Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Optimización del sistema emulsificante para viabilizar el cambio de procedencia del n-butil acrilato en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada y su evaluación como ligante en pinturas satinadas

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Mishel Rosario ROMERO MARAVI

Lucia Gabriela HUASUPOMA ORTEGA

ASESOR

Dr. Cecilio Julio Alberto GARRIDO SCHAEFFER

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Romero, M. & Huasupoma, L. (2026). *Optimización del sistema emulsificante para viabilizar el cambio de procedencia del n-butil acrilato en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada y su evaluación como ligante en pinturas satinadas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Mishel Rosario Romero Maravi
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	60699378
URL de ORCID	
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Lucia Gabriela Huasupoma Ortega
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73258686
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Cecilio Julio Alberto Garrido Schaeffer
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08805437
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5039-1108
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	José Ángel Porlles Loarte
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	19386303
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Leoncio Reyna Mariñas

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	32374272
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Laboratorio de Empresa de Emulsiones en base acuosa (Nombre Confidencial) País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Santa Anita Urbanización: Los Ficus Calle: Minería 130 Latitud: -12.0505 (12° 3' 2" Sur) Longitud: -76.9734 (76° 58' 24" Oeste)
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2025 - Noviembre 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford Ciencia de los polímeros https://purl.org/pe-repo/ocde/ford Recubrimiento, Películas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.05.03

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "VI Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2026-I", bajo la Presidencia del **Dr. José Ángel Porlles Loarte;** el **Mg. Leoncio Reyna Mariñas (Miembro)** y el **Dr. Cecilio Julio Alberto Garrido Schaeffer (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Optimización del sistema emulsificante para viabilizar el cambio de procedencia del n-butil acrilato en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada y su evaluación como ligante en pinturas satinadas",** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por la bachiller en Ingeniería Química: **ROMERO MARAVI, MISHEL ROSARIO;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA,** acordaron calificarla con la **NOTA** de:

ineinte ..... (20)
(LETRAS) (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 20 de junio del 2026

Dr. JOSÉ ÁNGEL PORLLES LOARTE
Presidente

Mg. LEONCIO REYNA MARIÑAS
Miembro

Dr. CECILIO JULIO ALBERTO GARRIDO SCHAEFFER
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA
Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "VI Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2026-I", bajo la Presidencia del **Dr. José Ángel Porlles Loarte;** el **Mg. Leoncio Reyna Mariñas (Miembro)** y el **Dr. Cecilio Julio Alberto Garrido Schaeffer (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **"Optimización del sistema emulsificante para viabilizar el cambio de procedencia del n-butil acrilato en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada y su evaluación como ligante en pinturas satinadas",** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por la bachiller en Ingeniería Química: **HUASUPOMA ORTEGA, LUCIA GABRIELA;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA,** acordaron calificarla con la **NOTA** de:

Veinte (20)

(LETRAS) (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 20 de junio del 2026

Dr. JOSÉ ÁNGEL PORLLES LOARTE
Presidente

Mg. LEONCIO REYNA MARIÑAS
Miembro

Dr. CECILIO JULIO ALBERTO GARRIDO SCHAEFFER
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS • ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA • Facultad de Química e Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Cecilo Julio Alberto Garrido Schaeffer** en mi condición de asesor con el Dictamen N°000008-2026-EPIQ-FQIQ/UNMSM la tesis cuyo título es **Optimización del sistema emulsificante para viabilizar el cambio de procedencia del n-butil acrilato en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada y su evaluación como ligante en pinturas satinadas,** presentado por las bachilleres, **MISHEL ROSARIO ROMERO MARAVI y LUCIA GABRIELA HUASUPOMA ORTEGA,** para optar el título Profesional de Ingeniera Química.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 6% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Profesional de Ingeniera Química.

Lima, 9 de julio del 2026

Firma del Asesor _____

Nombres y Apellidos del asesor Cecilio Julio Alberto Garrido Schaeffer

DNI: 08805437

DEDICATORIA

A nuestros padres, por enseñarnos el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia, y por creer en nosotras aun en los momentos más exigentes.

A nuestras familias, por ser nuestro soporte constante y por acompañarnos con amor, paciencia y comprensión durante toda nuestra vida universitaria.

Dedicamos también esta tesis a la amistad que nació en el primer ciclo de nuestra carrera y que se fortaleció con el tiempo. Compartir este proceso nos permitió crecer no solo como futuras profesionales, sino también como personas. Esta investigación es el reflejo de nuestro compromiso, dedicación y del apoyo mutuo que nos acompañó hasta alcanzar la meta.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos principalmente a Dios, por acompañarnos durante este camino y darnos la fuerza necesaria para culminar esta investigación.

A nuestras familias, por estar presentes en cada etapa de nuestra formación, por su apoyo constante y por motivarnos a continuar aun cuando el proceso fue exigente. Cada palabra de aliento y cada muestra de confianza fueron importantes para llegar hasta aquí.

A nuestro asesor, Dr. Cecilio Julio Alberto Garrido Schaeffer, por su guía, observaciones y disposición durante el desarrollo de esta tesis. Sus recomendaciones nos ayudaron a mejorar el trabajo y a ordenar mejor nuestras ideas desde el punto de vista técnico y académico.

Finalmente, agradecemos a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, nuestra casa de estudios, por la formación recibida y permitirnos crecer como futuras profesionales de la Ingeniería Química.

ÍNDICE

RESUMEN 12

ABSTRACT 13

CAPÍTULO I 14

1.1. Introducción 14

1.2. Planteamiento del problema: 14

1.2.1. Determinación del problema 16

1.2.2. Formulación del problema 18

1.3. Objetivos 18

1.3.1. Objetivo general 18

1.3.2. Objetivos específicos 19

1.4. Importancia y alcance de la investigación 19

1.5. Limitaciones de la investigación 20

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA 21

2.1. Marco teórico 21

2.1.1. Industria de emulsiones poliméricas en base acuosa 21

2.1.2. Emulsiones poliméricas como materias primas para recubrimiento 22

2.1.3. Emulsiones acrílicas estirenadas 23

2.1.4. Función del n-butil acrilato en la emulsión acrílica estirenada 24

2.1.5. Viabilidad técnica del cambio de procedencia del n-butil acrilato 24

2.1.6. Influencia de la calidad del monómero en la síntesis de emulsiones 25

2.1.7. Sistema emulsificante en emulsiones acrílicas estirenadas 26

2.1.8. Optimización de la dosificación del sistema emulsificante 27

2.1.9. Formación de residuos durante la síntesis de emulsiones 28

2.1.10. Propiedades fisicoquímicas de control en emulsiones acrílicas estirenadas 29

2.1.11. Reología de emulsiones poliméricas en base acuosa 29

2.1.12. Evaluación del desempeño de la emulsión como ligante en pintura satinada 30

2.2. Antecedentes del estudio 31

2.3. Bases teóricas 34

2.3.1. Fundamentos de emulsiones acrílicas estirenadas 34

2.3.2. Fundamentos de la polimerización en emulsión 35

2.3.3. Sistema emulsificante y formación de micelas 38

2.3.4. Sistema iniciador y generación de radicales 39

2.3.5. Función de los tensoactivos aniónicos y no iónicos 39

2.3.6. Estabilidad coloidal y teoría DLVO 43

2.3.7. Temperatura de transición vítrea del copolímero 43

2.3.8. Temperatura mínima de formación de película 45

2.3.9. Reología en emulsiones poliméricas 46

2.3.10. Formación de coágulos en polimerización en emulsión 48

2.3.11. Propiedades fisicoquímicas del látex 48

2.3.12. Formación de película y desempeño en pinturas 49

2.4. Definición de términos 51

2.4.1. Acrilato de butilo (BUA) 51

2.4.2. Cambio de procedencia 51

2.4.3. Pureza 51

2.4.4. Inhibidor 51

2.4.5. Tensoactivo 52

2.4.6. Sistema emulsificante 52

2.4.7. Polimerización en emulsión 52

2.4.8. Emulsión acrílica estirenada 52

2.4.9. Látex polimérico 52

2.4.10. Ligante 53

2.4.11. Pintura satinada 53

2.4.12. Receta estándar de la empresa 53

2.4.13. Emulsión de referencia 53

2.4.14. Emulsión optimizada 53

2.4.15. Coágulo 53

2.4.16. Estabilidad coloidal 54

2.4.17. Micela 54

2.4.18. Concentración micelar crítica 54

2.4.19. Iniciador radicalario 54

2.4.20. Formación de película 54

2.4.21. Tamaño de partícula (DLS) 55

2.4.22. Reología 55

2.4.23. Comportamiento pseudoplástico 55

2.4.24. Temperatura de transición vítrea (Tg) 55

2.4.25. Temperatura mínima de formación de película (MFFT) 55

2.4.26. Test de filtración 56

2.4.27. Malla de filtración 56

2.4.28. Estabilidad acelerada 56

2.4.29. Curado de pintura 56

2.4.30. Frote húmedo/resistencia a la abrasión 56

2.4.31. Desfase o separación parcial 56

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES 57

3.1. Hipótesis 57

3.1.1. Hipótesis general 57

3.1.2. Hipótesis específicas 57

3.2. Identificación de variables 57

3.2.1. Variables independientes 57

3.2.2. Variables dependientes 58
3.2.3. Variables de control 58
3.3. Operacionalización de variables 58
3.4. Enfoque de la investigación 61
3.5. Tipo y nivel de investigación 61
3.6. Diseño experimental 61
CAPÍTULO IV 62
MATERIALES Y MÉTODOS 62
4.1. Área de estudio 62
4.2. Diseño de investigación 62
4.3. Población y muestra 63
4.4. Materiales 63
4.4.1. Monómeros principales 64
4.4.2. Monómeros funcionales 64
4.4.3. Sistema Emulsificante 64
4.4.4. Sistema iniciador y redox 64
4.4.5. Reguladores, conservante y auxiliares de proceso 64
4.5. Procedimiento experimental 65
4.5.1. Preparación de soluciones auxiliares 65
4.5.2. Preparación de pre-emulsión 65
4.5.3. Carga y acondicionamiento del reactor 66
4.5.4. Inicio de polimerización 67
4.5.5. Dosificación de semi-batch 68
4.5.6. Post- tratamiento para reducción de monómero residual 69
4.5.7. Ajuste final y acondicionamiento 69
4.5.8. Variación experimental 69
4.6. Ensayos de control de calidad 70

4.6.1. Evaluación fisicoquímica inicial del látex 71

4.6.2. Evaluación de estabilidad acelerada durante almacenamiento 74

4.6.3. Evaluación del desempeño como ligante en pintura satinada 77

CAPÍTULO V 83

ANÁLISIS DE RESULTADOS 83

5.1. Análisis de resultados de los ensayos 83

5.1.1. Evaluación de propiedades fisicoquímicas de las emulsiones 83

5.1.2. Turbidez 85

5.1.3. Formación de residuos y coágulos 86

5.1.4. Estabilidad acelerada 90

5.1.5. Evaluación en pintura 92

CAPÍTULO VI 95

DISCUSIÓN DE RESULTADOS 95

6.1. Influencia del cambio de procedencia del BUA en el proceso de polimerización 95

6.2. Efecto del sistema emulsificante sobre la formación de residuos 95

6.3. Interpretación de las propiedades fisicoquímicas iniciales: 96

6.4. Interpretación de la turbidez y formación de coágulos 97

6.5. Interpretación de estabilidad en el tiempo 98

6.6. Interpretación del desempeño en pintura satinada 99

6.7. Evaluación final 101

6.8. Consideración técnico-económica preliminar del ajuste emulsificante 102

CAPÍTULO VII 103

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 103

7.1. Conclusiones 103

7.2 Recomendaciones 105

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Variables relevantes en la polimerización en emulsión.....37

Tabla 2.2. Propiedades fisicoquímicas relevantes.....50

Tabla 3.1. Operacionalización de variables.....60

Tabla 4.1. Condiciones experimentales de los ensayos piloto.....70

Tabla 5.1. Propiedades fisicoquímicas iniciales de los ensayos piloto.....84

Tabla 5.2. Turbidez de las emulsiones obtenidas.....85

Tabla 5.3. Resultados del test de filtración.....89

Tabla 5.4. Evaluación de estabilidad acelerada de las emulsiones.....91

Tabla 5.5. Resultados de la evaluación en pintura satinada.....93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema general del mecanismo de polimerización en emulsión y rutas de formación de partículas.....36

Figura 2.2. Formación de micelas a partir de moléculas de tensoactivos.....38

Figura 2.3. Estabilización electrostática de partículas de látex mediante tensoactivos aniónicos.....40

Figura 2.4. Estabilización estérica de partículas de látex mediante tensoactivos no iónicos.....41

Figura 2.5. Acción complementaria de tensoactivos aniónicos y no iónicos en la estabilidad del látex.....42

Figura 2.6. Curva de energía según la teoría DLVO.....44

Figura 2.7. Temperatura de transición vítrea y cambio de comportamiento de un polímero.....45

Figura 2.8. Relación entre MFFT, temperatura de aplicación y formación de película en un látex estireno-acrílico.....47

Figura 2.9. Comportamiento reológico en emulsiones poliméricas.....48

Figura 2.10. Etapas de formación de película en sistemas poliméricos.....51

Figura 4.1. Reactor empleado para los ensayos piloto.....67

Figura 4.2. Dosificación de pre-emulsión y soluciones auxiliares durante la síntesis piloto.....68

Figura 4.3. Evidencia del test de filtración para la evaluación de residuos en las emulsiones piloto.....74

Figura 4.4. Evaluación de estabilidad acelerada en estufa a 52 °C de las emulsiones...76

Figura 4.5. Muestras de pintura satinada acondicionadas para evaluación de desempeño 77

Figura 4.6. Aplicación de pintura satinada sobre cartilla Leneta para evaluación de desempeño del recubrimiento 78

Figura 4.7. Aplicación de pintura satinada sobre bloques de concreto.....80

Figura 4.8. Estirado de pintura satinada sobre cartilla Leneta de poder cubriente.....81

Figura 4.9. Aplicación de pintura satinada sobre vidrio para evaluación de lámina…...82

Figura 5.1. Residuos retenidos durante la filtración del lote piloto completo mediante malla de 80 µm.....87

Figura 5.2. Estado interno del reactor luego de los ensayos piloto.....88

Figura 5.3. Residuos formados en el reactor durante el ensayo diagnóstico con BUA chino.....90

Figura 5.4. Evaluación de resistencia al frote húmedo de la pintura satinada.....94

RESUMEN

El presente estudio tiene como finalidad optimizar el sistema emulsificante empleado en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada, con el propósito de viabilizar el uso del n-butil acrilato de procedencia china como alternativa al de procedencia americana. Esta evaluación surgió a partir de una necesidad industrial relacionada con la disponibilidad y costo del BUA, considerando que el cambio de procedencia de una misma materia prima puede modificar el comportamiento del proceso de polimerización en emulsión. Esta optimización busca mejorar la estabilidad del proceso de polimerización y reducir la formación de residuos o coágulos en el reactor, los cuales pueden afectar la operatividad del proceso y la calidad final del ligante. Para ello, se realizaron ajustes controlados en la proporción del sistema emulsificante, con el fin de identificar la formulación que presente un desempeño comparable al obtenido con BUA de procedencia americana. La muestra estuvo conformada por lotes experimentales elaborados con BUA americano, BUA chino y BUA chino con incrementos del sistema emulsificante en 10 %, 15 % y 20 %. La calidad de las emulsiones obtenidas se evaluó mediante parámetros fisicoquímicos como contenido de sólidos, viscosidad, pH, turbidez, formación de coágulos mediante test de filtro, aspecto físico, color y estabilidad. Para esta última se realizó pruebas de estabilidad acelerada en estufa a 52°C, equivalentes a 3 meses, 6 meses y 1 año de vigencia de producto. Posteriormente, se formuló una pintura satinada utilizando la emulsión con mejor desempeño, evaluándose propiedades como viscosidad, pH, sólidos y resistencia a la abrasión a los 7 y 28 días. Finalmente, se concluyó que la optimización del sistema emulsificante resulta estratégicamente viable para reducir la formación de residuos asociados al uso del BUA de procedencia china, manteniendo las condiciones adecuadas para el uso del látex como producto intermedio.

