el de el tablero con baja concentración de humectante.

A través de una medición de los ángulos de contacto en los tres tableros impregnados con papel melaminizado, se ha logrado una evaluación precisa del impacto de la concentración de humectante en la tensión superficial del tablero. Al considerar la variación en los ángulos de contacto en función de las concentraciones de humectante y los resultados en términos de tensión superficial, esta investigación se alinea perfectamente con el objetivo principal del experimento, que busca analizar cómo las concentraciones de humectante influyen en la respuesta interfacial del tablero. Estos hallazgos contribuyen al desarrollo de estrategias más efectivas para optimizar el proceso de impregnación de papel de ARAUCO y sus aplicaciones industriales.

Tabla 4.6: Evolución del ángulo de contacto sobre tableros con respecto al tiempo

Promedio	Tablero STD	Tablero +1	Tablero -1
Angulo Inicial	53.3	66.5	68.4
0 a 5 min	1.3	3.9	3
5 a 10 min	1.5	2.2	1.6
10 a 15 min	2.1	3.3	1.6
15 a 20 min	2	2.9	1.4
20 a 25 min	1.4	3	1.4
25 a 30 min	1.8	2.2	2
30 a 35 min	0	0.1	0.1
TOTAL	10.1	17.6	11.1
Angulo Final	43.2	48.9	57.3

En relación a la razón de cambio del ángulo de contacto en función del tiempo, se observa un comportamiento interesante. Aunque el tablero con exceso de humectante comienza con un ángulo de contacto más elevado en comparación con el tablero estándar, es el que experimenta la mayor disminución en el período de 35 minutos. Por otro lado, el tablero con una concentración insuficiente de humectante, que parte con el ángulo de contacto más grande, muestra una notable capacidad de reducción del ángulo a lo largo del tiempo en comparación con el tablero estándar. Estos resultados sugieren que la variación en la concentración de humectante tiene un impacto significativo en cómo el ángulo de contacto cambia en función del tiempo, lo cual puede ser crucial para comprender la dinámica de interacción entre el humectante y la superficie del tablero.

4.1.1.3. Ángulo de Contacto de papel sin impregnar

Luego se realizó el experimento sobre papel de impregnación sin impregnar, a distintas concentraciones de humectante en mezclas de resina uréica.

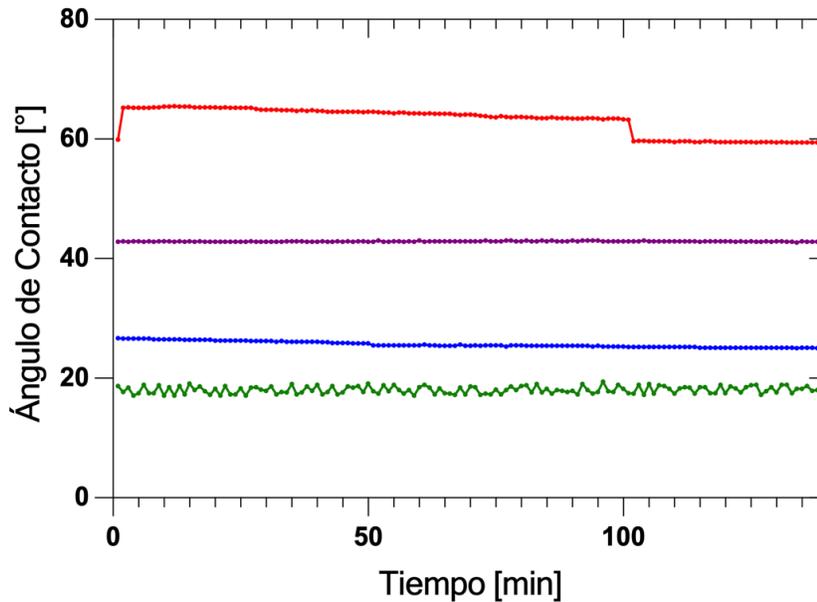


Figura 4.12: Evolución del ángulo de contacto de Urea sobre papel sin impregnar donde: — tiempo vs ángulo de contacto + 0 humectante — tiempo vs ángulo de contacto + 2 humectante — tiempo vs ángulo de contacto + 4 humectante — tiempo vs ángulo de contacto + 6 humectante

La concentración mayor de humectante en la úrea es la concentración estándar de la receta (0.06 mL). Se observa como la concentración crítica micelar encontrada (0.02) no es la que presenta un ángulo de contacto más bajo con el papel sin impregnar sino la mezcla de úrea con 0.04 mL de humectante.

Este resultado se debe a el tamaño de la gota en el momento del experimento, como queda evidenciado en las figuras anteriores, entre otros. Aún así se observa que menos aditivo, baja el ángulo de contacto de igual o mejor manera.

Debido a ciertas dificultades técnicas encontradas durante la ejecución del experimento, fue necesario repetir el procedimiento en múltiples ocasiones. El papel sin impregnar tendía a doblarse, lo cual dificultaba la precisa observación del ángulo de contacto. Adicionalmente, la resina uréica presentaba la particularidad de adherirse al equipo utilizado, lo que también contribuyó a la repetición del experimento para garantizar resultados fiables y representativos.

A pesar de las complejidades involucradas, sigue siendo evidente que menos aditivo

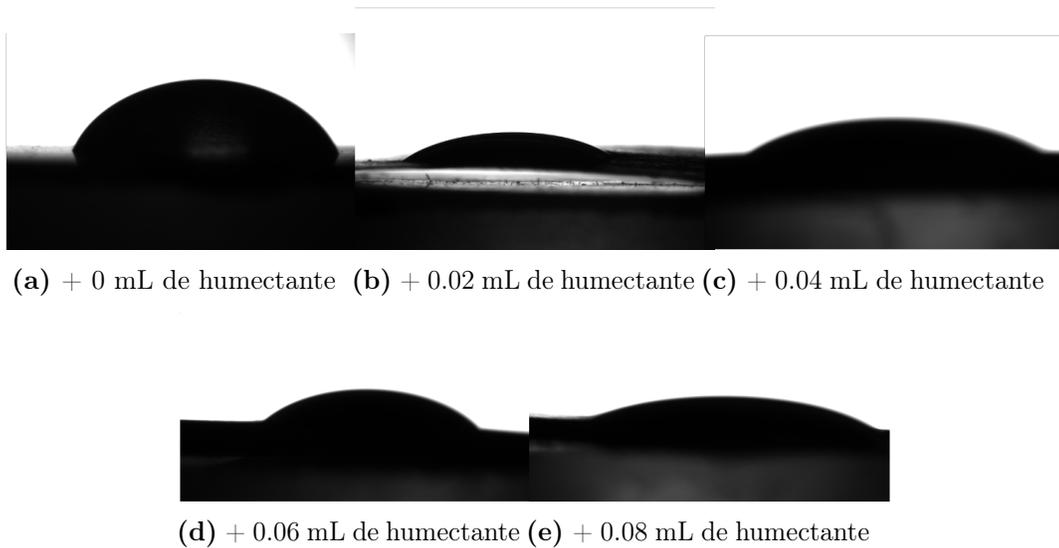


Figura 4.13: Angulo de contacto de Urea + humectante sobre papel sin impregnar

conduce a una reducción igual o más efectiva en el ángulo de contacto. Estos resultados proporcionan un valioso aporte para comprender cómo las interacciones entre las concentraciones de humectante y las propiedades de la superficie influyen en los ángulos de contacto en la impregnación de papel de ARAUCO.

4.1.1.4. Resultados Laboratorio Bioforest

Reticulado

Las muestras de melamina se evaluaron según norma ASTM D3359. Se muestran los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 4.7: Ensayo con tipo de recubrimiento Melamina

Probeta	Sustrato	Tipo de Recubrimiento	Cinta Adhesiva	Tipo de Factura	Norma ASTM D3359
1	Madera MDF	Melamina Grupo -1	Cinta Adhesiva Tartan	Sustrato	5b
2					5b
3					5b
1	Madera MDF	Melamina Grupo STD	Cinta Adhesiva Tartan	Sustrato	4b
2					3b
3					5b
1	Madera MDF	Melamina Grupo +1	Cinta Adhesiva Tartan	Sustrato	5b
2					4b
3					5b

Se observa que el tablero que obtiene mejores resultados es el tablero con déficit de humectante (recubrimiento 5b por triplicado)

Ensayo de comportamiento frente al vapor de agua en superficies laminadas

El ensayo de comportamiento frente al vapor de agua es una medida de la resistencia a la humedad que tiene la superficie laminada. Se controla si se han producido cambios en la superficie de la muestra (ampollas, pérdida de brillo, decoloración, hinchamiento, etc.)