Palabras clave: emulsión acrílica estirenada, n-butil acrilato, sistema emulsificante, tensoactivos, estabilidad coloidal, coágulos, pintura satinada.

ABSTRACT

The purpose of this study is to optimize the emulsifying system used in the synthesis of a styrene-acrylic emulsion, to enable the use of n-butyl acrylate of Chinese origin as an alternative to n-butyl acrylate of American origin. This evaluation arose from an industrial need related to the availability and cost of BUA, considering that a change in the origin of the same raw material may modify the behavior of the emulsion polymerization process. This optimization seeks to improve the stability of the polymerization process and reduce the formation of residues or clots in the reactor, which can affect process operability and the final quality of the binder. To achieve this, controlled adjustments were made to the proportion of the emulsifying system to identify a formulation with performance comparable to that obtained with BUA of American origin. The sample consisted of experimental batches made with American BUA, Chinese BUA, and Chinese BUA with increases in the emulsifying system of 10%, 15%, and 20%. The quality of the resulting emulsions was evaluated using physicochemical parameters such as solids content, viscosity, pH, turbidity, clot formation (via filter test), physical appearance, color, and stability. For the latter, accelerated stability tests were performed in an oven at 52°C, equivalent to 3, 6, and 1 year of product shelf life. Subsequently, satin paint was formulated using the best-performing emulsion, and properties such as viscosity, pH, solids content, and abrasion resistance were evaluated at 7 and 28 days. Finally, it was concluded that optimizing the emulsifying system is strategically viable for reducing the formation of residues associated with the use of BUA of Chinese origin, while maintaining suitable conditions for the use of latex as an intermediate product.

Keywords: styrene-acrylic emulsion, n-butyl acrylate, emulsifying system, surfactants, colloidal stability, clots, satin paint.

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

En los últimos años, las emulsiones en base acuosa han cobrado una importancia significativa en la industria de recubrimientos debido a sus ventajas operativas y ambientales. En este contexto, las emulsiones acrílico-estirenadas se han consolidado como ligantes ampliamente utilizados, ya que presentan una adecuada formación de película, buena estabilidad y propiedades mecánicas que pueden ajustarse según los requerimientos del sistema. Entre los monómeros empleados con mayor frecuencia se encuentra el n-butil acrilato**,** que aporta flexibilidad y favorece la coalescencia, mientras que el estireno contribuye a incrementar la dureza y la resistencia del polímero final. Asimismo, los tensoactivos desempeñan un papel fundamental en la estabilidad del sistema, pues permiten estabilizar las partículas de látex, reducir la tensión interfacial y prevenir fenómenos como la coagulación o la formación de depósitos. Sin embargo, su dosificación debe controlarse cuidadosamente, ya que un contenido inadecuado también puede influir en las propiedades finales del látex obtenido. (Patil, Parekh, & More, 2025)

Por otro lado, desde una perspectiva industrial, el cambio de procedencia de una misma materia prima, en este caso el n-butil acrilato, puede influir en el comportamiento del sistema de polimerización, debido a posibles diferencias asociadas con la pureza del monómero, contenido de humedad, concentración de inhibidores o trazas de impurezas. Es así que la emulsión puede presentar cambios en su estabilidad coloidal, favoreciendo la formación de residuos o coágulos en el reactor, incrementar las necesidades de limpieza del equipo y variaciones en la eficiencia del proceso, entre otros. Por ello, el ajuste del sistema emulsificante se muestra como una alternativa para reducir la inestabilidad del látex y no afectar sus propiedades, manteniendo su desempeño como ligante en pinturas satinadas. (Sardari & Mannari, 2024)

1.2. Planteamiento del problema:

La industria de pinturas y recubrimientos enfrenta actualmente un escenario de elevada presión sobre el abastecimiento de materias primas estratégicas, especialmente en sistemas base agua donde las dispersiones poliméricas cumplen un rol central como

ligantes. En este contexto, las emulsiones estireno-acrílicas se mantienen relevantes debido a la relación entre costo, estabilidad y desempeño, dentro de un mercado altamente exigente que requiere productos competitivos, sostenibles y con propiedades reproducibles. Además, la evolución reciente de los recubrimientos base agua ha incrementado la necesidad de controlar con mayor precisión tanto la formulación como las variables de proceso, debido a que pequeñas variaciones pueden repercutir directamente en la calidad del látex y en el desempeño final de la pintura. (Pieters & Mekonnen, 2024)

Dentro de este sistema, el n-butil acrilato (BUA) constituye un monómero clave en la síntesis de emulsiones acrílicas estirenadas, ya que contribuye a la flexibilidad, la formación de película y la coalescencia del polímero. Sin embargo, la inestabilidad en el abastecimiento del BUA de procedencia americana y europea, junto con el incremento de sus precios, ha impactado directamente en la estructura de costos de producción y en la competitividad de las empresas del sector. Frente a esta situación, el mercado ofrece alternativas de origen asiático, particularmente BUA de procedencia china, que presentan mayor disponibilidad comercial y menor costo de adquisición. No obstante, en procesos de polimerización en emulsión, el comportamiento del sistema no depende únicamente de la identidad química del monómero, sino también de variables asociadas al proceso y a la materia prima, como la secuencia de adición, la estabilidad coloidal, la formación de partículas y el control de la nucleación, todos ellos determinantes para las propiedades finales del látex. (Sardari & Mannari, 2024)

Por otro lado, el cambio de procedencia del n-butil acrilato (BUA) puede introducir variaciones en parámetros de calidad tales como contenido de agua, acidez, nivel de inhibidor y presencia de impurezas, las cuales pueden alterar la cinética de polimerización, la estabilidad coloidal y la reproducibilidad del proceso. En emulsiones estireno-acrílicas, diversos estudios resaltan que la estabilidad coloidal está estrechamente relacionada con la formulación del sistema emulsificante y las condiciones operativas del proceso, ya que estas variables influyen sobre el tamaño de partícula, potencial zeta, la estabilidad electrolítica y la tendencia a coagulación. Como consecuencia, estas variaciones pueden favorecer la formación de residuos o coágulos durante la polimerización en emulsión. Asimismo, se ha reportado que el ajuste del tipo y cantidad de surfactantes puede mejorar la estabilidad del látex, reducir la formación de

coágulos y optimizar propiedades de aplicación en pinturas. Sin embargo, un exceso de surfactante o una formulación inadecuada puede incrementar la absorción de agua o modificar el comportamiento de la película si no se controla adecuadamente. (Zavecz et al., 2025)

En evaluaciones preliminares del proceso, el uso de BUA de procedencia china evidenció una mayor formación de residuos en el reactor y una mayor variabilidad en las pruebas de filtración, lo que sugiere una pérdida de eficiencia operativa y un riesgo de inestabilidad del producto intermedio. Esta situación resulta crítica porque el ensuciamiento o *fouling* en polimerización en emulsión constituye un problema severo a nivel de proceso, asociado con tiempos adicionales de limpieza, disminución del rendimiento del reactor y dificultades para mantener una operación repetible. En consecuencia, la presencia de depósitos y material coagulado no solo afecta la productividad del proceso, sino que también puede comprometer la uniformidad del látex y, posteriormente, el desempeño del ligante en la formulación de la pintura. (Hoffmann et al., 2024)

En este marco, se presenta la necesidad de optimizar la polimerización en emulsión para permitir la incorporación de BUA de procedencia china sin comprometer la estabilidad de la emulsión ni la calidad del producto obtenido. Para ello, resulta necesario evaluar ajustes en la dosificación del sistema emulsificante con el fin de minimizar la formación de residuos, mejorar la filtrabilidad, mantener la eficiencia del proceso y asegurar que la emulsión sintetizada cumpla con las especificaciones requeridas para su uso como ligante en una pintura satinada. De este modo, el problema de investigación se centra en determinar si es técnicamente viable el cambio de procedencia del BUA americano por BUA de procedencia china mediante una reformulación del sistema de tensoactivos que permita conservar el desempeño del látex y, al mismo tiempo, ofrecer una alternativa técnicamente viable y operativamente conveniente para la industria de recubrimientos. (Sardari & Mannari, 2024)

1.2.1. Determinación del problema

En la industria de recubrimientos base agua, las emulsiones acrílicas estirenadas cumplen una función esencial como ligantes debido a su estabilidad, capacidad de formación de película y propiedades mecánicas ajustables. Dentro de su

formulación, el n-butil acrilato (BUA) constituye una materia prima crítica, ya que aporta flexibilidad y favorece la coalescencia del polímero. Sin embargo, la variabilidad reciente en la disponibilidad y el costo del BUA de procedencia americana y europea ha generado la necesidad de evaluar materias primas alternativas de menor costo y mayor disponibilidad comercial, como el BUA de origen chino. No obstante, su incorporación a proceso requiere una evaluación técnica previa, debido a que el cambio de procedencia de una misma materia prima puede generar variaciones en la estabilidad del sistema, la formación de residuos y la repetibilidad del proceso. Al mismo tiempo, la literatura reciente sobre dispersiones poliméricas base agua resalta que pequeñas variaciones en la formulación y en la calidad de las materias primas pueden repercutir significativamente en la estabilidad del sistema y en el desempeño del recubrimiento final.

Desde el punto de vista técnico, el cambio de BUA de distinta procedencia comercial puede introducir diferencias en parámetros como contenido de agua, acidez, inhibidores o impurezas, lo que podría alterar la cinética de polimerización en emulsión, la estabilidad coloidal y la formación de partículas durante la síntesis. En sistemas acrílico-estirenados, se ha reportado que el mecanismo de nucleación y las condiciones del proceso influyen directamente sobre las propiedades del látex, mientras que la estabilidad coloidal depende de manera importante del sistema emulsificante empleado. Por ello, cuando cambia la procedencia del monómero, el proceso puede volverse más sensible a fenómenos de desestabilización como formación de coágulos, depósitos o residuos en el reactor.

En evaluaciones preliminares del proceso, el cambio de procedencia del BUA americano por BUA chino, manteniendo la formulación original, evidenció una mayor formación de residuos y variabilidad en las pruebas de filtración respecto al sistema formulado con BUA americano. Esta situación afecta la operatividad del reactor, incrementa los tiempos de limpieza, reduce el rendimiento del proceso y compromete la repetibilidad del producto intermedio. Además, si no se controla adecuadamente, este comportamiento puede repercutir en parámetros de calidad del látex y limitar su uso posterior como ligante en la formulación de una pintura

satinada. En consecuencia, se identifica como problema de investigación la necesidad de optimizar la polimerización en emulsión mediante el ajuste de la dosificación del sistema emulsificante, con el fin de viabilizar el uso de BUA chino, reducir la formación de residuos y asegurar que la emulsión obtenida cumpla las especificaciones técnicas requeridas para su aplicación industrial.

1.2.2. Formulación del problema

Problema General:

¿Es técnicamente viable y operativamente conveniente emplear n-butil acrilato de procedencia china como alternativa al de procedencia americana, mediante la optimización del sistema emulsificante, para obtener una emulsión acrílica estirenada estable que cumpla con las especificaciones requeridas para su aplicación como ligante en pintura satinada?

Problemas Específicos:

- ¿Cómo influye el cambio de procedencia del BUA americano por BUA chino en la estabilidad del proceso de polimerización en emulsión y en la formación de residuos durante la síntesis del látex acrílico estirenado?
- ¿Qué efecto tiene la dosificación del sistema emulsificante en la estabilidad de la emulsión y reducción de coágulos, depósitos y residuos en el reactor cuando se emplea BUA chino?
- ¿La emulsión acrílica estirenada sintetizada con BUA chino y sistema emulsificante optimizado cumple con los parámetros de control de calidad requeridos para su aplicación como ligante en la formulación de pintura satinada?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar el sistema emulsificante en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada para viabilizar el uso del n-butil acrilato de procedencia china como alternativa al de procedencia americana, evaluando la estabilidad del látex y su desempeño como ligante en una formulación de pintura satinada.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la influencia del cambio de procedencia del n-butil acrilato, de origen americano a origen chino, sobre la estabilidad del proceso de polimerización en emulsión y en la formación de residuos durante la síntesis de la emulsión acrílica estirenada.
- Determinar la dosificación óptima del sistema emulsificante que permita minimizar la generación de residuos y coágulos en el reactor, manteniendo las propiedades fisicoquímicas de la emulsión acrílica estirenada obtenida con BUA de procedencia china.
- Verificar que la emulsión acrílica estirenada obtenida con el sistema emulsificante optimizado cumpla con los parámetros de control de calidad requeridos para su aplicación como ligante en la formulación de pintura satinada.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

Los resultados de la investigación permiten proponer una condición técnica de trabajo para emplear BUA de procedencia china como alternativa al BUA de procedencia americana, priorizando la reducción de residuos, la estabilidad del látex y su desempeño como ligante. La conveniencia económica del cambio debe evaluarse posteriormente mediante un análisis técnico-económico específico. Como también establecer condiciones operativas y criterios de control de calidad que hagan viable el uso de BUA de procedencia americana por BUA de procedencia china, contribuyendo a disminuir la dependencia de fuentes de abastecimiento restringidas y a reducir el impacto del costo de esta materia prima en la formulación. Asimismo, la optimización del sistema emulsificante permitirá mejorar el proceso de polimerización en emulsión mediante el control de la formación de residuos y coágulos en el reactor, favoreciendo una mayor estabilidad operativa y una mejor repetibilidad entre lotes.