Figura 4.14: Comportamiento frente al vapor de agua Estandar



Figura 4.15: Comportamiento frente al vapor de agua -1



Figura 4.16: Comportamiento frente al vapor de agua +1

No se observan ampollas, hinchamiento ni decoloración en ninguno de los 3 tableros.

Control cerrado superficial tableros laminados

La determinación de la ausencia de poros de la superficie de tableros recubiertos sirve como índice de la sensibilidad de la superficie a ensuciarse.

Se muestran los resultados obtenidos siendo el mejor caso de la escala el número 1, y el peor el número 6.

Tabla 4.8: Control cerrado superficial

Probeta	Sustrato	Tipo de Recubrimiento	Valor prueba
1	Grafito	Melamina Grupo STD	Poros Aislados
2			Poros Aislados
3			Poros Aislados
1	Grafito	Melamina Grupo -1	Sin Poros
2			Sin Poros
3			Poros Aislados
1	Grafito	Melamina Grupo +1	Sin Poros
2			Poros Aislados
3			Sin Poros

Abrasión

A continuación se presentan los resultados del test de abrasión para los tableros con exceso de humectante (+1), el tablero con concentración estándar de humectante (STD), y para los tableros con déficit de humectante (-1). Se realizaron 3 tableros para cada concentración de surfactante (9 en total) de los cuales el tablero 3, 4 y 6 se tomaron para realizar este experimento.

Tabla 4.9: Resultados Abrasión

ID Probeta	Abrasión 1	Abrasion 2
ST (3)	341	754
-1 (3)	372	749
+1 (3)	365	714
ST (4)	473	828
-1 (4)	363	779
+1 (4)	338	755
+1 (6)	259	771
-1 (6)	352	746
ST (6)	291	755

El test de abrasión tuvo resultados positivos para el tablero con menor concentración de humectante, al estar todos sus resultados sobre 300 en la Abrasión 1. Es interesante observar como el tablero con exceso de aditivo y el estandar, no pasan todos los test de abrasión, al tener valores bajo 300 en la Abrasión 1.

4.1.2. Resultados Modelamiento Teórico

En este estudio, se a utilizado la Teoría Termodinámica Micelar (MTT) junto con programación Python para determinar los valores de CMC de varios surfactantes industriales utilizados en procesos de impregnación. Los surfactantes analizados incluyen un agente humectante, un agente antibloqueo, un agente antipolvo y un agente antiespumante.

No se pudo determinar una CMC bien definida para el agente antiespumante. Esto se debe a que los surfactantes no iónicos antiespumantes no suelen tener una CMC bien definida, ya que su función principal es reducir la formación de espuma en lugar de solubilizarse en agua.

También se analizó un agente humectante único utilizado por ARAUCO. Este agente humectante no tiene una cola hidrófoba como otros surfactantes, por lo que no tiene una estructura de "cabeza" y "cola". En su lugar, es un polímero soluble en agua compuesto de unidades repetitivas de alcohol vinílico. Por lo tanto, no tiene un número específico de carbonos en una cabeza o una cola, y no es posible medir su CMC con la teoría MTT.

En general, el estudio destaca la importancia de comprender el comportamiento de los surfactantes en solución y el uso de la MTT y la programación en Python como una potente herramienta para determinar los valores de CMC. Los resultados de este estudio pueden utilizarse para diseñar formulaciones de surfactante más eficientes y optimizar su rendimiento en procesos industriales.

A continuación se presentan los parámetros utilizados para los calculos de la CMC por la teoría termodinámica micelar

Tabla 4.10: Propiedades de surfactantes para la aplicación de la teoría termodinámica de micelización

Surfactante	$n_{c,tail}$	$n_{c,head}$	Peso Molecular [g/mol]	Densidad [g/mL]
Desmoldante	18	46	1310	1.08
Antipolvo	9	30	625	1.07
Antiblocking	10	46	825	1.08

La elección de la forma de la micela en los cálculos de la concentración micelar crítica (CMC) es un aspecto importante en la aplicación de la teoría termodinámica micelar (MTT). La micela esférica es considerada la forma termodinamicamente más estable cerca de la CMC (Figura 5.9), lo que justifica su elección en los cálculos de la CMC.

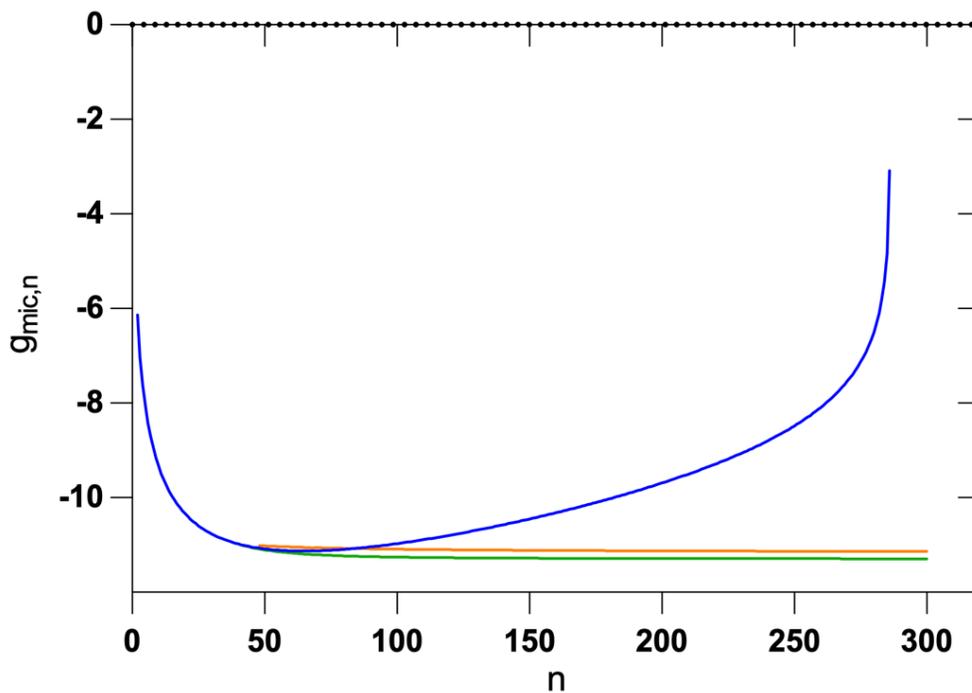


Figura 4.17: Diferencia estándar de energía libre predicha ($\Delta\mu_{0g}$) para soluciones acuosas de Surfactante con diferentes formas de agregación a 25 °C Siendo n el número de agregación y g_{mic} denota el número medio de esta distribución. (-micelas esféricas; - micelas elipsoidales; - micelas esferocilíndricas)

Esta suposición se basa en la teoría de la energía libre de Gibbs, que establece que la forma más estable de una micela se logra cuando la energía libre de Gibbs es mínima. La forma esférica de la micela es la que cumple con esta condición, ya que tiene la menor superficie y el menor número de enlaces intermoleculares expuestos al medio acuoso. Además, esta forma de micela es la más común en soluciones de surfactantes, por lo que su uso en los cálculos de la CMC permite una comparación más precisa con los datos experimentales de la literatura.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por la teoría MTT, la estimación de la concentración micelar crítica a partir de datos de tensiometría y la comparación con datos de la literatura.

Tabla 4.11: Los valores de CMC se han tomado de: *a.* Técnica de tensión superficial [38] *b.* MMT (este trabajo) y *c.* Datos de la literatura

Surfactantes	Antiespumante	Desmoldante	Antipolvo	Humectante	Antiblocking
CMC^a [mM]	106.93	142.47	25.32	102.27	15.56
CMC^b [mM]	-	124.54	24.31	-	16.03
CMC^c [mM]	-	125.00 ^[39]	24.00 ^[40]	-	17.00 ^[41]

Los surfactantes Antiblocking, Antipolvo y Desmoldante muestran concentraciones críticas micelares similares a las reportadas en la literatura, a pesar de sus diferentes funciones. Este comportamiento uniforme en relación a la concentración crítica micelar subraya la validez de la metodología empleada para determinar la CMC y su pertinencia en la caracterización de surfactantes industriales. La obtención precisa de la CMC es de gran importancia, ya que nuestro objetivo radica en optimizar el proceso productivo de ARAUCO. La empresa necesita que sus surfactantes operen por debajo de sus concentraciones críticas micelares, dado que la presencia de micelas reduce la eficacia de los aditivos.

Capítulo 5

Conclusión

En cuanto a los resultados obtenidos en función de estos objetivos e hipótesis, se logró desarrollar y validar una metodología para la determinación de la CMC de surfactantes industriales, empleando la técnica de tensiometría de presión máxima de burbuja. Además, se aplicó la teoría termodinámica micelar para predecir el comportamiento de los surfactantes no iónicos.

En este trabajo, se aplicó la teoría de la termodinámica micelar para determinar las concentración crítica micelar de surfactantes no iónicos. Se encontraron las concentraciones críticas micelares de los cinco surfactantes industriales a la temperatura de operación de la línea de impregnación en la planta TENO (25°C). Se observó que los surfactantes Antiblocking, Humectante, Antipolvo, Desmoldante y Antiespumante tienen concentraciones críticas micelares similares, y aunque cada uno tiene funciones distintas, todos se comportan de manera similar con respecto a la concentración crítica micelar. Se eligió el surfactante "Humectante" como reactivo en la receta de impregnación y se determinó la concentración crítica micelar para este aditivo, denominada la dosificación ideal de humectante (déficit de humectante con respecto a la receta estándar). Sin embargo, aún quedan áreas por explorar, como la combinación de surfactantes y otros factores que pueden influir en el desempeño industrial.

Se verificaron los resultados suministrando la dosificación encontrada en el proceso de impregnación de Bioforest. Se presentaron los resultados de los test de calidad de ARAUCO para los tableros con exceso de humectante (+1), el tablero con concentración estándar de humectante (STD) y para los tableros con déficit de humectante (-1). Las muestras de melamina se evaluaron según norma ASTM D3359 de Reticulado y se observó que el tablero que obtiene mejores resultados es el tablero con déficit de humectante

(recubrimiento 5b por triplicado). El ensayo de comportamiento frente al vapor de agua es una medida de la resistencia a la humedad que tiene la superficie laminada y se observó que no se produjeron cambios en la superficie de la muestra (ampollas, pérdida de brillo, decoloración, hinchamiento, etc.) en ninguno de los tres tableros.

Se midió los ángulos de contacto que el agua forma sobre los tres tableros en el laboratorio de Cohesión de la Universidad de Concepción. Este experimento ayudó a verificar el impacto de la concentración de humectante sobre la tensión superficial del tablero impregnado. Se presentan los resultados en forma de gráfico, y se obtienen resultados no esperados. El tablero estándar tiene el menor ángulo de contacto con respecto al tiempo, seguido del tablero con la concentración en exceso de humectante y finalmente, el ángulo de contacto mayor es el del tablero con baja concentración de humectante. Con respecto a la razón de cambio de ángulo de contacto con respecto al tiempo, se obtuvo que, aunque los tres tableros experimentaron una disminución en el ángulo de contacto con el tiempo, la tasa de cambio en el ángulo de contacto para el tablero estándar fue mayor que la tasa de cambio para los otros dos tableros. Estos resultados sugieren que la concentración de humectante no tiene un efecto directo sobre la tensión superficial del tablero, y que otros factores pueden estar afectando el comportamiento del agua sobre la superficie del tablero. En conclusión, el experimento realizado proporcionó resultados no esperados con respecto al impacto de la concentración de humectante sobre la tensión superficial del tablero impregnado. Se necesitan más investigaciones para comprender completamente los factores que afectan el comportamiento del agua sobre la superficie del tablero y cómo la concentración de humectante puede afectar la tensión superficial de diferentes materiales. No obstante, es importante señalar que aún queda por explorar el potencial de la combinación de surfactantes y otros aspectos que podrían contribuir a una comprensión aún más completa de su desempeño en este contexto industrial. Estas áreas de investigación futura podrían abrir nuevas oportunidades para refinamientos adicionales en el proceso de impregnación de papel en la industria de tableros, lo que potencialmente mejoraría tanto la calidad como la eficiencia de dicho proceso. En conjunto, esta investigación ha contribuido a una mejor comprensión de cómo los surfactantes y las propiedades superficiales impactan en el proceso de impregnación de papel en la industria de tableros.

Fuera de estándar... algunas
parten con apellido, otras con la
inicial del nombre. Títulos de revistas,
algunos normal otros itálicos...
revisar cuidadosamente

Referencias

- [1] Tadros, T. F. (2021). *Applied Surfactants: Principles and Applications*. Wiley-VCH: Weinheim, Germany. DOI:10.1002/3527604812
- [2] Shanbedi, M., Zeinali Heris, S., Maskooki, A. (2015). Experimental investigation of stability and thermophysical properties of carbon nanotubes suspension in the presence of different surfactants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120, 1193–1201. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4404-8>
- [3] Jha, K., Bhattarai, A., Chatterjee, S. K. (2013). Surface Tension Studies on the Micellization of Cetyltrimethylammonium Bromide in Presence and Absence of KCl and NaCl in Aqueous Media at Room Temperature. *BIBECHANA*, 10, 52–57. <https://doi.org/10.3126/bibechana.v10i0.9311>
- [4] Tobin, J. G. (s.f.). Descripción del manual de operación de Sensadyne. Mesa, AZ: SensaDyne Instrument Div., Chem-Dyne Research Corporation.
- [5] Krüss Scientific (2019). Concentración micelar crítica (CMC) y concentración de surfactante. <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/critical-micelle-concentration-cmc-and-surfactant-concentration>
- [6] Ahmed, T. (2019). Chapter 4 - Fundamentals of Rock Properties. In *Reservoir Engineering Handbook* (5th ed., pp. 189–287). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-803-7.50012-2>
- [7] Nagarajan, R., Ruckenstein, E. (1991). Theory of surfactant self-assembly:

-
- a predictive molecular thermodynamic approach. *Langmuir*, 7, 2934–2969. <https://doi.org/10.1021/la00060a012>
- [8] Enders, S., Häntzschel, D. (1998), Thermodynamics of aqueous carbohydrate surfactant solutions. *Fluid Phase Equilibria*, 153, 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0378-3812\(98\)00418-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3812(98)00418-X)
- [9] Asscher, M., Zeiri, Y. (2003). Surface Processes Induced by Collisions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107, 6903–6919. <https://doi.org/10.1021/jp022099x>.
- [10] D. M. Hercules, A. Proctor and M. Houalla (1994). Quantitative Analysis of Mixed Oxidation States in Supported Catalysts, *Accts. Chem. Res.*, 27, 387-393 <https://doi.org/10.1021/ar00048a001>
- [11] J. Kiss, D.J. Alberas, J.M. White. (1992). Surface-aligned photoreaction of DBr with C₂H₄ on Pt(111). *J. Am. Chem. Soc.* 114, 10486–10492. <https://doi.org/10.1021/ja00052a052>
- [12] Gellman, A. J., Tysoe, W. T., Zaera, F. (2015). Surface Chemistry for Enantioselective Catalysis. *Catalysis Letters*, 145, 220-232. <https://doi.org/10.1007/s10562-014-1400-8>
- [13] Tobin, J. G., Robey, S. W., Klebanoff, L. E., Shirley, D. A. (1987). Development of a three-dimensional valence-band structure in Ag overlayers on Cu(001). *Physical Review B*, 35, 9056. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.35.9056>
- [14] Pan, U.-M., Stair, P. C., Fleisch, T. H. (1986). Chemisorption of pyridine and pyrrole on iron oxide surfaces studied by XPS. *Surface Science*, 177, 1-13.

[https://doi.org/10.1016/0039-6028\(86\)90253-0](https://doi.org/10.1016/0039-6028(86)90253-0).

- [15] Oliveira, R. R. L., Albuquerque, D. A. C., Cruz, T., Yamaji, F., Leite, F. (2012). Measurement of the Nanoscale Roughness by Atomic Force Microscopy: Basic Principles and Applications. <https://doi.org/10.5772/37583>
- [16] Haddadian, F., et al. (1999). Separation of Saturated and Unsaturated Free Fatty Acids Using Capillary Electrophoresis with Indirect Photometric Detection. *Journal of Chromatographic Science*, 37, 103–107. <https://doi.org/10.1093/chromsci/37.4.103>
- [17] Hsiao, E. C., Falconer, J. L. (1991). Adsorption sites on Pd/Al₂O₃. *Journal of Catalysis*, 131, 410-420. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(91\)90254-2](https://doi.org/10.1016/0021-9517(91)90254-2).
- [18] McBreen, P. H., Erley, W., Ibach, H. (1983). The adsorption and decomposition of methanol on Fe(110). *Surface Science*, 133(2–3), L469-L474. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(83\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0039-6028(83)90002-X)
- [19] Roberts, J. T., Friend, C. M. (1988). Spectroscopic identification of surface phenyl thiolate and benzyne on Mo(110). *The Journal of Chemical Physics*, 88, 7172-7180. <https://doi.org/10.1063/1.454369>
- [20] Ghiotti, G., Chiorino, A., Boccuzzi, F. (1993). Surface chemistry and electronic effects of H₂ (D₂) on two different microcrystalline ZnO powders. *Surface Science*, 228-234. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(93\)90776-G](https://doi.org/10.1016/0039-6028(93)90776-G)
- [21] Lander, J. J. (1964). Chemisorption and ordered surface structures. *Surface Science*,