Es importante señalar que la emulsión obtenida constituye un producto intermedio, el cual será empleado como ligante en la formulación de pinturas satinadas. En ese sentido, la investigación busca asegurar que sus propiedades fisicoquímicas se mantengan dentro de los rangos especificados, garantizando su adecuada incorporación en la formulación y un

desempeño satisfactorio en el producto final, particularmente en propiedades funcionales críticas como la resistencia al frote húmedo y la lavabilidad.

1.5. Limitaciones de la investigación

La presente investigación se limita a evaluar el cambio de procedencia del n-butil acrilato (BUA), de origen americana a origen chino, en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada, considerando principalmente la dosificación del sistema emulsificante como variable de optimización. Asimismo, el estudio se restringe a la caracterización del producto intermedio obtenido y a su aplicación en una formulación específica de pintura satinada, sin incluir otras formulaciones, otras materias primas alternativas ni evaluaciones de desempeño a largo plazo. Del mismo modo, los resultados obtenidos estarán condicionados por la variabilidad propia de los lotes comerciales de materia prima, las condiciones operativas empleadas durante la síntesis y los métodos de ensayo utilizados para la evaluación del látex y de la pintura con los cuales se desarrolla la investigación.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Industria de emulsiones poliméricas en base acuosa

Las emulsiones poliméricas en base acuosa representan una alternativa importante dentro de la industria de recubrimientos, adhesivos y otros materiales aplicados, debido a que permiten formular productos con menor dependencia de solventes orgánicos. Esta característica ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, principalmente por la necesidad de reducir emisiones de compuestos orgánicos volátiles, mejorar las condiciones de seguridad durante la fabricación y responder a exigencias ambientales más estrictas. En ese sentido, los sistemas poliméricos base agua han alcanzado una participación significativa en sectores como recubrimientos arquitectónicos y automotrices; sin embargo, todavía se mantiene el interés técnico por optimizar su desempeño, ya que en algunas aplicaciones aún presentan diferencias frente a los sistemas convencionales base solvente. (Pieyers & Mekonnen, 2024)

Desde la perspectiva industrial, la producción de emulsiones poliméricas no solo se justifica por criterios ambientales, sino también por la necesidad de asegurar procesos estables, reproducibles y técnicamente controlados. En una planta dedicada a la fabricación de emulsiones en base acuosa, aspectos como la disponibilidad de materias primas, la estabilidad durante la polimerización, la formación de residuos en el reactor y la repetibilidad entre lotes son factores críticos para mantener la calidad del producto final. Por ello, la evaluación del n-butil acrilato de distinta procedencia resulta pertinente, no porque se modifique la naturaleza química principal de la materia prima, sino porque pueden presentarse variaciones asociadas a su origen comercial, tales como diferencias en pureza, acidez humedad, inhibidores o trazas de impurezas. Estas variaciones pueden influir en el comportamiento del sistema durante la síntesis es por ello que al

realizar ajustes del sistema emulsificante se puede conservar la estabilidad del látex y su desempeño como ligante en una pintura satinada.

2.1.2. Emulsiones poliméricas como materias primas para recubrimiento

Una emulsión polimérica en base acuosa puede definirse como un sistema disperso formado por partículas de polímero suspendidas en una fase continua de agua. Para que este sistema se mantenga estable, las partículas deben permanecer separadas entre sí mediante mecanismos de estabilización coloidal, los cuales reducen la tendencia a la aglomeración, sedimentación o formación de coágulos. Por ello, la estabilidad de una emulsión no depende únicamente de la formación del polímero, sino también del equilibrio entre la composición de la formulación, el sistema emulsificante y las condiciones bajo las cuales se desarrolla la polimerización.

En el caso de los recubrimientos, la emulsión polimérica no debe entenderse necesariamente como la pintura final, sino como una materia prima funcional dentro de una formulación más compleja. Su principal función es actuar como ligante, es decir, como el componente responsable de formar una película continua después de la evaporación del agua. Esta película contribuye directamente a propiedades importantes del recubrimiento, tales como adhesión al sustrato, cohesión interna, resistencia mecánica, apariencia superficial y comportamiento durante el secado. Por esta razón, una emulsión puede considerarse técnicamente adecuada no solo cuando cumple con sus propiedades fisicoquímicas como látex sino también cuando mantiene un desempeño aceptable al ser incorporada en una formulación de pintura.

De acuerdo con Lovell y Schork (2020), la polimerización en emulsión constituye una ruta ampliamente empleada para la obtención de coloides poliméricos, debido a que permite producir partículas con propiedades y morfologías controladas para diversas aplicaciones. Desde esta perspectiva, el interés industrial de una emulsión acrílica estirenada nos e limita a que la reacción de síntesis se complete de manera adecuada, sino a que el producto obtenido conserve estabilidad, repetibilidad y funcionalidad en su aplicación posterior como ligante.

En la presente investigación, la pintura satinada no constituye el producto principal de optimización, sino un sistema de evaluación aplicativo. Debido a que su uso permite comprobar si la emulsión acrílica estirenada sintetizada con n-butil acrilato de procedencia china presenta un comportamiento comparable de la emulsión elaborada con n-butil acrilato de procedencia americana. De esta manera, la evaluación en pintura satinada funciona como una validación práctica del desempeño del látex, considerando que el objetivo central del estudio es optimizar el sistema emulsificante para mantener la estabilidad del proceso y la calidad funcional de la emulsión obtenida.

2.1.3. Emulsiones acrílicas estirenadas

Las emulsiones acrílicas estirenadas son dispersiones poliméricas en base acuosa constituidas por copolímeros derivados principalmente de monómeros acrílicos y estireno. La combinación de estos componentes permite obtener materiales con un equilibrio adecuado entre dureza, flexibilidad, resistencia y capacidad de formación de película. En términos generales, el estireno contribuye a incrementar la rigidez, la dureza y la resistencia del polímero, mientras que los acrilatos blandos, como el n-butil acrilato, favorecen la flexibilidad, la elasticidad y la coalescencia de las partículas durante el secado. Esta relación entre monómeros duros y blandos permite que las emulsiones estireno-acrílicas sean empleadas ampliamente como ligantes en recubrimientos base agua.

En el caso de los recubrimientos, el ligante debe formar una película continua, adherente y resistente, por lo que la composición del copolímero y la estabilidad de la emulsión resultan factores determinantes. Solera-Sendra et al. (2025) señalan que las dispersiones acuosas acrílicas y metacrílicas se producen a gran escala para aplicaciones como recubrimientos, pinturas, adhesivos y materiales de construcción, debido a su versatilidad y a su menor contenido de compuestos orgánicos volátiles frente a sistemas convencionales base solvente. Esta característica refuerza su interés industrial, especialmente en formulaciones donde se busca mantener su desempeño y reducir el impacto ambiental.

En la presente investigación, la emulsión acrílica estirenada se considera el producto intermedio de interés, ya que su estabilidad y comportamiento como ligante determinan su posible aplicación posterior en pintura satinada.

2.1.4. Función del n-butil acrilato en la emulsión acrílica estirenada

El n-butil acrilato, también denominado como BUA o BA, es un monómero acrílico de naturaleza flexible que cumple una función importante en la formulación de copolímeros estireno-acrílicos. Dentro de este tipo de sistemas, su incorporación permite disminuir la rigidez global del polímero, favorecer la movilidad de las cadenas poliméricas y facilitar la coalescencia de las partículas durante el proceso de secado. Esta característica resulta relevante en emulsiones destinadas a recubrimientos, ya que un ligante excesivamente rígido puede presentar limitaciones para formar una película continua a temperatura ambiente, afectando propiedades como la adhesión, la cohesión y la apariencia superficial del recubrimiento.

Desde el punto de vista de la formulación polimérica, el BUA se considera un monómero blando, mientras que el estireno actúa como un monómero duro. Esta combinación permite equilibrar propiedades mecánicas y de aplicación: el estireno contribuye con dureza, resistencia y rigidez, mientras que el n-butil acrilato aporta flexibilidad y facilidad de formación de película. En estudios recientes sobre resinas acrílicas base agua, señalan que la selección de monómeros es un aspecto clave para ajustar las propiedades finales del polímero, ya que cada monómero aporta características específicas a la estructura del material (Jiao et al., 2021). Asimismo, en el sistema estireno-acrílicos base agua se emplea frecuentemente la combinación estireno/acrilato de butilo para balancear la dureza y flexibilidad en recubrimientos (Xin et al., 2026).

En el contexto de esta investigación, no se plantea sustituir el n-butil acrilato por otro monómero diferente, sino evaluar el efecto en emplear la misma materia prima proveniente de una procedencia comercial distinta.

2.1.5. Viabilidad técnica del cambio de procedencia del n-butil acrilato

El cambio de procedencia del n-butil acrilato no implica reemplazarlo por una materia prima químicamente diferente, sino emplear el mismo monómero proveniente de otro origen comercial. Esta precisión es importante, ya que la investigación no busca reformular el copolímero ni modificar la función principal del BUA dentro de la emulsión acrílica estirenada.

Desde la perspectiva industrial, el origen comercial de una materia prima puede presentarse como un factor relevante, debido a que distintos proveedores o procedencias pueden presentar variaciones en parámetros como pureza, contenido de humedad, acidez, concentración de inhibidores o presencia de trazas de impurezas. Aunque estas diferencias pueden ser pequeñas, en un proceso de polimerización en emulsión pueden tener efectos importantes en la generación de radicales, la cinética de la reacción, la estabilidad coloidal del látex y la formación de residuos en el reactor. Es por ello que resulta necesario verificar si el sistema se mantiene estable bajo las mismas condiciones de proceso establecidas cuando se incorpora materia prima de distinta procedencia.

Xiang et al. (2024) señalan que la preparación de emulsiones poliméricas está influenciada por diversos factores, entre ellos la selección de materias primas, las condiciones de reacción, los aditivos empleados y el método de síntesis. Por consecuente, la evaluación de un monómero que es proveniente de otra fuente comercial debe evaluarse mediante ensayos controlados, especialmente cuando se busca conservar la estabilidad del proceso y la calidad del producto obtenido.

2.1.6. Influencia de la calidad del monómero en la síntesis de emulsiones

La calidad del monómero constituye un factor importante en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada, debido a que este componente participa directamente en la reacción de polimerización y forma parte de la fase dispersa del sistema.

Lovell y Schork (2020) explican que la polimerización en emulsión involucra fenómenos simultáneos, entre ellos la nucleación de partículas, la entrada de radicales, el crecimiento de partículas poliméricas y la estabilización coloidal, lo que evidencia la complejidad de este tipo de sistemas. Por esta razón, pequeñas variaciones en las materias primas pueden afectar la respuesta global del proceso, especialmente cuando se trabaja a escala piloto o industrial.

En ese sentido el BUA de procedencia china no debe asumirse automáticamente como un equivalente al BUA de procedencia americana sin una evaluación previa bajo las mismas condiciones de síntesis. Por ellos es importante una validación experimental ya que permite verificar si la emulsión obtenida mantiene

estabilidad, reduce la formación de residuos y propiedades fisicoquímicas comparables a la emulsión de referencia.

2.1.7. Sistema emulsificante en emulsiones acrílicas estirenadas

El sistema emulsificante está constituido por tensoactivos que cumplen una función esencial durante la síntesis de emulsiones poliméricas en base acuosa. Estos compuestos permiten reducir la tensión interfacial entre la fase orgánica y la fase acuosa, favorecen la dispersión de los monómeros en el medio acuoso y contribuyen a la formación de micelas o sitios de nucleación donde puede iniciarse el crecimiento de las partículas poliméricas. Además, una vez formadas las partículas de látex, los tensoactivos ayudan a mantenerlas separadas, disminuyendo la probabilidad de aglomeración, coagulación o formación de residuos durante la reacción.

En la polimerización en emulsión, los tensoactivos no deben considerarse únicamente como auxiliares de formulación, sino como componentes que influyen directamente en el desarrollo del proceso y en las propiedades del producto obtenido. Su tipo, concentración y balance dentro del sistema pueden afectar la nucleación de partículas, el tamaño de la partícula, la distribución del látex, la viscosidad, la estabilidad coloidal y, finalmente, el comportamiento del polímero como ligante. Xiang et al. (2024) señalan que los surfactantes cumplen un papel importante en la regulación y optimización de las propiedades durante la polimerización en emulsión, ya que contribuyen a mejorar la estabilidad del sistema y el comportamiento del producto final.

En emulsiones estireno-acrílicas es común emplear combinaciones de tensoactivos aniónicos y no iónicos, debido a que ambos aportan mecanismos de estabilización complementarios. Los tensoactivos aniónicos favorecen principalmente la estabilidad electrostática, ya que generan cargas superficiales que producen repulsión entre partículas. Por otro lado, los tensoactivos no iónicos pueden contribuir a la estabilidad estérica, formando una barrera física alrededor de las partículas que dificulta su aproximación y aglomeración. La combinación de ambos tipos de tensoactivos permite obtener un sistema más resistente frente a variaciones del medio, como cambios de concentración, presencia de electrolitos, diferencias en la materia prima o condiciones de proceso.

En el contexto de esta investigación, el ajuste del sistema emulsificante resulta necesario debido a que el cambio de procedencia del n-butil acrilato puede modificar el comportamiento de la fase monomérica durante la síntesis.

2.1.8. Optimización de la dosificación del sistema emulsificante

La optimización de la dosificación de sistema emulsificante consiste en establecer una proporción adecuada de tensoactivos que permita obtener una emulsión acrílica estirenada estable, con baja formación de residuos y con propiedades fisicoquímicas dentro de los rangos de especificaciones esperados. En este tipo de sistemas, el emulsificante cumple un papel importante en la dispersión de los monómeros, la formación y estabilización de partículas, el control del tamaño de partícula y la estabilidad coloidal del látex. Por ello, su dosificación debe ser evaluada de manera cuidadosa, ya que una cantidad insuficiente puede favorecer la aglomeración o coagulación, mientras que una excesiva puede alterar el equilibrio del sistema y afectar el desempeño posterior del látex o de la película formada.

En eses sentido, optimizar no significa aumentar indiscriminadamente la cantidad de emulsificante, sino encontrar una condición de trabajo que permita mantener la estabilidad del proceso sin comprometer la funcionalidad del producto. Praw (2023) evaluó el efecto de diferentes surfactantes en la polimerización de un látex vinil-acrílico y reportó que el tipo de surfactante, así como la relación entre surfactante aniónico y no iónico, puede influir en propiedades como el tamaño de partícula, la estabilidad mecánica, la estabilidad electrolítica y la cantidad de sólidos filtrables. Este antecedente permite sustentar que la relación y la dosificación de tensoactivos constituyen variables relevantes en sistemas de polimerización en emulsión, especialmente cuando se busca mantener estabilidad y repetibilidad del proceso.

Asimismo, en sistemas estireno-acrílicos base agua, Ayhan et al. (2023) estudiaron el efecto de sistemas tensoactivos aniónicos, no iónicos y combinados durante la copolimerización en emulsión de estireno con monómeros acrílicos, incluyendo acrilato de butilo, acrilamida y ácido acrílico. Este tipo de investigación resulta especialmente pertinente para el presente trabajo, ya que

evidencia que el balance entre tensoactivos puede modificar el comportamiento de la reacción y las propiedades del látex obtenido.

2.1.9. Formación de residuos durante la síntesis de emulsiones

La formación de residuos o coágulos durante la síntesis de una emulsión polimérica constituye una señal práctica de inestabilidad del sistema. Estos residuos pueden generarse cuando las partículas en formación pierden estabilidad coloidal y tienden a aglomerarse, lo cual puede estar asociado a una emulsificación deficiente, una protección insuficiente de las partículas, desequilibrios en la relación monómero-iniciador-tensoactivos, presencia de impurezas, variaciones de temperatura o cambios en la agitación durante el proceso.

Desde el punto de vista industrial, la presencia de residuos en el reactor representa un problema muy relevante, ya que puede disminuir el rendimiento efectivo del proceso, incrementar las operaciones de filtrado, dificultar la limpieza del equipo y afectar la repetibilidad entre lotes. Además, una mayor formación de coágulos puede indicar que el sistema emulsificante no está proporcionando la estabilización necesaria para mantener las partículas dispersas durante la polimerización.

Las investigaciones recientes sobre emulsiones poliméricas señalan que la selección de materias primas, los aditivos empleados, el método de síntesis y las condiciones de reacción influyen directamente en la estabilidad final del sistema (Xiang et al., 2024). Por ello, la reducción de residuos puede considerarse un criterio técnico importante para evaluar si la dosificación del sistema emulsificante ha sido ajustada de manera adecuada.

En la presente investigación, la formación de residuos se considera una variable relevante para comparar la estabilidad de la emulsión acrílica estirenada sintetizada con BUA de procedencia china frente a la emulsión de referencia elaborado con BUA de procedencia americana.

2.1.10. Propiedades fisicoquímicas de control en emulsiones acrílicas estirenadas

Las propiedades fisicoquímicas constituyen criterios fundamentales para evaluar la calidad de una emulsión polimérica y determinar si el producto obtenido cumple con las condiciones requeridas para su uso industrial. Entre los parámetros más relevantes se encuentran el pH, la viscosidad, el contenido de sólidos, la apariencia, la estabilidad, el porcentaje de residuos o coágulos y, cuando se dispone dele quipo correspondiente, el tamaño de partícula. Estos controlen permiten verificar el comportamiento del látex después de la síntesis, identificar posibles desviaciones del proceso y comparar lotes elaborados bajo diferentes condiciones de formulación (Jiao et al., 2021)

En una emulsión acrílica estirenada, estos parámetros no solo permiten caracterizar el producto como látex, sino también anticipar su posible desempeño como ligante en recubrimientos base agua. Por ejemplo, el pH puede influir en la estabilidad del sistema y en la compatibilidad con otros componentes de la formulación; la viscosidad se relaciona con el manejo, bombeo y aplicación del producto; el contenido de sólidos permite estimar la concentración efectiva de polímero; y la presencia e residuos o coágulos refleja posibles problemas de estabilidad durante la polimerización. De manera complementaria, el tamaño de partícula puede aportar información sobre la uniformidad de la dispersión y la estabilidad coloidal del sistema (Xiang et al., 2024).

2.1.11. Reología de emulsiones poliméricas en base acuosa

La reología estudia el comportamiento de flujo y deformación de los materiales cuando son sometidos a esfuerzos externos. En el caso de las emulsiones poliméricas, este concepto se relaciona principalmente con la viscosidad, la estabilidad durante el almacenamiento, la facilidad de mezclado, el bombeo, la manipulación en planta y el comportamiento del látex cuando es incorporado en una formulación de recubrimiento. Por ello, la viscosidad no debe considerarse solo como un dato de control rutinario, sino como una prioridad que permite evaluar la consistencia del producto y su respuesta frente a condiciones de proceso y aplicación.

En emulsiones acrílicas estirenadas, la viscosidad puede estar influenciada por diversos factores, como el contenido de sólidos, el tamaño y distribución de partícula, la interacción entre partículas, el tipo y concentración de tensoactivos, el pH Y los aditivos presentes en la formulación. Cuando alguno de estos factores se modifica, el comportamiento de flujo del sistema también puede variar, lo que podría afectar la estabilidad del látex o su incorporación posterior en una pintura. En ese sentido, el control reológico permite identificar posibles diferencias entre emulsiones elaboradas bajo distintas condiciones de síntesis.

Zheng y Chen (2023) señalan que muchos problemas de desempeño en recubrimientos están relacionados con la reología, debido a que esta influye en fenómenos como sedimentación, escurrimiento, nivelación y aplicación. Aunque su análisis se enfoca en recubrimientos, el fundamento resulta útil para esta investigación, ya que una emulsión utilizada como ligante debe presentar un comportamiento de flujo adecuado para integrarse correctamente en una formulación de pintura y mantener un desempeño comparable al sistema de referencia.

De esta manera, la evaluación de la viscosidad contribuye a validar que le ajuste del sistema emulsificante no solo mejore la estabilidad durante la síntesis, sino que también conserve condiciones adecuadas para el uso del látex como ligante.

2.1.12. Evaluación del desempeño de la emulsión como ligante en pintura satinada

La evaluación de la emulsión acrílica estirenada en una pintura satinada permite verificar su desempeño como ligante dentro de una formulación conocida. En este caso, la pintura no constituye el producto principal de optimización, sino un sistema de aplicación utilizado para comparar el comportamiento de la emulsión optimizada frente a una emulsión de referencia. Esta distinción es importante, ya que el propósito de la investigación no es formular una nueva pintura satinada, sino comprobar si el látex obtenido con BUA de procedencia china mantiene características funcionales semejantes a las del látex preparado con BUA de procedencia americana.

En recubrimientos base agua, el ligante cumple una función determinante porque es el componente encargado de formar la película continua después de la

evaporación del agua. Durante este proceso, las partículas poliméricas se aproximan, se empaquetan, se deforman y finalmente coalescen hasta formar una película con continuidad física. Arjmandi et al. (2024) explican que la formación de película en recubrimientos base de agua involucra etapas como evaporación del agua, empaquetamientos de partículas, deformación e interdifusión polimérica, las cuales determinan el desarrollo de una película protectora.

De esta manera, la evaluación en pintura satinada permite confirmar si la emulsión optimizada conserva un desempeño aceptable como ligante, sin que ello implique modificar la receta comercial ni desarrollar una nueva formulación de pintura.

2.2. Antecedentes del estudio

(Keshk, El-Aziz, Mohamed, Hanafy, & Hussain, 2025) estudiaron la polimerización en emulsión semicontinua con el objetivo de desarrollar un látex poli(estireno-acrilato) reticulado para aplicaciones en pinturas decorativas. Para ello, emplearon como sistema de entrecruzamiento la diacetona acrilamida (DAAM) y la dihidrazida de ácido adípico (ADH) en diferentes concentraciones, evaluando su influencia sobre las propiedades fisicoquímicas de la emulsión. Los resultados demostraron que la incorporación de estos reticulantes afecta significativamente la morfología, el tamaño de partícula y la estabilidad coloidal del sistema, evidenciando la formación de estructuras más complejas debido al incremento del grado de reticulación. Asimismo, se determinaron condiciones óptimas de formulación con 1.5% de DAAM y 0.75% de ADH, bajo las cuales se obtuvieron emulsiones con mejor desempeño y estabilidad.

(Elizalde, Mendoza, Ledezma, Treviño, & Mondragon, 2020) en su estudio, sintetizaron una resina estireno-acrílica mediante copolimerización en emulsión semicontinua empleando butil acrilato, estireno y 3-isopropenil-α, α-dimetil bencil isocianato (TMI), utilizando el surfactante EF-800. Como resultado, se obtuvo una emulsión auto-reticulante, en el cual el TMI sufre hidrólisis, promoviendo la formación de una red tridimensional mediante enlaces entre las cadenas poliméricas. Se evaluó el efecto del contenido de TMI (0–6% en peso) sobre la formación de película, propiedades mecánicas (resistencia a la tracción), permeabilidad y estabilidad coloidal de la emulsión. Los resultados mostraron que concentraciones de 2% y 4% de TMI permiten obtener emulsiones estables y películas continuas con buenas propiedades mecánicas. Asimismo,

el incremento del contenido de TMI favorece una mayor reticulación, lo que se traduce en un aumento de la resistencia y rigidez, así como en una disminución de la permeabilidad.

Ozdamar (2016) evaluó la influencia de silanos órgano funcionales en emulsiones estireno-acrílicas, analizando tamaño de partícula, temperatura vítrea (Tg), FTIR y propiedades mecánicas. Los copolímeros se emplearon en pinturas base agua, evaluándose resistencia al frote, dureza y flexibilidad. Se observó que la incorporación de silanos durante la polimerización reduce el tamaño de partícula, pero disminuye la flexibilidad, mientras que su adición posterior incrementa la flexibilidad y puede reducir el Tg. Finalmente, el mejor desempeño se obtuvo con concentraciones alrededor de 1% de silano (VTET) como aditivo posterior, donde se evidenció una mayor flexibilidad y el menor valor de Tg. Asimismo, los sistemas con silanos añadidos posteriormente presentaron una mejor resistencia al frote húmedo, mientras que la dureza no mostró variaciones significativas en ningún caso.

Zavecz et al. (2025) estudiaron la polimerización en emulsión sembrada de látex estireno-acrílicos del sistema poli (St/ BA/ AA/ AM). Para ello, utilizaron como surfactantes polimerizables Maxemul™ 6106 (aniónico) y Maxemul™ 5010 (no iónico) en combinación con surfactantes convencionales. Se observó que el uso exclusivo de surfactantes polimerizables genera mayor tamaño de partícula y tendencia a la coagulación. En contraste, su combinación con surfactantes convencionales permitió obtener látex más estables, con tamaños de partícula entre 105–130 nm, mejor estabilidad electrostática y menor contenido de coágulos. Asimismo, el uso de látex semilla in situ mejoró la tolerancia a electrolitos y la formación de películas más cohesivas, lo que se tradujo en una mayor resistencia al frote y durabilidad de los recubrimientos base agua.

(Ayhan, Sakar, & Tarakci, 2023) investigaron la copolimerización en emulsión de sistemas estireno-acrílicos empleando surfactantes aniónicos, no iónicos y combinaciones de ambos en distintas proporciones. La síntesis se realizó utilizando estireno y butil acrilato como monómeros principales, y acrilamida y ácido acrílico como monómeros funcionales, con el fin de obtener aglutinantes para pinturas base agua. Los productos fueron caracterizados mediante contenido de sólidos, FTIR/ATR, DSC y viscosidad. Los resultados evidenciaron que la formulación óptima se alcanzó con una combinación de 1.3% de surfactante aniónico y 0.8% de surfactante no iónico (en peso),

obteniéndose un látex con temperatura de transición vítrea (Tg) cercana a 20 °C y un contenido de sólidos alrededor del 50%. Esta combinación permitió mejorar la estabilidad de la emulsión y optimizar las propiedades del sistema, demostrando que el uso conjunto de surfactantes aniónicos y no iónicos favorece la obtención de látex más estables y con mejor desempeño para aplicaciones en recubrimientos base agua.

(Zavecz, Palma, Yokomichi, Moreira, & Oliveira, 2024) estudiaron la mejora de la estabilidad coloidal en látex poli (estireno-co-butil acrilato-co-ácido acrílico-co-acrilamida), orientándose a la obtención de sistemas libres de coágulos y con mejor desempeño. Para ello, emplearon surfactantes polimerizables Maxemul™ 5010 y Maxemul™ 6106 en combinación con el surfactante aniónico convencional Dowfax™ 2A1, evaluando su influencia sobre el tamaño de partícula, la estabilidad frente a electrolitos, la absorción de agua y la resistencia al frote. Los resultados evidenciaron que la adición de n-dodecil mercaptano (DDM) como agente de transferencia de cadena, en concentraciones de 0.05–0.2% en peso, permitió eliminar la formación de coágulos. Asimismo, la sinergia entre surfactantes polimerizables y convencionales, junto con el uso de DDM, favoreció la obtención de látex más estables, con tamaños de partícula entre 96.5 y 110 nm y mejores propiedades de película. Adicionalmente, esta estrategia permitió disminuir el contenido total de surfactantes en aproximadamente 40%, lo que representa una ventaja tanto económica como funcional en la formulación de recubrimientos base agua.

(González, Moreno, Zapata, García, & Medina, 2022) propusieron la obtención de una resina acrílica estirenada a partir del reciclaje de poliestireno expandido (EPS), utilizando d-limoneno como solvente para reemplazar el estireno convencional. La síntesis se realizó mediante polimerización en emulsión con acrilato de butilo, empleando persulfato de potasio como iniciador, ácido cítrico como agente de entrecruzamiento y una combinación de surfactantes (Genapol® al 50% y alcohol laurílico etoxilado), además de aditivos como antiespumante y regulador de pH. El producto obtenido presentó un contenido de sólidos de 26.1%, pH de 6.92 y una apariencia blanco-lechosa con textura ligeramente oleosa, evidenciando la viabilidad del uso de EPS reciclado como materia prima en la formulación de resinas para recubrimientos.

(Abd El-Wahab, Attia, Hassan, & Nasser, 2019) estudiaron la preparación de nanoemulsiones poliméricas mediante el método de polimerización en emulsión

semicontinua, con el fin de obtener látex estables para su aplicación como ligantes en pinturas base agua. Para ello, sintetizaron un copolímero de estireno/acrilato de 2-etilhexilo (St/EHA) y un terpolímero de estireno/metacrilato de metilo/acrilato de 2-etilhexilo (St/MMA/EHA). En la preparación de las emulsiones se empleó una combinación de surfactantes, conformada por los surfactantes aniónicos Desponil LDPS 25 y Texapone, junto con el surfactante no iónico NP30. Asimismo, se utilizó persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) como iniciador. Acorde a la formulación reportada, el Desponil LDPS 25 se empleó al 2,5 % en peso, el Texapone al 0,5 % en peso y el NP30 al 0,4 % en peso. Posteriormente, los látex obtenidos fueron caracterizados y evaluados en función de propiedades relevantes para recubrimientos, tales como brillo, adhesión, entre otros. Los resultados evidenciaron que el uso combinado de surfactantes favoreció la formación de dispersiones coloidales más estables, con partículas de menor tamaño, lo cual contribuyó a mejorar el desempeño de las películas obtenidas en aplicaciones de pinturas base agua.