1, 125-164. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(64\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0039-6028(64)90024-X)

- [22] Sexton, B. A. (1979). Surface vibrations of adsorbed intermediates in the reaction of alcohols with Cu(100). *Surface Science*, 85(2-3), 299-318. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(79\)90077-3](https://doi.org/10.1016/0039-6028(79)90077-3)
- [23] Saber, J. M., Falconer, J. L., Brown, L. F. (1984). Carbon dioxide gasification of carbon black: Isotope study of carbonate catalysis. *Journal of Catalysis*, 90, 65-74. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(84\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0021-9517(84)90085-X).
- [24] You, R., Li, Z., Zeng, H., Huang, W. (2018). A flow-pulse adsorption-microcalorimetry system for studies of adsorption processes on powder catalysts. *Review of Scientific Instruments*, 89, 064101. <https://doi.org/10.1063/1.5024253>
- [25] Stone, P., Bennett, R. A., Poulston, S., Bowker, M. (1999). Scanning tunnelling microscopy and Auger electron spectroscopy study of Pd on TiO₂(110). *Surface Science*, 433-435, 501-505. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(99\)00485-9](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(99)00485-9) .
- [26] Fowler, R.H. and Guggenheim, E.A. (1949) *Statistical Thermodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [27] Lewandowski, M., Pabisiak, T., Michalak, N., Miłosz, Z., Babačić, V., Wang, Y., Hermanowicz, M., Palotás, K., Jurga, S., Kiejna, A. (2018). On the Structure of Ultrathin FeO Films on Ag(111). *Nanomaterials*, 8(10), 828. <https://doi.org/10.3390/nano8100828>

-
- [28] Tanford, C. (1974). Theory of micelle formation in aqueous solutions. *Journal of Physical Chemistry A*, 78, 2469-2479. <https://doi.org/10.1021/j100617a012>
- [29] Nagarajan, R., Ruckenstein, E. (1979). Aggregation of amphiphiles as micelles or vesicles in aqueous. *Journal of colloid and interface science*, 71, 580-604. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(79\)90331-X](https://doi.org/10.1016/0021-9797(79)90331-X)
- [30] Blankschtein, D., Thurston, G. M., Benedek, G. B. (1985). Theory of phase separation in micellar solutions. *Physical Review Letters*, 54, 955-958. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.955>
- [31] Puvvada, S., Blankschtein, D. (1990). Molecular thermodynamic approach to predict micellization, phase behavior and phase separation of micellar solutions. I. Application to nonionic surfactants. *The Journal of Chemical Physics*, 92, 3710-3724. <https://doi.org/10.1063/1.457829>
- [32] Nagarajan, R., Ruckenstein, E. (1991). Theory of surfactant self-assembly: a predictive molecular thermodynamic approach. *Langmuir*, 7, 2934-2969. <https://doi.org/10.1021/la00060a012>.
- [33] Nagarajan, R. (2003). Theory of micelle formation. In K. Esumi and M. Ueno (Eds.), *Structure-Performance Relationships in Surfactants*, 1-110, New York: Marcel Dekker.
- [34] Danov, K. D., Kralchevsky, P. A., Stoyanov, S. D., Cook, J. L., Stott, I. P., Pelan, E. G. (2018). Growth of wormlike micelles in nonionic surfactant solutions: Quantitative theory vs. experiment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 256, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.05.006>
- [35] Mukerjee, P. (1972). Size distribution of small and large micelles. Multiple equilibrium analysis. *The Journal of Physical Chemistry*, 76, 565-570.

<https://doi.org/10.1021/j100648a019>

- [36] Patrone, P. N., Dienstfrey, A., Browning, A. R., Tucker, S., Christensen, S. (2016). Uncertainty quantification in molecular dynamics studies of the glass transition temperature. *Polymer*, 87, 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.01.074>
- [37] Mohajeri, E., Noudeh, G. D. (2012). Effect of temperature on the critical micelle concentration and micellization thermodynamic of nonionic surfactants: Polyoxyethylene sorbitan fatty acid esters. *Hindawi / E-J. Chem.*, 9, 2268–2274.
- [38] Tween® 80 (polisorbato) CAS 9005-65-6 | 817061. (s. f.). Merck Millipore. Recuperado el 8 de enero de 2023, de <https://www.merckmillipore.com/CL/es/product/Tween-80-Polysorbate,MDACHEM-817061>
- [39] Merck Millipore. (n.d.). Triton® X-100 CAS 9036-19-5 | 112298. Recuperado el 8 de enero de 2023, de <https://www.merckmillipore.com/CL/es/product/Triton-X-100,MDACHEM-112298>
- [40] Ae Yoon, K., Burgess, D. J. (1996). Effect of nonionic surfactant on transport of model drugs in emulsions. *Pharmaceutical Research*, 13, 433-439. <https://doi.org/10.1023/A:1016052811789>
- [41] Healy, T. W., Treybal, R. W. (1967). *Surface and interfacial tension*. McGraw-Hill: New York.
- [42] Young, T. (1805). An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65-87. <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>

Capítulo 6

Apéndices

A1. Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea

Tabla A1.1: Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
1	52.2	51	51.6	41	51	49.8	50.4	81	49.2	48.7	48.9
2	52.3	50.9	51.6	42	51	49.8	50.4	82	49.2	48.6	48.9
3	52.2	50.8	51.5	43	51	49.8	50.4	83	49.2	48.5	48.8
4	52.2	50.9	51.6	44	50.9	49.7	50.3	84	49.2	48.5	48.8
5	52.2	51	51.6	45	50.9	49.7	50.3	85	49.2	48.5	48.8
6	52.2	50.9	51.5	46	50.9	49.7	50.3	86	49.2	48.6	48.9
7	52.1	50.8	51.4	47	50.9	49.6	50.2	87	49.2	48.6	48.9
8	52.1	50.9	51.5	48	50.9	49.8	50.3	88	49.1	48.4	48.8
9	52	50.8	51.4	49	50.9	49.7	50.3	89	49.1	48.5	48.8
10	52	50.7	51.3	50	50.9	49.8	50.3	90	49.1	48.5	48.8
11	52	50.5	51.2	51	49.7	48.9	49.3	91	49	48.4	48.7
12	52	50.6	51.3	52	49.7	48.9	49.3	92	49.1	48.6	48.8
13	51.9	50.5	51.2	53	49.7	48.9	49.3	93	49	48.5	48.7
14	51.9	50.4	51.2	54	49.6	48.9	49.3	94	48.9	48.4	48.7
15	51.9	50.5	51.2	55	49.6	48.9	49.2	95	48.9	48.4	48.7
16	51.9	50.4	51.1	56	49.6	48.9	49.2	96	48.9	48.4	48.6
17	51.9	50.4	51.1	57	49.6	48.8	49.2	97	48.9	48.4	48.7
18	51.8	50.4	51.1	58	49.6	48.8	49.2	98	48.8	48.5	48.6
19	51.9	50.3	51.1	59	49.6	48.7	49.1	99	48.8	48.3	48.6
20	51.8	50.3	51	60	49.5	48.9	49.2	100	48.8	48.3	48.6
21	51.8	50.3	51.1	61	49.5	48.6	49.1	101	48.6	48.2	48.4
22	51.8	50.2	51	62	49.5	48.7	49.1	102	48.6	48.1	48.3
23	51.8	50.3	51	63	49.4	48.8	49.1	103	48.5	48.2	48.4
24	51.8	50.2	51	64	49.4	48.6	49	104	48.5	48.2	48.4
25	51.8	50.1	50.9	65	49.4	48.7	49.1	105	48.5	48.2	48.4
26	51.8	50.1	51	66	49.4	48.7	49.1	106	48.5	48.1	48.3
27	51.7	50.1	50.9	67	49.4	48.8	49.1	107	48.5	48.1	48.3
28	51.8	50.2	51	68	49.4	48.8	49.1	108	48.5	48.1	48.3
29	51.7	50.1	50.9	69	49.4	48.7	49	109	48.5	48.2	48.3
30	51.6	50.1	50.8	70	49.4	48.7	49	110	48.5	48.2	48.4
31	51.5	50	50.8	71	49.4	48.6	49	111	48.5	48	48.3
32	51.5	50.1	50.8	72	49.3	48.5	48.9	112	48.5	48.2	48.4
33	51.4	50.1	50.7	73	49.3	48.6	48.9	113	48.5	48.1	48.3
34	51.4	50	50.7	74	49.3	48.6	48.9	114	48.4	48	48.2
35	51.2	49.9	50.6	75	49.3	48.7	49	115	48.4	48.1	48.3
36	51.1	50	50.5	76	49.3	48.6	48.9	116	48.4	48	48.2
37	51.1	49.9	50.5	77	49.3	48.5	48.9	117	48.4	48	48.2
38	51	50	50.5	78	49.2	48.6	48.9	118	48.5	48.1	48.3
39	51	49.9	50.5	79	49.2	48.6	48.9	119	48.4	48.1	48.3
40	51	49.8	50.4	80	49.2	48.5	48.9	120	48.4	48.1	48.3