(Wang, Zhijun, Zhu, Zhang, & Yin, 2013) sintetizaron resinas solubles en álcali a partir de la reacción entre el copolímero de estireno–anhídrido maleico (SMA) y alcoholes grasos con diferentes longitudes de cadena alquílica. La concentración crítica de agregación del hemiéster sintetizado fue menor que la del copolímero sin modificar, resultando este más eficiente en la emulsificación. Este comportamiento se atribuye a un posible mejor equilibrio hidrofílico-lipofílico y a una mayor estabilidad estérica. Asimismo, durante la polimerización en emulsión de metacrilato de metilo y acrilato de butilo, empleando los hemiésteres sintetizados como surfactantes, obteniéndose látex estables con una concentración relativamente baja de surfactante, aproximadamente 15% en peso sobre base de polímero seco. Además, se presentó un alto contenido de sólidos, cercano al 40 %, y un tamaño promedio de partícula inferior a 60 nm.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Fundamentos de emulsiones acrílicas estirenadas

Las emulsiones acrílicas estirenadas corresponden a sistemas coloidales obtenidos a partir de la copolimerización de monómeros acrílicos y vinílicos, siendo el acrilato de n-butilo (BUA) y el estireno los componentes más representativos. La combinación de estos monómeros permite diseñar polímeros con propiedades

específicas, ajustando parámetros como flexibilidad, dureza y resistencia mecánica (Lovell & Schork, 2020).

El BUA, caracterizado por su baja temperatura de transición vítrea (Tg), aporta flexibilidad al polímero, mientras que el estireno, con un Tg más elevada, contribuye a la rigidez estructural y resistencia al desgaste. Esta dualidad permite obtener materiales con comportamiento visco elástico controlado, lo cual es esencial en aplicaciones de recubrimientos (Gaur & Sood, 2020).

Además, la incorporación de monómeros funcionales como ácido acrílico, acrilamida y glicidil metacrilato permite modificar la estructura química del polímero, introduciendo grupos reactivos que mejoran la estabilidad coloidal y la capacidad de reticulación (Bourgeat-Lami et al., 2020).

2.3.2. Fundamentos de la polimerización en emulsión

La polimerización en emulsión es un proceso heterogéneo que involucra la dispersión de monómeros hidrofóbicos en una fase acuosa mediante el uso de tensoactivos. Este proceso se caracteriza por una alta eficiencia de reacción, control térmico y capacidad de producir polímeros con tamaños de partículas en el rango nanométrico (Lovell & Schork, 2020).

El mecanismo del proceso se divide en tres etapas principales:

a) Nucleación de partículas

En esta etapa, los radicales libres generados por el iniciador reaccionan con monómeros en la fase acuosa o dentro de las micelas, dando lugar a la formación de núcleos de polímero. La tasa de nucleación depende de la concentración de tensoactivos y del iniciador (Shaghayegh Hamzehlou, 2020)

b) Crecimiento de partículas

Durante esta etapa, el monómero difunde desde las gotas dispersas hacia las partículas en crecimiento. La cinética está controlada por la difusión y la propagación radicalaria.

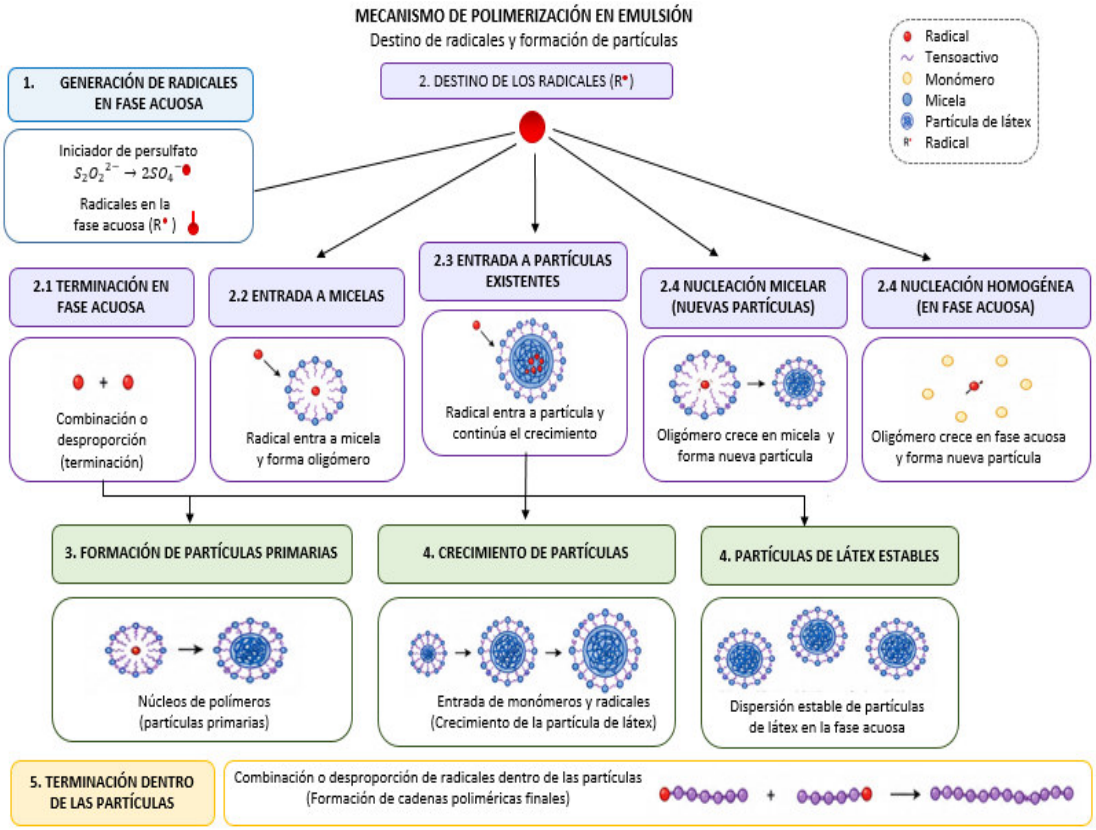
c) Terminación

Esta etapa ocurre cuando los radicales activos se recombinan o desactivan, finalizando el crecimiento de las cadenas poliméricas.

El mecanismo de polimerización en emulsión implica rutas de reacción, dependiendo del destino de los radicales generados en la fase acuosa, incluyendo nucleación micelar, nucleación homogénea y crecimiento de partículas, como se muestra en la Figura 2.1 (Lovell & Schork, 2020).

Figura 2.1

Esquema general del mecanismo de polimerización en emulsión y rutas de formación de partículas.



Nota. *Representación del mecanismo de polimerización en emulsión que describe la generación de radicales a partir del iniciador, su transporte en fase acuosa y su participación en procesos de nucleación micelar y homogénea, así como en el crecimiento de partículas poliméricas. Se incluyen las principales rutas cinéticas y fenómenos de difusión asociados al sistema.*

Fuente: *Elaboración propia basada en Lovell y Schork (2020).*

La velocidad de polimerización se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$R_p = k_p[M][R^*]$$

Donde:

R_p: Velocidad de polimerización ($mol.L^{-1}.s^{-1}$)

k_p: Constante de propagación ($L.mol^{-1}.s^{-1}$)

$[M]$: Concentración de monómero ($mol.L^{-1}$)

$[R^*]$: Concentración de radicales ($mol.L^{-1}$)

La velocidad de polimerización en sistemas radicalarios depende de la concentración de monómero y de radicales activos presentes en el medio, lo que determina la cinética de propagación de las cadenas poliméricas (Odian, 2004). En este contexto, el control del sistema iniciador resulta fundamental, ya que regula la generación de radicales y permite mantener la estabilidad del proceso y la calidad del producto final (Surmacz & Chmielarz, 2020).

Como se observa en la Tabla 2.1, las variables involucradas en la polimerización en emulsión presentan diferentes funciones dentro del sistema, ya que algunas intervienen directamente en la formulación, como los tensoactivos y el iniciador, mientras que otras permiten controlar o evidenciar la estabilidad del látex, como pH y la viscosidad.

Tabla 2.1.

Variables relevantes en la polimerización en emulsión

VARIABLE	TIPO	INFLUENCIA
Tensoactivos	Independiente	Control del tamaño de partícula
Iniciador	Independiente	Generación de radicales
pH	Controlada	Estabilidad Coloidal
Viscosidad	Dependiente	Interacción entre partículas

En ese sentido, el control de estas variables resulta importante para interpretar la estabilidad del proceso, la formación de residuos y el comportamiento final de la emulsión acrílica estirenada obtenida en los ensayos piloto.

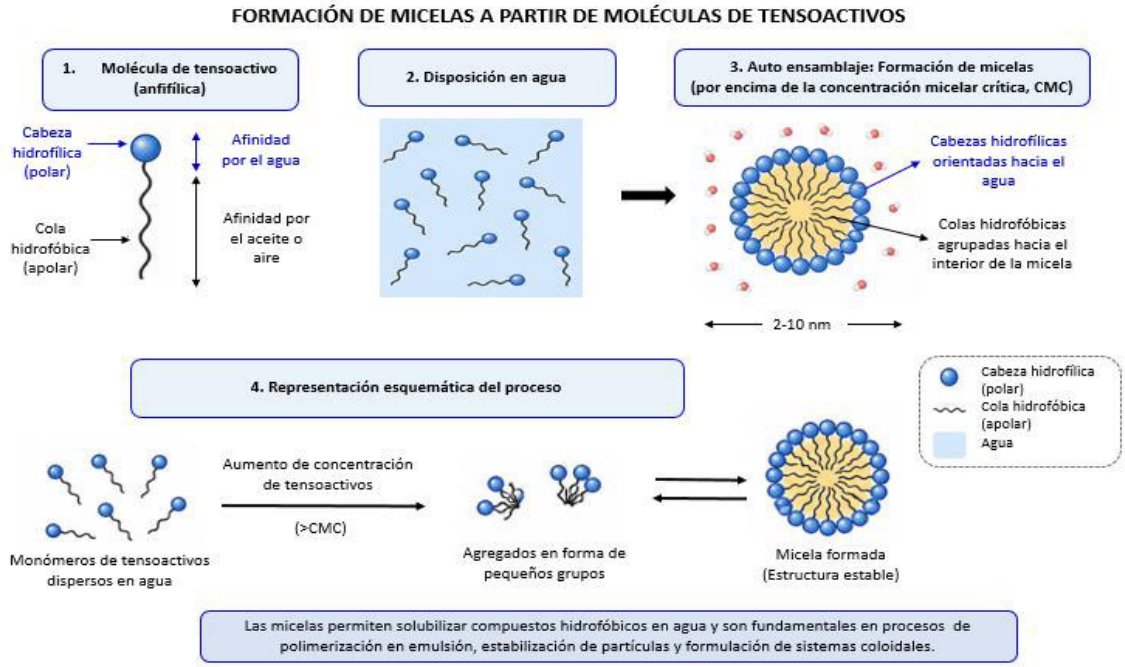
2.3.3. Sistema emulsificante y formación de micelas

El sistema emulsificante constituye uno de los componentes más críticos en la polimerización en emulsión, ya que es responsable de la estabilidad coloidal del sistema y del control del tamaño de partícula. Los tensoactivos actúan reduciendo la tensión interfacial entre la fase acuosa y la fase orgánica, permitiendo la dispersión del monómero en forma de micelas (Bourgeat-Lami et al., 2020).

Cuando la concentración de tensoactivos supera la concentración micelar crítica (CMC), se forma agregados coloidales capaces de solubilizar monómeros hidrofóbicos en su núcleo. Estas micelas funcionan como sitios preferenciales de nucleación, donde los radicales inician la polimerización. Como se muestra en la Figura 2.2, este fenómeno es fundamental para el desarrollo de partículas de látex (Li, Keran et al., 2020).

Figura 2.2

Formación de micelas a partir de moléculas de tensoactivos.



Nota. *Esquema del proceso de autoensamblaje de tensoactivos en medio acuoso, donde las cabezas hidrofílicas se orientan hacia el exterior y las colas hidrofóbicas hacia el interior, formando estructuras micelares.*

Fuente: *Elaboración propia basada en literatura de sistemas coloidales, Li et al. (2020).*

El número de micelas presentes en el sistema está directamente relacionado con la concentración de tensoactivos, lo que a su vez determina el número de partículas formadas. Un incremento en la concentración de emulsificante produce una disminución en el tamaño de partícula, aumentando la estabilidad del sistema debido a una mayor superficie específica (Lovell & Schork, 2020).

Asimismo, la combinación de tensoactivos aniónicos y no iónicos permiten mejorar la estabilidad mediante mecanismo electrostáticos y estéricos, reduciendo la probabilidad de agregación de partículas (Moreno & Sipponen, 2020).

2.3.4. Sistema iniciador y generación de radicales

El sistema iniciador es responsable de la generación de radicales libres que permiten la iniciación de la reacción de polimerización. En sistemas industriales, se emplean comúnmente iniciadores térmicos como los persulfatos y peróxidos orgánicos, así como sistemas redox que permiten operar a temperaturas más bajas (Surmacz & Chmielarz, 2020).

La velocidad de descomposición del iniciador puede describirse mediante la siguiente ecuación:

$$R_i = 2fk_d[I]$$

Donde:

R_i: Velocidad de iniciación

f: Eficiencia del iniciador

k_d: Constante de descomposión

$[I]$: Concentración de iniciador

La concentración de radicales libres influye directamente en el número de partículas formadas y en la cinética global del proceso. Un exceso de radicales puede generar nucleación secundaria, lo que incrementa la polidispersidad del sistema y afecta la estabilidad coloidal (Shaghayegh Hamzehlou, 2020).

2.3.5. Función de los tensoactivos aniónicos y no iónicos

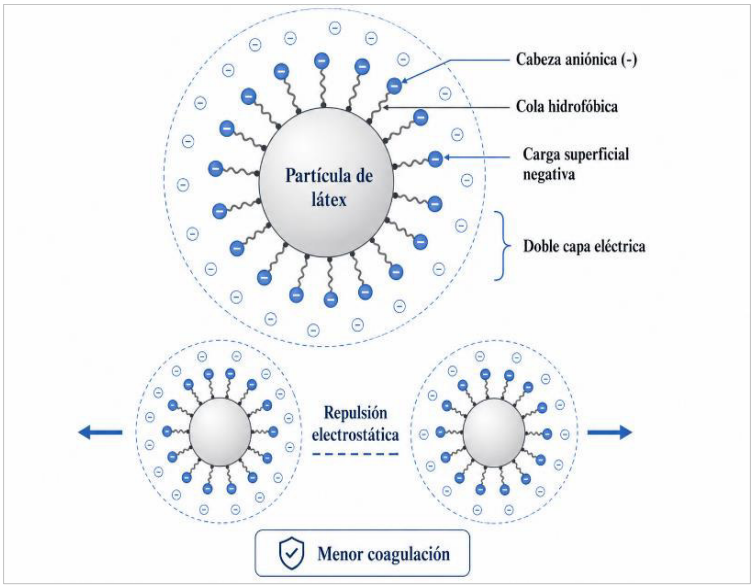
Los tensoactivos cumplen una función fundamental en la polimerización en emulsión, debido a que permiten estabilizar las partículas poliméricas formadas

durante la reacción. En estos sistemas, los tensoactivos no solo facilitan la dispersión inicial de los monómeros en la fase acuosa, sino que también contribuyen a mantener la estabilidad coloidal del látex, evitando la aglomeración de partículas y la formación de residuos o coágulos.

Los tensoactivos aniónicos actúan principalmente mediante un mecanismo de estabilización electrostática. Esto ocurre porque aportan carga negativa a la superficie de las partículas, generando fuerzas de repulsión entre ellas. Como se observa en la Figura 2.3, las partículas cargadas negativamente tienden a mantenerse separadas debido a la repulsión electrostática, lo que reduce la posibilidad de que se acerquen excesivamente y formen agregados. Este mecanismo es importante durante la síntesis, ya que una protección electrostática insuficiente puede favorecer la coagulación del sistema y aumentar la presencia de residuos en el reactor.

Figura 2.3

Estabilización electrostática de partículas de látex mediante tensoactivos aniónicos.



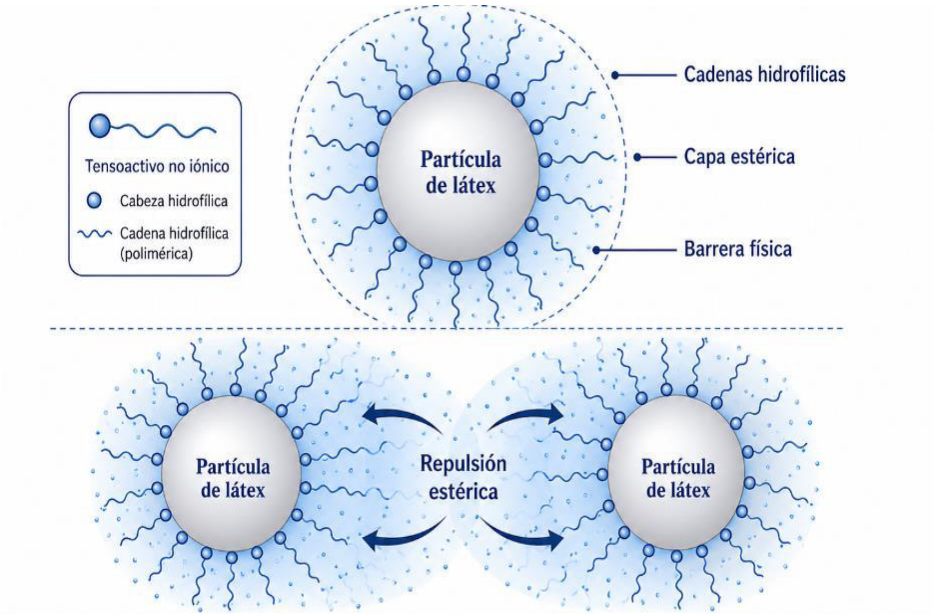
Nota. *Representación del mecanismo de estabilización electrostática producido por tensoactivos aniónicos.*

Fuente: *Elaboración propia adaptado Van Herk (2013) y Lovell y El-Aasser (1997)*

Por otro lado, los tensoactivos no iónicos pueden contribuir mediante un mecanismo de estabilización estérica. En este caso, las moléculas del tensoactivos forman una especie de capa y barrera alrededor de las partículas, dificultando su aproximación física. Como se observa en la Figura 2.4, esta capa superficial impide que las partículas entren en contacto directo, reduciendo la posibilidad de agregación y favoreciendo la estabilidad coloidal del sistema. Esta protección puede mejorar la resistencia del látex frente a ciertas variaciones del medio, como cambios de temperatura, concentración de electrolitos pH o presencia de impurezas. Por ello, los tensoactivos no iónicos suelen complementar la acción de los aniónicos, aportando mayor estabilidad al sistema.

Figura 2.4

Estabilización estérica de partículas de látex mediante tensoactivos no iónicos.



Nota. *Representación del mecanismo de estabilización estérica asociado a tensoactivos no iónicos. Cadenas hidrofílicas adsorbidas alrededor de la partícula forman una barrera física que dificulta el contacto directo entre partículas. Esta protección puede mejorar la resistencia del látex frente a variaciones del medio, como cambios de temperatura, pH, electrolitos o presencia de impurezas.*

Fuente: *Adaptado de Chern (2008), Van Herk (2014) y Tadros (2013).*

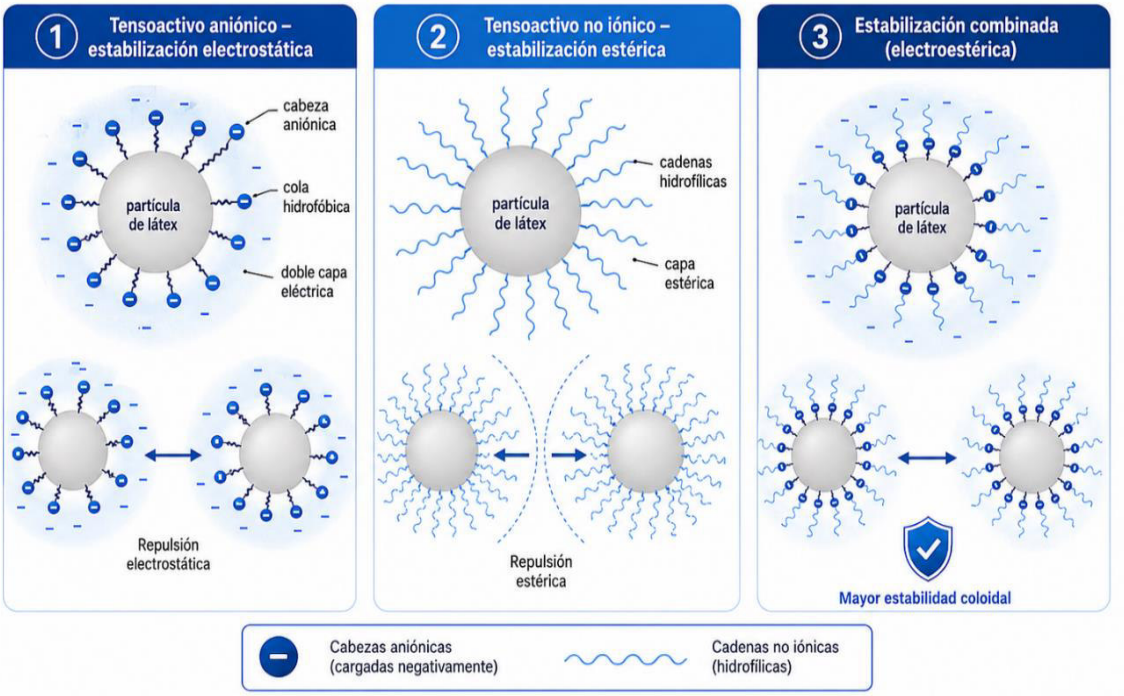
En sistemas industriales de polimerización en emulsión, es frecuente emplear combinaciones de tensoactivos aniónicos y no iónicos, debido a que ambos mecanismos de estabilización pueden actuar de manera complementaria. Como se

muestra en la Figura 2.5, los tensoactivos aniónicos aportan repulsión electrostática, mientras que los no iónicos proporcionan una barrera estérica alrededor de las partículas de látex.

Praw (2023) reportó que, en la polimerización de un látex vinil-acrílico, el tipo de surfactante y la relación entre tensoactivos aniónicos y no iónicos pueden modificar propiedades como la estabilidad, la cantidad de sólidos filtrables y el tamaño de partícula. Este antecedente permite sustentar que la selección y dosificación del sistema emulsificante no debe realizarse de forma empírica, sino mediante una evaluación controlada de su efecto sobre la estabilidad del látex.

Figura 2.5

Acción complementaria de tensoactivos aniónicos y no iónicos en la estabilidad del látex.



Nota. *La combinación de ambos tipos de tensoactivos puede proporcionar una estabilización electroestérica, donde la repulsión por carga y barrera física actúan de manera complementaria. Esto contribuye a mejorar la estabilidad del látex, controlar el tamaño de partícula y reducir la formación de sólidos filtrables, coágulos o residuos.*

Fuente: *Adaptado de Van Herk (2014), Chern (2008) y Praw (2023)*

2.3.6. Estabilidad coloidal y teoría DLVO

La estabilidad coloidal es la capacidad de las partículas del látex para mantenerse dispersas sin coagular, sedimentar o separarse. Esta estabilidad depende de la carga superficial, la protección por tensoactivos, el pH, la concentración de electrolitos, el tamaño de partícula y las condiciones de almacenamiento.

Cuando la estabilidad coloidal disminuye, las partículas pueden agregarse y formar residuos. Por ello, en una emulsión industrial, la estabilidad no es solo una propiedad teórica, sino un criterio de calidad. Una emulsión estable facilita el almacenamiento, transporte, filtrado y posterior uso como ligante.

La estabilidad coloidal de las emulsiones poliméricas es un aspecto crítico que determina la calidad del producto final. Esta estabilidad puede ser explicada mediante la teoría DLVO, la cual establece que la energía total de interacción entre partículas (V_t) es la suma de fuerzas atractivas y repulsivas:

$$V_t = V_A + V_R$$

Donde:

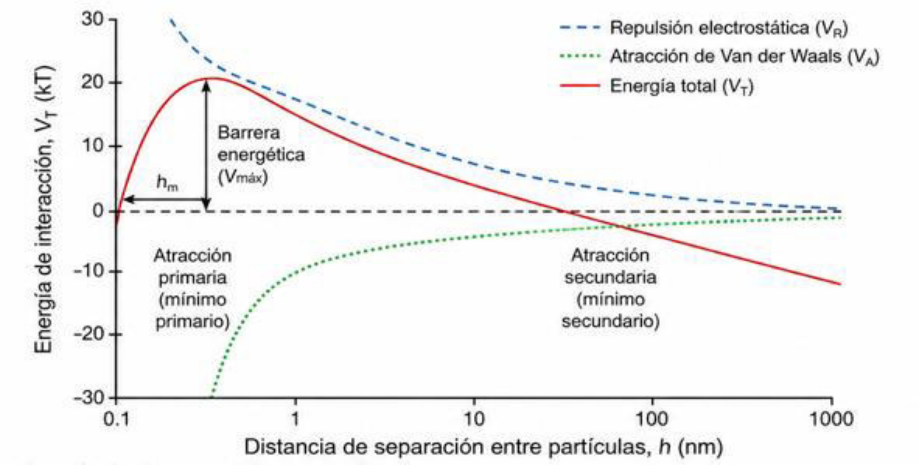
V_A: Energía de atracción (Van der Waals)
V_R: Energía de repulsión electrostática

Cuando la energía repulsiva domina, las partículas permanecen dispersas; en caso contrario, ocurre agregación o coagulación.

Como se muestra en la Figura 2.6, la energía total de interacción presenta una barrera energética que determina si las partículas permanecen estables o si tienden a agregarse.

Figura 2.6

Curva de energía según la teoría DLVO.



Nota. *La curva muestra que, si la energía repulsiva (electrostática) supera a la atractiva (Van del Waals), las partículas permanecen estables debido a la barrera energética (Vmáx). Si la barrera es baja o desaparece (por disminución de cargas superficiales o aumento de la fuerza iónica), las partículas pueden superar el máximo de energía y entrar en el mínimo primario, provocando su agregación o coagulación.*
Fuente: *Adaptado de Moreno y Sipponen (2020).*

Potencial zeta es un parámetro fundamental que permite evaluar la estabilidad del sistema. Valores altos de potencial zeta indican mayor repulsión electrostática y, por tanto, mayor estabilidad (Moreno & Sipponen, 2020).

Factores que afectan la estabilidad:

- pH del sistema
- Fuerza iónica
- Concentración de tensoactivos
- Presencia de electrolitos

En sistemas industriales, pequeñas variaciones en estos parámetros pueden desencadenar fenómenos de inestabilidad, lo que resalta la importancia del control riguroso de las condiciones operativas (Li, Keran et al., 2020).

2.3.7. Temperatura de transición vítrea del copolímero

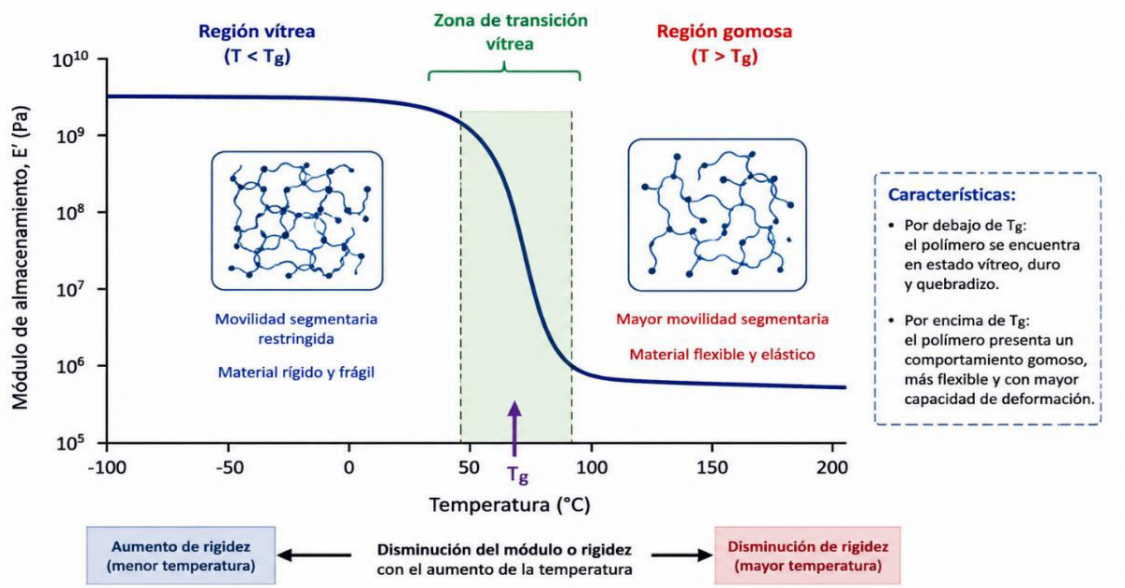
La temperatura de transición vítrea, conocida como Tg, es una propiedad térmica que indica el intervalo en el cual un polímero pasa de un estado rígido o vítreo a un estado más flexible o gomoso. En los copolímeros estireno-acrílicos, esta propiedad depende principalmente de la composición monomérica, ya que cada monómero aporta características distintas a la estructura final del polímero. En

términos generales, el estireno actúa como un monómero duro, por lo que tiende a elevar la Tg y aportar rigidez, dureza y resistencia al material. En cambio, el n-butil acrilato se comporta como un monómero blando, reduciendo la Tg y favoreciendo la flexibilidad, la movilidad de las cadenas poliméricas y la formación de película.