Tabla A1.2: Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
121	48.4	48	48.2	161	60.8	61.1	60.9	201	64.8	65.6	65.2
122	48.4	48	48.2	162	60.7	61.1	60.9	202	64.7	65.8	65.3
123	48.4	48.1	48.3	163	60.7	61	60.9	203	64.7	65.8	65.2
124	48.4	48	48.2	164	60.6	61	60.8	204	64.7	65.7	65.2
125	48.4	48	48.2	165	60.6	61	60.8	205	64.7	65.8	65.2
126	48.3	48	48.2	166	60.5	61	60.7	206	64.6	65.9	65.2
127	48.3	48	48.2	167	60.4	60.9	60.7	207	64.6	66	65.3
128	48.3	48	48.2	168	60.4	60.9	60.7	208	64.5	66.2	65.3
129	48.3	48	48.1	169	60.4	60.9	60.6	209	64.5	66.3	65.4
130	48.3	48	48.1	170	60.4	60.9	60.6	210	64.4	66.4	65.4
131	48.3	48	48.1	171	60.4	60.8	60.6	211	64.4	66.5	65.5
132	48.3	48	48.1	172	60.4	60.8	60.6	212	64.4	66.5	65.4
133	48.2	48	48.1	173	60.4	60.7	60.6	213	64.3	66.6	65.4
134	48.2	48	48.1	174	60.4	60.8	60.6	214	64.3	66.6	65.4
135	48.1	47.9	48	175	60.3	60.7	60.5	215	64.3	66.3	65.3
136	48	47.9	48	176	60.3	60.7	60.5	216	64.3	66.3	65.3
137	48	47.9	47.9	177	60.3	60.7	60.5	217	64.2	66.5	65.3
138	48	48	48	178	60.3	60.6	60.5	218	64.1	66.5	65.3
139	48	47.9	47.9	179	60.2	60.7	60.5	219	64.1	66.4	65.3
140	48	47.9	47.9	180	60.2	60.7	60.4	220	64.2	66.3	65.2
141	48	47.9	47.9	181	60.2	60.6	60.4	221	64.2	66.4	65.3
142	47.9	47.8	47.9	182	60.1	60.6	60.4	222	64.1	66.3	65.2
143	47.9	47.8	47.8	183	60.1	60.6	60.4	223	64	66.3	65.2
144	47.9	47.8	47.8	184	60.1	60.6	60.4	224	64	66.3	65.2
145	47.9	47.8	47.9	185	60.1	60.5	60.3	225	63.9	66.5	65.2
146	47.9	47.9	47.9	186	60.1	60.6	60.3	226	63.9	66.5	65.2
147	47.9	47.8	47.8	187	60.1	60.5	60.3	227	63.9	66.1	65
148	47.9	47.6	47.7	188	60.1	60.5	60.3	228	63.7	66.1	64.9
149	47.8	47.7	47.8	189	60.1	60.4	60.2	229	63.7	66.2	64.9
150	47.8	47.7	47.7	190	60.1	60.3	60.2	230	63.6	66.1	64.9
151	61.3	61.8	61.6	191	60.1	60.3	60.2	231	63.6	66.2	64.9
152	61.2	61.8	61.5	192	60.1	60.2	60.2	232	63.6	66.1	64.8
153	61.3	61.7	61.5	193	60	60.3	60.1	233	63.5	66.1	64.8
154	61.3	61.6	61.4	194	59.8	60.2	60	234	63.5	66.1	64.8
155	61	61.6	61.3	195	59.9	60.2	60	235	63.5	65.9	64.7
156	60.9	61.5	61.2	196	59.8	60.1	60	236	63.5	66.1	64.8
157	60.8	61.4	61.1	197	59.8	60.1	60	237	63.5	66	64.7
158	60.8	61.3	61.1	198	59.7	60.1	59.9	238	63.5	66	64.8
159	60.8	61.2	61	199	59.7	60.1	59.9	239	63.5	65.9	64.7
160	60.8	61.2	61	200	59.7	60.1	59.9	240	63.5	65.8	64.7

Tabla A1.3: Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
241	63.4	65.8	64.6	281	62.5	64.6	63.6	321	60.7	58.2	59.5
242	63.4	65.7	64.6	282	62.5	64.6	63.5	322	60.8	58.2	59.5
243	63.3	65.9	64.6	283	62.5	64.5	63.5	323	60.8	58.2	59.5
244	63.4	65.7	64.6	284	62.5	64.5	63.5	324	60.8	58.2	59.5
245	63.4	65.7	64.6	285	62.4	64.7	63.6	325	60.7	58.2	59.4
246	63.3	65.9	64.6	286	62.4	64.6	63.5	326	60.7	58.2	59.5
247	63.3	65.9	64.6	287	62.4	64.6	63.5	327	60.7	58.2	59.5
248	63.3	65.8	64.5	288	62.4	64.6	63.5	328	60.8	58.2	59.5
249	63.2	66.1	64.6	289	62.4	64.4	63.4	329	60.7	58.2	59.4
250	63.2	66	64.6	290	62.4	64.4	63.4	330	60.7	58.2	59.5
251	63.1	66	64.5	291	62.3	64.4	63.4	331	60.7	58.2	59.4
252	63	65.9	64.4	292	62.3	64.6	63.5	332	60.7	58.2	59.4
253	63.1	65.8	64.4	293	62.3	64.6	63.5	333	60.7	58.1	59.4
254	63	65.6	64.3	294	62.3	64.6	63.4	334	60.7	58.1	59.4
255	63	65.8	64.4	295	62.3	64.3	63.3	335	60.7	58.1	59.4
256	63	65.8	64.4	296	62.3	64.6	63.4	336	60.7	58.1	59.4
257	63	65.5	64.3	297	62.3	64.6	63.4	337	60.7	58.1	59.4
258	62.8	65.7	64.3	298	62.3	64.6	63.4	338	60.6	58.1	59.4
259	62.9	65.7	64.3	299	62.3	64.4	63.3	339	60.7	58.1	59.4
260	62.9	65.5	64.2	300	62.3	64.2	63.2	340	60.7	58.1	59.4
261	62.8	65.7	64.3	301	60.8	58.4	59.6	341	60.7	58.1	59.4
262	62.8	65.5	64.2	302	60.9	58.5	59.7	342	60.7	58.1	59.4
263	62.8	65.6	64.2	303	60.9	58.4	59.7	343	60.6	58.1	59.4
264	62.7	65.7	64.2	304	60.8	58.4	59.6	344	60.7	58.1	59.4
265	62.7	65.7	64.2	305	60.9	58.4	59.6	345	60.6	58.1	59.4
266	62.7	65.4	64.1	306	60.8	58.4	59.6	346	60.6	58.1	59.3
267	62.7	65.3	64	307	60.8	58.4	59.6	347	60.6	58.1	59.3
268	62.7	65.5	64.1	308	60.9	58.4	59.6	348	60.6	58.1	59.3
269	62.6	65.6	64.1	309	60.7	58.4	59.5	349	60.6	58	59.3
270	62.6	65.5	64	310	60.8	58.4	59.6	350	60.6	58.1	59.3
271	62.6	65.2	63.9	311	60.8	58.4	59.6	351	60.3	57.3	58.8
272	62.6	65	63.8	312	60.8	58.4	59.6	352	60.3	57.3	58.8
273	62.6	64.9	63.7	313	60.7	58.3	59.5	353	60.3	57.2	58.8
274	62.5	64.7	63.6	314	60.8	58.3	59.5	354	60.2	57.2	58.7
275	62.5	65	63.8	315	60.8	58.3	59.6	355	60.2	57.2	58.7
276	62.5	65	63.7	316	60.8	58.3	59.6	356	60.3	57.2	58.7
277	62.5	64.8	63.6	317	60.7	58.3	59.5	357	60.3	57.1	58.7
278	62.5	64.9	63.7	318	60.7	58.3	59.5	358	60.2	57.1	58.6
279	62.5	64.8	63.7	319	60.7	58.3	59.5	359	60.2	57	58.6
280	62.5	64.7	63.6	320	60.8	58.2	59.5	360	60.2	57	58.6

Tabla A1.4: Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.02 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
No.	Left	Right	Mean	41	26	26	26	81	25.9	25	25.4
1	26.6	26.8	26.7	42	26	25.9	26	82	25.9	25	25.4
2	26.6	26.7	26.6	43	26	25.9	25.9	83	25.9	25	25.4
3	26.5	26.7	26.6	44	26	25.8	25.9	84	25.8	24.9	25.4
4	26.5	26.7	26.6	45	26	25.8	25.9	85	25.8	24.9	25.4
5	26.5	26.7	26.6	46	25.9	25.8	25.9	86	25.9	24.9	25.4
6	26.5	26.7	26.6	47	25.9	25.7	25.8	87	25.8	24.9	25.4
7	26.5	26.6	26.6	48	25.9	25.8	25.8	88	25.9	24.9	25.4
8	26.5	26.6	26.5	49	25.9	25.7	25.8	89	25.9	24.9	25.4
9	26.4	26.6	26.5	50	25.9	25.7	25.8	90	25.8	24.9	25.4
10	26.4	26.6	26.5	51	25.7	25.3	25.5	91	25.8	24.9	25.4
11	26.4	26.6	26.5	52	25.7	25.3	25.5	92	25.9	24.9	25.4
12	26.4	26.6	26.5	53	25.7	25.3	25.5	93	25.9	24.9	25.4
13	26.4	26.6	26.5	54	25.7	25.3	25.5	94	25.8	24.8	25.3
14	26.4	26.5	26.4	55	25.7	25.3	25.5	95	25.9	24.9	25.4
15	26.3	26.5	26.4	56	25.7	25.2	25.5	96	25.8	24.8	25.3
16	26.3	26.5	26.4	57	25.7	25.3	25.5	97	25.8	24.8	25.3
17	26.3	26.4	26.4	58	25.7	25.2	25.5	98	25.9	24.8	25.3
18	26.3	26.4	26.4	59	25.7	25.3	25.5	99	25.8	24.8	25.3
19	26.3	26.4	26.4	60	25.7	25.3	25.5	100	25.8	24.8	25.3
20	26.3	26.4	26.3	61	26	25.3	25.6	101	25.7	24.7	25.2
21	26.3	26.4	26.3	62	25.7	25.2	25.5	102	25.7	24.7	25.2
22	26.2	26.3	26.3	63	25.7	25.2	25.5	103	25.7	24.7	25.2
23	26.3	26.3	26.3	64	25.7	25.2	25.4	104	25.7	24.7	25.2
24	26.2	26.3	26.3	65	25.7	25.2	25.4	105	25.7	24.7	25.2
25	26.2	26.3	26.3	66	25.6	25.2	25.4	106	25.7	24.6	25.2
26	26.2	26.3	26.3	67	25.7	25.2	25.4	107	25.7	24.6	25.2
27	26.2	26.2	26.2	68	26	25.2	25.6	108	25.7	24.7	25.2
28	26.2	26.2	26.2	69	25.6	25.1	25.4	109	25.7	24.6	25.2
29	26.2	26.2	26.2	70	25.6	25.1	25.4	110	25.7	24.6	25.2
30	26.2	26.2	26.2	71	25.9	25.1	25.5	111	25.7	24.6	25.2
31	26.2	26.2	26.2	72	25.6	25.1	25.4	112	25.7	24.6	25.2
32	26.1	26.1	26.1	73	25.9	25.1	25.5	113	25.7	24.6	25.2
33	26.1	26.2	26.2	74	25.9	25.1	25.5	114	25.7	24.6	25.2
34	26.1	26.2	26.1	75	25.9	25.1	25.5	115	25.7	24.6	25.1
35	26.1	26.2	26.1	76	25.9	25	25.5	116	25.7	24.6	25.1
36	26.1	26.2	26.1	77	25.6	25	25.3	117	25.7	24.6	25.1
37	26.1	26.1	26.1	78	25.9	25	25.5	118	25.7	24.6	25.1
38	26.1	26.1	26.1	79	25.9	25	25.5	119	25.7	24.6	25.1
39	26.1	26.1	26.1	80	25.9	25	25.5	120	25.7	24.6	25.1

Tabla A1.5: Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.02 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
121	25.7	24.6	25.1	161	25.5	24.3	24.9	201	25.5	26.8	26.2
122	25.7	24.6	25.1	162	25.5	24.3	24.9	202	25.5	26.8	26.2
123	25.7	24.5	25.1	163	25.5	24.3	24.9	203	25.5	26.8	26.2
124	25.7	24.5	25.1	164	25.5	24.2	24.9	204	25.5	26.8	26.2
125	25.7	24.6	25.1	165	25.5	24.2	24.9	205	25.5	26.8	26.2
126	25.7	24.5	25.1	166	25.5	24.3	24.9	206	25.5	26.8	26.2
127	25.7	24.5	25.1	167	25.5	24.2	24.9	207	25.5	26.8	26.2
128	25.7	24.5	25.1	168	25.5	24.2	24.8	208	25.5	26.8	26.2
129	25.7	24.5	25.1	169	25.5	24.2	24.9	209	25.5	26.9	26.2
130	25.7	24.5	25.1	170	25.5	24.2	24.9	210	25.5	26.8	26.2
131	25.7	24.5	25.1	171	25.5	24.2	24.8	211	25.5	26.9	26.2
132	25.6	24.5	25.1	172	25.5	24.2	24.8	212	25.5	26.9	26.2
133	25.6	24.5	25.1	173	25.5	24.2	24.8	213	25.5	26.8	26.2
134	25.6	24.5	25	174	25.4	24.2	24.8	214	25.5	26.8	26.2
135	25.7	24.5	25.1	175	25.5	24.2	24.8	215	25.5	26.8	26.2
136	25.7	24.5	25.1	176	25.5	24.2	24.8	216	25.5	26.8	26.2
137	25.7	24.5	25.1	177	25.5	24.1	24.8	217	25.5	26.8	26.2
138	25.6	24.4	25	178	25.5	24.1	24.8	218	25.5	26.9	26.2
139	25.6	24.5	25	179	25.5	24.1	24.8	219	25.5	26.8	26.2
140	25.6	24.4	25	180	25.4	24.2	24.8	220	25.5	26.8	26.1
141	25.6	24.4	25	181	25.4	24.2	24.8	221	25.5	26.8	26.2
142	25.6	24.5	25	182	25.5	24.1	24.8	222	25.5	26.8	26.1
143	25.6	24.5	25	183	25.4	24.1	24.8	223	25.5	26.8	26.2
144	25.6	24.5	25.1	184	25.4	24.2	24.8	224	25.4	26.9	26.1
145	25.6	24.4	25	185	25.5	24.1	24.8	225	25.5	26.8	26.2
146	25.6	24.4	25	186	25.4	24.1	24.8	226	25.4	26.8	26.1
147	25.6	24.5	25	187	25.4	24.2	24.8	227	25.5	26.8	26.1
148	25.6	24.4	25	188	25.4	24.1	24.8	228	25.5	26.8	26.2
149	25.6	24.4	25	189	25.4	24.1	24.8	229	25.4	26.8	26.1
150	25.6	24.4	25	190	25.5	24.1	24.8	230	25.4	26.8	26.1
151	25.6	24.4	25	191	25.5	24.1	24.8	231	25.4	26.8	26.1
152	25.5	24.3	24.9	192	25.4	24.1	24.8	232	25.4	26.8	26.1
153	25.5	24.3	24.9	193	25.4	24.1	24.8	233	25.4	26.8	26.1
154	25.5	24.4	24.9	194	25.5	24.1	24.8	234	25.4	26.8	26.1
155	25.5	24.3	24.9	195	25.4	24.1	24.8	235	25.4	26.8	26.1
156	25.5	24.3	24.9	196	25.4	24.1	24.8	236	25.4	26.8	26.1
157	25.5	24.3	24.9	197	25.4	24.1	24.8	237	25.4	26.8	26.1
158	25.5	24.3	24.9	198	25.4	24.1	24.8	238	25.4	26.8	26.1
159	25.5	24.3	24.9	199	25.4	24	24.7	239	25.4	26.8	26.1
160	25.5	24.2	24.9	200	25.4	24.1	24.8	240	25.4	26.8	26.1