En emulsiones, si la Tg del copolímero es demasiada alta, las partículas pueden presentar menor movilidad y mayor dificultad para deformarse y coalescer a temperatura ambiente. Esto puede generar películas discontinuas, frágiles o con menor adhesión. Por el contrario, si al Tg es demasiado baja, la película puede formarse con mayor facilidad, pero también puede resultar excesivamente blanda, pegajosa y con menor resistencia mecánica. Como se muestra en la Figura 2.7, la Tg marca la transición del polímero desde un comportamiento más rígido y vítreo hacia uno más flexible o gomoso, lo cual influye directamente en su capacidad de formación de película y en sus propiedades finales de desempeño. Por ello, el diseño de un copolímero estireno-acrílico requiere equilibrar la proporción de monómeros duros y blandos, de manera que el ligante pueda formar película y, al mismo tiempo, conservar propiedades adecuadas de desempeño.

Figura 2.7

Temperatura de transición (Tg) y cambio de comportamiento de un polímero.



Nota. *La figura ilustra el cambio en las propiedades viscoelásticas de un polímero alrededor de su temperatura de transición vítrea (Tg).*
Fuente: *Adaptado de Menard (2020) y Odian (2004).*

La literatura sobre resinas acrílicas base agua resalta que la selección de monómeros es un aspecto clave para ajustar las propiedades finales del polímero, ya que la composición del sistema determina características como dureza, flexibilidad, resistencia y capacidad de formación de película (Jiao et al., 2021). Asimismo, investigaciones recientes sobre recubrimientos base agua señalan que la formación de película depende de la aproximación, deformación e interdifusión de partículas poliméricas, procesos que se relacionan con la movilidad del polímero y, por tanto, con su Tg (Arjmandi et al, 2024). En sistemas estireno-acrílicos, también se ha reportado que modificaciones en la estructura del copolímero pueden cambiar la Tg medida por DSC, evidenciando la sensibilidad de esta propiedad frente a la composición del material (Xin et al., 2026).

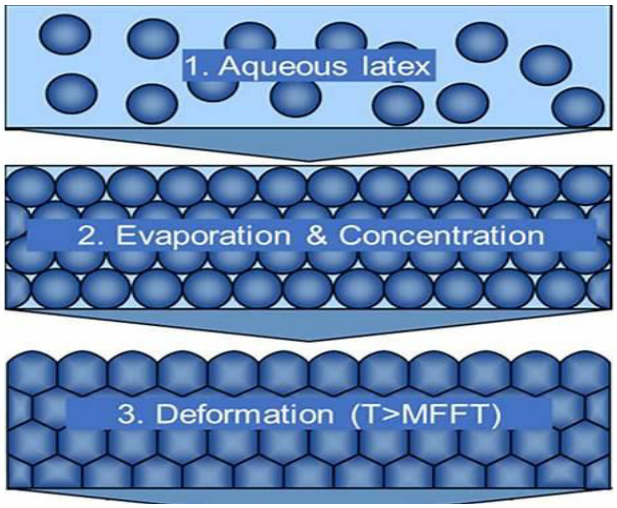
2.3.8. Temperatura mínima de formación de película

La temperatura mínima de formación de película, conocida como MFFT, es la temperatura más baja a la cual una dispersión polimérica o látex puede formar una película continua después de ser aplicada sobre un sustrato. Esta propiedad es especialmente importante en recubrimientos base agua, debido a que el polímero se encuentra inicialmente disperso en forma de partículas y necesita coalescer durante el secado para generar una película uniforme, cohesionado y funcional.

A diferencia de la Tg, que describe una transición térmica propia del polímero, la MFFT representa una condición práctica de aplicación del látex. Es decir, indica la temperatura mínima a la cual las partículas poliméricas tienen suficiente movilidad para aproximarse, deformarse y unirse entre sí. Cuando la temperatura de aplicación se encuentra por debajo de la MFFT, la película puede formarse de manera incompleta, generando defectos como discontinuidad, baja cohesión, agrietamiento, pérdida de adhesión o apariencia blanquecina. En cambio, cuando la aplicación ocurre por encima de la MFFT, las partículas tienen mayor posibilidad de coalescer y formar una película continua. Como se observa en la Figura 2.8, la relación entre la MFFT y la temperatura de aplicación determina si el látex puede desarrollar una película uniforme y continua o, por el contrario, presentar defectos asociados a una coalescencia insuficiente.

Figura 2.8

Relación entre MFFT, temperatura de aplicación y formación de película en un látex estireno-acrílico.



Nota. *La figura muestra el proceso de formación de película en un látex acuoso. Primero, las partículas poliméricas se encuentran dispersas en agua; luego, durante la evaporación del agua, aumenta la concentración de partículas y estas se compactan.*

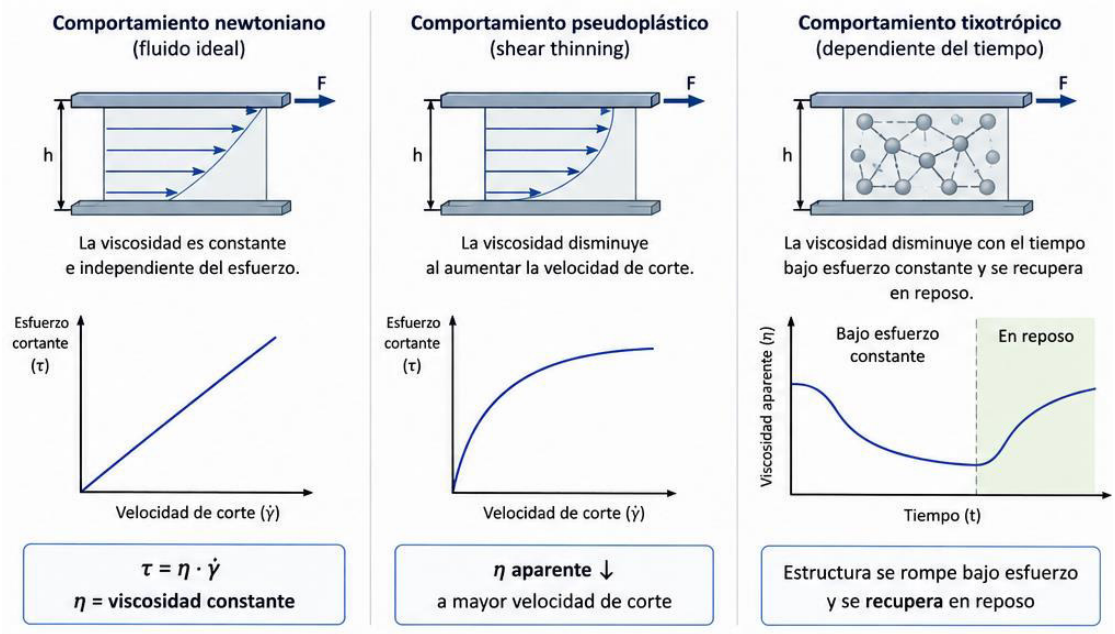
Fuente: *Elaboración propia basada en Brito, E. L. & Ballard, N. (2023)*

2.3.9. Reología en emulsiones poliméricas

La reología es la disciplina que estudia la deformación y el flujo de los materiales cuando son sometidos a un esfuerzo. En el caso de las emulsiones poliméricas, este comportamiento se manifiesta principalmente a través de la viscosidad, aunque también puede incluir respuestas no newtonianas, como el comportamiento pseudoplástico o la tixotropía. Como se muestra en la Figura 2.9, las emulsiones poliméricas pueden presentar diferentes respuestas de flujo dependiendo de su estructura interna, concentración de sólidos, interacción entre partículas y condiciones de esfuerzo aplicado.

Figura 2.9

Comportamiento reológico en emulsiones poliméricas



Nota. *La reología de las emulsiones poliméricas está fuertemente influenciada por su composición y condiciones del medio, lo que afecta su comportamiento de flujo y de desempeño en aplicaciones finales.*

Fuente: *Elaboración propia basada en Brito, E. L. & Ballard, N. (2023)*

Guyot (2002) explica que, en látex de alto contenido de sólidos, la viscosidad es especialmente sensible a la concentración de polímero y a la distribución de tamaño de partícula, lo que demuestra que el comportamiento de flujo del látex está estrechamente relacionado con su estructura coloidal.

En recubrimientos, la reología se relaciona directamente con propiedades de desempeño como la resistencia al escurrimiento, la sedimentación, la nivelación, la facilidad de aplicación y la estabilidad durante almacenamiento. Zheng y Chen (2023) señalan que los métodos reológicos permiten relacionar el comportamiento de flujo de los recubrimientos con su desempeño práctico, incluyendo aspectos como aplicación, nivelación, estabilidad y defectos asociados al flujo. Por ello, la viscosidad no debe interpretarse solo como un parámetro de control de calidad, sino como una propiedad que ayuda a explicar cómo se comporta el sistema antes, durante y después de su aplicación.

En emulsiones acrílicas estirenadas, la reología también puede verse afectada por el sistema emulsificante. Los tensoactivos influyen en la estabilidad de las partículas, en las interacciones superficiales y, en algunos casos, en la distribución de tamaño de partícula. Por lo tanto, un cambio en la dosificación del sistema

emulsificante puede modificar la viscosidad del látex, ya sea por cambios en la estabilidad coloidal, en la cantidad de partículas formadas o en la interacción entre ellas.

2.3.10. Formación de coágulos en polimerización en emulsión

La formación de coágulos representa uno de los principales problemas en la polimerización en emulsión, debido a su impacto negativo en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final. Este fenómeno está directamente relacionado con la pérdida de estabilidad coloidal del sistema.

Los principales mecanismos de formación de coágulos incluyen:

- Colisión entre partículas sin suficiente repulsión electrostática
- Insuficiente cobertura de tensoactivos
- Presencia de impurezas en los monómeros
- Variaciones en pH y temperatura

Estudios recientes indican que la formación de coágulos está estrechamente relacionada con la dinámica de partículas y la distribución del tamaño de partícula en el sistema (Gaur & Sood, 2020).

Desde un punto de vista industrial, la presencia de coágulos genera:

- Pérdida de materia prima
- Obstrucción de equipos
- Variabilidad en el producto final

Por ello, la optimización del sistema emulsificante es una estrategia clave para minimizar este problema.

2.3.11. Propiedades fisicoquímicas del látex

Las propiedades fisicoquímicas del látex son indicadores fundamentales de la calidad del producto y del comportamiento del sistema durante la polimerización. Como se muestra en la Tabla 2.2, parámetros como sólidos, viscosidad, pH y turbidez permiten evaluar la estabilidad, conversión, dispersión de partículas y comportamiento general de la emulsión obtenida.

Tabla 2.2.

Propiedades fisicoquímicas relevantes

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN	INFLUENCIA
Sólidos (%)	Conversión de monómero	Rendimiento del proceso
Viscosidad	Interacción entre partículas	Estabilidad
pH	Estado ácido-base	Estabilidad coloidal
Turbidez	Dispersión de partículas	Tamaño de partícula

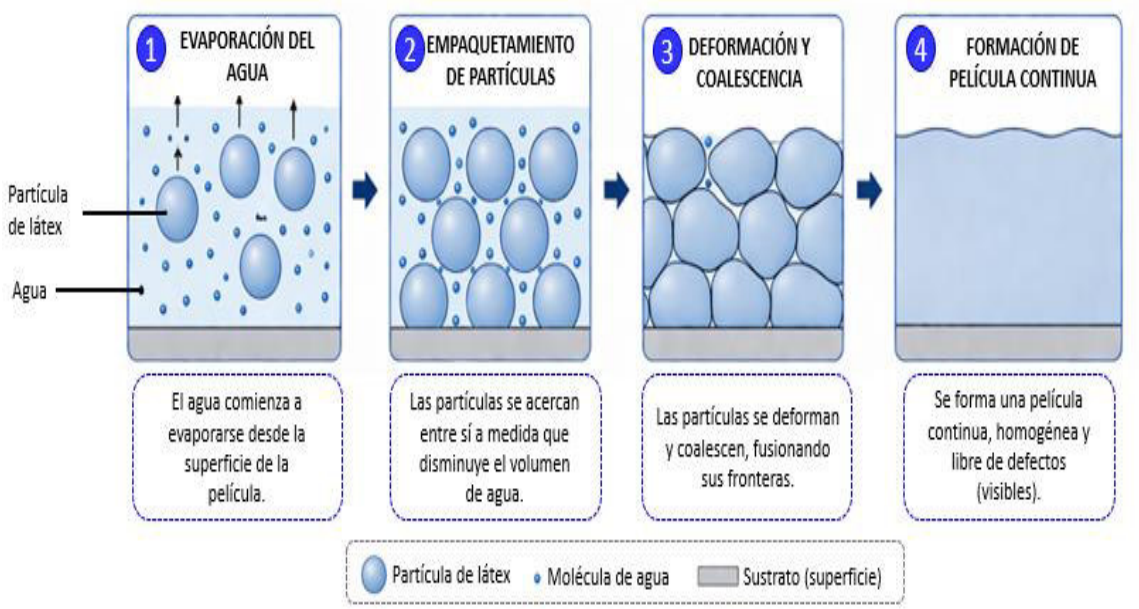
Estas propiedades están interrelacionadas y dependen de la microestructura del polímero y de las condiciones del proceso, por lo que su control permite la interpretar de la estabilidad del látex y su desempeño posterior como ligante en pintura satinada. (Lovell & Schork, 2020).