Tabla A1.6: Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.02 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
241	25.4	26.8	26.1	281	25.3	26.7	26	301	25.1	26.7	25.9
242	25.4	26.8	26.1	282	25.2	26.7	26	302	25.2	26.7	26
243	25.4	26.8	26.1	283	25.3	26.8	26	303	25.1	26.7	25.9
244	25.4	26.8	26.1	284	25.2	26.8	26	304	25.1	26.7	25.9
245	25.4	26.8	26.1	285	25.2	26.8	26	305	25.1	26.7	25.9
246	25.4	26.8	26.1	286	25.3	26.8	26	306	25.1	26.7	25.9
247	25.4	26.8	26.1	287	25.2	26.7	26	307	25.1	26.7	25.9
248	25.4	26.8	26.1	288	25.3	26.8	26	308	25.1	26.7	25.9
249	25.4	26.8	26.1	289	25.2	26.8	26	309	25.1	26.7	25.9
250	25.4	26.8	26.1	290	25.2	26.7	26	310	25.1	26.7	25.9
251	25.3	26.8	26.1	291	25.2	26.7	26	311	25.1	26.7	25.9
252	25.4	26.8	26.1	292	25.2	26.7	26	312	25.1	26.7	25.9
253	25.4	26.8	26.1	293	25.2	26.7	26	313	25.1	26.7	25.9
254	25.3	26.8	26.1	294	25.2	26.8	26	314	25.1	26.7	25.9
255	25.3	26.7	26	295	25.2	26.7	26	315	25.1	26.7	25.9
256	25.4	26.8	26.1	296	25.2	26.7	26	316	25.1	26.7	25.9
257	25.4	26.8	26.1	297	25.2	26.8	26	317	25.1	26.7	25.9
258	25.3	26.8	26.1	298	25.2	26.7	26	318	25.1	26.7	25.9
259	25.3	26.7	26	299	25.2	26.7	26	319	25.1	26.7	25.9
260	25.4	26.7	26	300	25.2	26.7	25.9	320	25.1	26.7	25.9
261	25.3	26.8	26	181	25.4	24.2	24.8	321	25.1	26.7	25.9
262	25.3	26.8	26.1	182	25.5	24.1	24.8	322	25.1	26.8	25.9
263	25.3	26.8	26	183	25.4	24.1	24.8	323	25.1	26.7	25.9
264	25.3	26.8	26	184	25.4	24.2	24.8	324	25.1	26.7	25.9
265	25.3	26.8	26.1	185	25.5	24.1	24.8	325	25.1	26.8	25.9
266	25.3	26.8	26.1	186	25.4	24.1	24.8	326	25.1	26.7	25.9
267	25.3	26.8	26	187	25.4	24.2	24.8	327	25.1	26.7	25.9
268	25.3	26.7	26	188	25.4	24.1	24.8	328	25.1	26.7	25.9
269	25.3	26.8	26	189	25.4	24.1	24.8	329	25.1	26.7	25.9
270	25.3	26.8	26	190	25.5	24.1	24.8	330	25.1	26.7	25.9
271	25.3	26.7	26	191	25.5	24.1	24.8	331	25.1	26.7	25.9
272	25.3	26.8	26	192	25.4	24.1	24.8	332	25	26.7	25.9
273	25.3	26.7	26	193	25.4	24.1	24.8	333	25	26.7	25.9
274	25.3	26.7	26	194	25.5	24.1	24.8	334	25.1	26.7	25.9
275	25.3	26.7	26	195	25.4	24.1	24.8	335	25.1	26.7	25.9
276	25.3	26.8	26	196	25.4	24.1	24.8	336	25	26.7	25.9
277	25.3	26.7	26	197	25.4	24.1	24.8	337	25	26.7	25.9
278	25.3	26.8	26	198	25.4	24.1	24.8	338	25	26.7	25.9
279	25.3	26.8	26	199	25.4	24	24.7	339	25	26.7	25.9
280	25.2	26.7	26	200	25.4	24.1	24.8	340	25	26.7	25.9

Tabla A1.10: Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.06 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
1	43.7	42	42.8	41	43.8	42.1	42.9	81	44.2	41.7	43
2	43.7	42.1	42.9	42	43.7	41.9	42.8	82	44.1	41.7	42.9
3	43.7	41.9	42.8	43	43.7	41.9	42.8	83	44.1	41.8	42.9
4	43.7	42.1	42.9	44	43.8	42	42.9	84	44.1	41.8	43
5	43.7	42.1	42.9	45	43.8	41.9	42.8	85	44.1	41.7	42.9
6	43.7	41.9	42.8	46	43.8	42.1	42.9	86	44.2	41.9	43
7	43.8	42.1	42.9	47	43.7	41.9	42.8	87	44.1	41.8	42.9
8	43.7	42	42.8	48	43.8	42	42.9	88	44.1	41.7	42.9
9	43.7	42.1	42.9	49	43.8	42	42.9	89	44.1	41.6	42.9
10	43.7	42.1	42.9	50	43.8	41.9	42.8	90	44.2	41.9	43
11	43.8	41.9	42.9	51	44	41.7	42.8	91	44.1	41.7	42.9
12	43.8	41.9	42.8	52	44.1	41.8	43	92	44.2	41.8	43
13	43.8	42.1	42.9	53	44	41.7	42.8	93	44.2	41.8	43
14	43.8	41.9	42.8	54	44	41.6	42.8	94	44.2	41.9	43
15	43.8	42	42.9	55	43.9	41.9	42.9	95	44.2	41.7	43
16	43.6	42	42.8	56	44	41.7	42.9	96	44.2	41.6	42.9
17	43.8	41.9	42.9	57	44	41.7	42.8	97	44.1	41.7	42.9
18	43.7	42	42.8	58	44.1	41.7	42.9	98	44.2	41.6	42.9
19	43.8	41.9	42.8	59	44	41.6	42.8	99	44.2	41.7	42.9
20	43.7	42	42.8	60	44.1	41.8	43	100	44.1	41.7	42.9
21	43.7	42	42.8	61	44	41.7	42.8	101	44.1	41.7	42.9
22	43.7	42	42.8	62	44	41.7	42.9	102	44.1	41.8	42.9
23	43.7	41.9	42.8	63	43.9	41.8	42.9	103	44.2	41.5	42.9
24	43.7	41.9	42.8	64	44.1	41.7	42.9	104	44.1	41.8	43
25	43.7	41.9	42.8	65	44	41.8	42.9	105	44.2	41.6	42.9
26	43.7	42	42.8	66	44.1	41.7	42.9	106	44.2	41.5	42.9
27	43.7	42	42.9	67	44	41.8	42.9	107	44.1	41.7	42.9
28	43.7	41.9	42.8	68	44.1	41.7	42.9	108	44.2	41.7	42.9
29	43.7	42	42.8	69	44	41.8	42.9	109	44.2	41.5	42.9
30	43.7	42	42.8	70	44.1	41.7	42.9	110	44.2	41.6	42.9
31	43.7	42	42.8	71	44.1	41.8	42.9	111	44.2	41.6	42.9
32	43.7	42	42.8	72	44.1	41.7	42.9	112	44.2	41.7	42.9
33	43.7	42	42.8	73	44.1	41.9	43	113	44.2	41.7	42.9
34	43.7	42	42.9	74	44.1	41.8	42.9	114	44.3	41.5	42.9
35	43.7	42.1	42.9	75	44	41.7	42.9	115	44.3	41.4	42.8
36	43.7	42	42.9	76	44.1	41.8	42.9	116	44.3	41.5	42.9
37	43.8	42	42.9	77	44.2	41.7	43	117	44.3	41.4	42.9
38	43.7	41.9	42.8	78	44.1	41.9	43	118	44.3	41.4	42.9
39	43.7	41.9	42.8	79	44	41.7	42.9	119	44.3	41.4	42.9
40	43.7	42	42.8	80	44.1	41.8	42.9	120	44.3	41.5	42.9

Tabla A1.11: Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.06 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
121	44.3	41.5	42.9	161	44.2	41.1	42.7	201	46.2	46.2	46.2
122	44.2	41.4	42.8	162	44.2	41.1	42.7	202	46.2	46.3	46.2
123	44.3	41.5	42.9	163	44.2	41.2	42.7	203	46.3	46.5	46.4
124	44.3	41.3	42.8	164	46.8	46.2	46.5	204	46.2	46.2	46.2
125	44.3	41.5	42.9	165	47	46.2	46.6	205	46.2	46.3	46.2
126	44.2	41.4	42.8	166	46.7	46.2	46.5	206	46.3	46	46.2
127	44.3	41.2	42.8	167	46.9	46	46.5	207	46.3	46.3	46.3
128	44.3	41.4	42.9	168	46.9	46.1	46.5	208	46.2	46.2	46.2
129	44.2	41.4	42.8	169	46.8	46.1	46.4	209	46.2	46.3	46.2
130	44.3	41.5	42.9	170	46.8	46.3	46.5	210	46	46.7	46.3
131	44.2	41.5	42.9	171	46.8	46.2	46.5	211	45.9	46.3	46.1
132	44.3	41.4	42.8	172	46.8	46.2	46.5	212	45.9	46.4	46.2
133	44.2	41.3	42.8	173	46.8	46.1	46.5	213	46	46.4	46.2
134	44.2	41.2	42.7	174	46.8	46.1	46.5	214	45.7	46.6	46.2
135	44.3	41.5	42.9	175	46.8	46.3	46.6	215	45.7	47	46.3
136	44.3	41.4	42.8	176	46.8	46.3	46.5	216	45.7	46.9	46.3
137	44.3	41.4	42.8	177	46.8	46.3	46.5	217	45.7	46.6	46.2
138	44.3	41.2	42.8	178	46.8	46.3	46.5	218	45.7	46.7	46.2
139	44.3	41.4	42.8	179	46.7	46.3	46.5	219	45.7	46.7	46.2
140	44.2	41.3	42.8	180	46.7	46.5	46.6	220	45.7	46.6	46.1
141	44.2	41.3	42.7	181	46.7	46.2	46.4	221	45.7	46.7	46.2
142	44.3	41.2	42.8	182	46.7	46.2	46.4	222	45.7	46.7	46.2
143	44.3	41.5	42.9	183	46.6	46.1	46.4	223	45.8	46.8	46.3
144	44.2	41.3	42.7	184	46.6	46.2	46.4	224	45.8	46.8	46.3
145	44.2	41.2	42.7	185	46.6	46.2	46.4	225	45.8	46.7	46.2
146	44.3	41.4	42.8	186	46.6	46.2	46.4	226	45.8	46.6	46.2
147	44.2	41.3	42.7	187	46.5	46.3	46.4	227	45.8	46.8	46.3
148	44.2	41.3	42.7	188	46.4	46.4	46.4	228	45.8	46.6	46.2
149	44.2	41.3	42.7	189	46.3	46.3	46.3	229	45.7	46.7	46.2
150	44.3	41.2	42.8	190	46.4	46.3	46.3	230	45.8	46.7	46.3
151	44.2	41.1	42.7	191	46.3	46.2	46.3	231	45.8	46.8	46.3
152	44.2	41.3	42.7	192	46.4	46.2	46.3	232	45.5	47	46.3
153	44.2	41.3	42.7	193	46.4	46.4	46.4	233	45.8	46.7	46.3
154	44.1	41.2	42.7	194	46.4	46.2	46.3	234	45.8	46.8	46.3
155	44.2	41.1	42.7	195	46.3	46.3	46.3	235	45.8	46.9	46.4
156	44.2	41.2	42.7	196	46.3	46.2	46.3	236	45.6	47	46.3
157	44.2	41.2	42.7	197	46.3	46.3	46.3	237	45.8	46.8	46.3
158	44.1	41.2	42.7	198	46.3	46.4	46.3	238	45.8	46.8	46.3
159	44.2	41.2	42.7	199	46.2	46.3	46.3	239	45.8	46.9	46.4
160	44.2	41.1	42.7	200	46.3	46.3	46.3	240	45.6	46.9	46.2

Tabla A1.12: Continuación Resultados prueba Ángulo de Contacto Úrea + 0.06 mL de Humectante

No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean	No.	Left	Right	Mean
241	45.5	47	46.2	281	45.1	47.6	46.3	321	40.7	40.4	40.5
242	45.8	46.9	46.3	282	45.1	47.6	46.3	322	40.7	40.3	40.5
243	45.5	46.9	46.2	283	45	46.9	46	323	40.7	40.5	40.6
244	45.5	46.9	46.2	284	45.1	47.6	46.3	324	40.8	40.3	40.6
245	45.5	47.1	46.3	285	45.1	47.6	46.4	325	40.7	40.3	40.5
246	45.5	46.9	46.2	286	45.1	47.6	46.4	326	40.7	40.3	40.5
247	45.5	47.1	46.3	287	44.9	47.7	46.3	327	40.8	40.4	40.6
248	45.5	46.9	46.2	288	45.1	47.8	46.5	328	40.8	40.3	40.6
249	45.5	46.9	46.2	289	44.9	47.7	46.3	329	40.7	40.3	40.5
250	45.5	46.9	46.2	290	45.1	47.7	46.4	330	40.7	40.3	40.5
251	45.5	47	46.3	291	45.1	46.9	46	331	40.8	40.4	40.6
252	45.4	46.9	46.2	292	45.1	46.9	46	332	40.8	40.4	40.6
253	45.5	47	46.3	293	44.8	47.8	46.3	333	40.6	40.5	40.6
254	45.4	46.8	46.1	294	44.9	47.9	46.4	334	40.7	40.4	40.6
255	45.5	47.3	46.4	295	44.9	47.7	46.3	335	40.8	40.4	40.6
256	45.5	47	46.2	296	45.1	47	46	336	40.6	40.5	40.5
257	45.5	47	46.2	297	44.9	47.8	46.4	337	40.6	40.6	40.6
258	45.5	47	46.2	298	44.9	47.8	46.4	338	40.8	40.5	40.6
259	45.5	47.1	46.3	299	44.9	47.9	46.4	339	40.8	40.4	40.6
260	45.5	47	46.3	300	44.9	47.9	46.4	340	40.6	40.4	40.5
261	45.4	47	46.2	301	44.9	47.7	46.3	341	40.6	40.6	40.6
262	45.5	47.1	46.3	302	45.2	47	46.1	342	40.6	40.5	40.6
263	45.3	47.4	46.4	303	45.1	47.1	46.1	343	40.6	40.6	40.6
264	45.2	47.1	46.2	304	44.9	47.8	46.3	344	40.6	40.6	40.6
265	45.2	46.9	46.1	305	44.9	47.8	46.3	345	40.6	40.4	40.5
266	45	47	46	306	44.9	47.1	46	346	40.6	40.6	40.6
267	45.3	47.2	46.2	307	44.9	48	46.4	347	40.6	40.5	40.6
268	45.2	46.8	46	308	44.8	47.1	46	348	40.6	40.5	40.5
269	45	47	46	309	44.9	47.9	46.4	349	40.6	40.5	40.6
270	45	47.5	46.2	310	44.8	47.9	46.3	350	40.7	40.7	40.7
271	45	47.4	46.2	311	44.9	47.8	46.3	351	40.6	40.6	40.6
272	45	47.7	46.4	312	44.8	47.6	46.2	352	40.6	40.5	40.6
273	45.3	46.9	46.1	313	44.9	47.7	46.3	353	40.6	40.5	40.6
274	45	47.5	46.2	314	40.7	40.3	40.5	354	40.7	40.6	40.6
275	45	47	46	315	40.7	40.3	40.5	355	40.6	40.5	40.6
276	45	47.5	46.2	316	40.8	40.3	40.5	356	40.7	40.7	40.7
277	45	47.2	46.1	317	40.7	40.3	40.5	357	40.6	40.6	40.6
278	45	47.6	46.3	318	40.7	40.3	40.5	358	40.6	40.7	40.6
279	45.1	46.9	46	319	40.7	40.2	40.5	359	40.6	40.6	40.6
280	45	47.6	46.3	320	40.8	40.4	40.6	360	40.7	40.6	40.7

A2. Reticulado

Muestras de melamina se evaluaron según norma ASTM D3359.

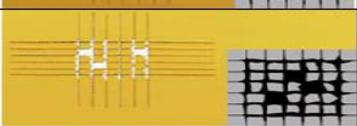
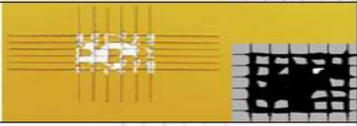
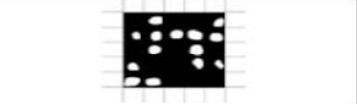
Clasificación		Descripción	Apariencia de la superficie de área de corte transversal (Ejemplo de seis cortes paralelos)
ISO 2409	ASTM D3359		
0	5B	Las orillas de los cortes están completamente limpias, ninguno de los cuadros del cuadrículado se desprendió.	
1	4B	Pequeñas hojuelas del recubrimiento se desprenden en las intersecciones; menos del 5% del área es afectada.	
2	3B	Pequeñas hojuelas del recubrimiento se desprenden a lo largo de la orilla y en las intersecciones de los cortes. El área afectada es de 5, no superando al 15% del cuadrículado.	
3	2B	Desprendimientos a lo largo de las orillas y en las partes de los cuadros. El área afectada es de 15, pero no mayor al 35 % del cuadrículado.	
4	1B	Desprendimientos a lo largo de las orillas y en algunos cuadros. El área afectada es de 35, pero no supera al 65 % del cuadrículado.	
5	0B	Desprendimiento peor que el grado 4/1B.	

Figura A2.1: Norma ASTM D3359