2.3.12. Formación de película y desempeño en pinturas

La formación de película constituye una etapa crítica en el desempeño final de emulsiones poliméricas destinadas a recubrimientos. Durante este proceso, las partículas de látex dispersas en fase acuosa experimentan un acercamiento progresivo conforme ocurre la evaporación del agua, seguido por deformación, coalescencia y difusión interparticular hasta formar una película continua. La eficiencia de esta etapa depende de factores como la temperatura mínima de formación de película (MFFT), tamaño de partícula, composición monomérica y presencia de coalescentes, los cuales influyen directamente en propiedades finales como brillo, adherencia, resistencia mecánica y estabilidad del recubrimiento.

Figura 2.10

Etapas de formación de película en sistemas poliméricos



Nota. *Representación esquemática del proceso de formación de película en emulsiones poliméricas, incluyendo evaporación del agua, empaquetamiento de partículas, deformación y coalescencia hasta obtener una película continua. Este fenómeno determina propiedades funcionales del recubrimiento como cohesión, adherencia y resistencia mecánica.*
Fuente: *Adaptado de Lovell & Schork (2020)*

Como se observa en la Figura 2.10, la formación de película depende de la capacidad de las partículas poliméricas para reorganizarse y fusionarse adecuadamente tras la evaporación del medio acuoso. Una coalescencia incompleta pueda generar defectos estructurales, porosidad o disminución en propiedades mecánicas, afectando el desempeño del ligante dentro de formulaciones de pinturas satinadas.

La temperatura de transición vítrea (Tg) es un parámetro clave que determina la capacidad de formación de película. Polímeros con Tg baja presentan mejor coalescencia, mientras que aquellos con Tg alta ofrecen mayor resistencia mecánica (Bourgeat-Lami et al., 2020).

La resistencia al frote, una de las propiedades más importantes en pinturas satinadas, está directamente relacionada con la cohesión interna del polímero y su grado de reticulación (Surmacz & Chmielarz, 2020).

2.4. Definición de términos

En esta sección se presentan los principales términos técnicos utilizados en la presente investigación, con el fin de facilitar la comprensión de los conceptos asociados a la síntesis y evaluación de emulsiones acrílicas estirenadas.

2.4.1. Acrilato de butilo (BUA)

Monómero acrílico empleado en la síntesis de polímeros acrílicos y estireno-acrílicos, especialmente en la formación de látex para recubrimientos base agua. Debido a su baja temperatura de transición vítrea, favorece la obtención de películas con menor temperatura mínima de formación de película, aportando propiedades como flexibilidad, adhesión, elasticidad y adecuada capacidad de formación de película. (Murphy & Hunt, 2024)

2.4.2. Cambio de procedencia

El cambio de procedencia o cambio de proveedores se puede presentar debido a diversos factores como la escasez de materias primas, variaciones en el precio, ajustes de inventario, entre otros; lo cual puede traer consigo variaciones en el rendimiento del monómero debido a cambios en la pureza, contenido máximo de agua, presencia de inhibidores, entre otros parámetros.

2.4.3. Pureza

La pureza indica la cantidad de monómero útil que se encuentra en la materia. La pureza es importante porque la presencia de impurezas afecta la velocidad de reacción, estabilidad del látex, peso molecular, entre otros. (Maafa, 2023)

2.4.4. Inhibidor

La polimerización es una reacción altamente exotérmica y, bajo ciertas condiciones, puede acelerarse de forma no controlada. Por ello, se emplean inhibidores, ya que estos compuestos reducen o detienen temporalmente la formación de radicales libres, evitando la polimerización prematura del monómero durante su almacenamiento, transporte o manipulación. (Maafa, 2023)

2.4.5. Tensoactivo

Molécula de naturaleza anfifílica, es decir, posee una parte hidrofílica y otra hidrofóbica. Se adsorben en la interfase como lo son agua/aceite, agua/aire, cumpliendo la función de disminuir la tensión interfacial, por lo cual favorece a la estabilidad de las emulsiones. (Veeramanoharan & Kim, 2024)

2.4.6. Sistema emulsificante

Conjunto de tensoactivos los cuales pueden ser aniónicos, no iónicos o su combinación. Influye en la nucleación de partículas, estabilidad coloidal y propiedades del látex. (Lovell & Schork, 2020)

2.4.7. Polimerización en emulsión

Proceso de polimerización radicalaria heterogénea en el que monómeros hidrofóbicos se dispersan en agua mediante tensoactivos y reaccionan en presencia de iniciadores para formar partículas poliméricas. Este método permite obtener látex con control de tamaño de partícula y estable (Wang, Sun, Hao, & Zhang, 2023)

2.4.8. Emulsión acrílica estirenada

Sistema coloidal constituido por partículas poliméricas dispersas en fase acuosa, sintetizadas a partir de copolímeros de estireno y monómeros acrílicos. Estas emulsiones son utilizadas como ligantes en recubrimientos debido a su alta versatilidad, buena estabilidad y menor impacto ambiental en comparación con sistemas base solvente. (Lovell & Schork, 2020)

2.4.9. Látex polimérico

Es una dispersión coloidal acuosa conformado por partículas poliméricas. Asimismo, debido a sus características es ampliamente utilizado en la industria arquitectónica y automotriz, siendo este un producto intermedio en la formulación de pinturas y recubrimientos. (Pieters & Mekonnen, 2024)

2.4.10. Ligante

Componente resinoso el cual forma una película continua y confiere propiedades como adhesión, flexibilidad, dureza, entre otros. (Bilgin, Bahraaeian, Ling, Tomovska, & Asua, 2022)

2.4.11. Pintura satinada

Recubrimiento que se presenta como una película con brillo intermedio. Presenta una apariencia suave, moderada reflectancia, lavabilidad, resistencia al desgaste

2.4.12. Receta estándar de la empresa

Método interno de fabricación empleado para la síntesis de la emulsión, en el cual se establecen las materias primas, proporciones, secuencia de adición y condiciones de operación requeridas para la obtención del producto. Este procedimiento permite asegurar que el látex obtenido presente las características especificadas y una adecuada reproducibilidad entre lotes.

2.4.13. Emulsión de referencia

Emulsión sintetizada bajo la receta estándar de la empresa, reemplazando el BUA de procedencia americana por BUA de procedencia china. Esta emulsión permite evaluar el efecto del cambio de procedencia del monómero sobre la estabilidad del proceso y las propiedades finales del producto, manteniendo constantes los demás parámetros de formulación y operación.

2.4.14. Emulsión optimizada

Látex sintetizado que alcanza las propiedades fisicoquímicas y de desempeño requeridas, mediante la modificación controlada del sistema emulsificante. Se evalúa la influencia de los tensoactivos y sus proporciones, determinando la formulación que presente mejor características, estabilidad y reproducibilidad.

2.4.15. Coágulo

Material grumoso generado por la pérdida de estabilidad coloidal, las cual está asociada a insuficiencia de tensoactivo, elevada concentración de partículas, entre

otros. Su presencia genera pérdidas del producto final y trae consigo problemas operativos. (Marques, Rosário, Othman, & McKenna, s.f.)

2.4.16. Estabilidad coloidal

Propiedad de una dispersión coloidal que le permite conservar sus partículas distribuidas de manera uniforme en el tiempo, evitando procesos de agregación, coagulación, sedimentación o separación de fases. La estabilidad está determinada por el balance de fuerzas de atracción y repulsión entre las partículas, además de la acción de los tensoactivos o estabilizantes presentes en el sistema. (Tadros, 2013)

2.4.17. Micela

Agregado molecular de naturaleza anfifílica, conformado por tensoactivos en solución acuosa, en el cual las partes hidrofóbicas se orientan hacia el interior y las hidrofílicas hacia el exterior. Estas estructuras actúan como sitios de nucleación durante la polimerización en emulsión. (Khristov & Tchoukov, 2024)

2.4.18. Concentración micelar crítica

Concentración mínima de tensoactivo requerida para que las moléculas dejen de permanecer dispersas y comiencen a asociarse. Por encima de la concentración micelar crítica, el tensoactivo en exceso se orienta a agruparse formando micelas. (Tavakoli, Raston, & Tang, 2020)

2.4.19. Iniciador radicalario

Compuesto que, mediante descomposición térmica o química, produce radicales libres que dan inicio al proceso de polimerización. La cantidad de iniciador empleada puede afectar la velocidad de reacción, la formación de partículas y el tamaño final de partícula del polímero. (Liu, Wang, Zhang, & Zhang, 2016)

2.4.20. Formación de película

Proceso mediante el cual las partículas poliméricas dispersas en el látex se aproximan, deforman y coalescen durante el secado, formando una capa continua. Esta película proporciona propiedades mecánicas y protectoras al recubrimiento,

y es propiciada por la presencia de agentes coalescentes, los cuales facilitan la unión entre partículas adyacentes. (Arjmandi, Bi, Urth, & Dam-Johansen, 2024)

2.4.21. Tamaño de partícula (DLS)

Parámetro que representa el tamaño medio de las partículas presentes en una emulsión o látex, comúnmente determinado mediante dispersión dinámica de luz (DLS). Este parámetro incide en la estabilidad coloidal, la viscosidad del sistema y las propiedades ópticas del recubrimiento final. (Zhang, Zhang, Shang, Mao, & Yang, 2021)

2.4.22. Reología

Ciencia que estudia el flujo y deformación de los materiales ante acciones de esfuerzos. En las emulsiones poliméricas evalúan la viscosidad y respuesta viscoelástica de todo el sistema, aspectos que guardan relación con la estabilidad del coloidal, coalescencia, entre otros. (Różańska, Różański, Wagner, & Warmbier-Wytykowska, 2024)

2.4.23. Comportamiento pseudoplástico

Comportamiento donde la viscosidad aparente de un fluido disminuye al aumentarle la velocidad o aplicarle un esfuerzo. En las emulsiones esto se asocia a que el esfuerzo aplicado puede deformar o romper de forma parcial las estructuras, propiciando el flujo del material. (Rosti & Takagi, 2021)

2.4.24. Temperatura de transición vítrea (Tg)

Temperatura donde los polímeros pasan de un estado rígido (vítreo) a uno gomoso o flexible. Por debajo de esta temperatura, lo polímeros se encuentran duros y frágiles, mientras que por encima de pasan a un estado con mayor movilidad. (Zhang & Gudla, 2024)

2.4.25. Temperatura mínima de formación de película (MFFT)

Temperatura mínima donde las partículas poliméricas de una emulsión pueden coalescer para formar una película uniforme y continua. Este parámetro está

relacionado con la Tg (temperatura vítrea) del polímero y es fundamental para el desempeño de recubrimientos.

2.4.26. Test de filtración

Ensayo empleado para cuantificar el material retenido o coagulado presente en el látex después de la síntesis. Permite evaluar la tendencia del sistema a formar residuos y se utiliza como indicador práctico de estabilidad operativa.

2.4.27. Malla de filtración

Medio físico empleado para retener partículas, coágulos o residuos generados durante el proceso. Esta investigación se empleó una malla de 80 µm durante el filtrado total del piloto.

2.4.28. Estabilidad acelerada

Evaluación realizada bajo condiciones de temperatura más exigentes que el almacenamiento ambiental, con la finalidad de estimar el comportamiento del látex en el tiempo y detectar posibles cambios en viscosidad, pH, sólidos o aspecto físico.

2.4.29. Curado de pintura

Periodo posterior a la aplicación durante el cual la película desarrolla progresivamente sus propiedades mecánicas, debido a la evaporación de agua, compactación de partículas, coalescencia y consolidación del recubrimiento.

2.4.30. Frote húmedo/resistencia a la abrasión

Ensayo que evalúa la capacidad de una película de pintura para resistir ciclos de desgaste bajo condiciones húmedas. Se relaciona con la cohesión interna del ligante y la calidad de la película formada.

2.4.31. Desfase o separación parcial

Fenómeno que puede presentarse durante el almacenamiento de pinturas o emulsiones, asociado a sedimentación, redistribución de sólidos o separación ligera de fases. Requiere homogenización previa antes de la medición.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La optimización del sistema emulsificante, mediante el ajuste de la dosificación de tensoactivos aniónicos y no iónicos, permite estabilizar la síntesis de una emulsión acrílica estirenada empleando n-butil acrilato de procedencia china como alternativa al de procedencia americana, reduciendo la formación de residuos en el reactor y obteniendo un ligante que cumple con las especificaciones requeridas para su aplicación en pinturas satinadas.

3.1.2. Hipótesis específicas

- El cambio de procedencia del n-butil acrilato, de origen americano a origen chino, influye en la estabilidad del proceso de polimerización en emulsión y genera un incremento en la formación de residuos durante la síntesis de la emulsión acrílica estirenada.
- La dosificación óptima del sistema emulsificante permite minimizar la generación de residuos y coágulos en el reactor, manteniendo las propiedades fisicoquímicas de la emulsión acrílica estirenada obtenida con BUA de procedencia china.
- La emulsión acrílica estirenada obtenida con el sistema emulsificante optimizado cumple con los parámetros de control de calidad requeridos para su aplicación como ligante en la formulación de pintura satinada.

3.2. Identificación de variables

3.2.1. Variables independientes

a) Dosificación del sistema emulsificante (tensoactivos)
   Corresponden a la variación en la cantidad de tensoactivos empleados en la síntesis de la emulsión acrílica estirenada.

Niveles evaluados:

- Formulación base
- Incremento +10%
- Incremento +15%
- Incremento +20%

b) Procedencia del n-butil acrilato (BUA)
   - BUA de procedencia americana
   - BUA de procedencia china

3.2.2. Variables dependientes

- Formación de residuos y coágulos en el reactor
- Estabilidad del proceso de polimerización en emulsión
- Propiedades fisicoquímicas de la emulsión acrílica estirenada
- Desempeño de la emulsión como ligante en pintura satinada

3.2.3. Variables de control

Para garantizar la validez del ensayo, se mantuvieron constantes las siguientes condiciones de operación:

- Temperatura de reacción: aproximadamente 80°C
- Tiempo de dosificación: 4 horas
- Velocidad de agitación
- pH inicial del sistema
- Relación monómeros/agua
- Tipo de iniciador empleado
- Secuencia de adición de reactivos
- Volumen del lote piloto
- Condiciones de almacenamiento de la emulsión

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 3.1.

Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Definición conceptual	Definición operacional	Indicador	Unidad
Dosificación del sistema emulsificante	Independiente	Cantidad de tensoactivos aniónicos y no iónicos empleados para estabilizar la emulsión durante el sistema.	Variación porcentual de la dosificación respecto a la formulación base.	Incremento de dosificación	%
Procedencia del n-butil acrilato	Independiente	Origen comercial del n-butil acrilato empleado como monómero en la síntesis.	Uso de BUA de procedencia americana o BUA de procedencia china en la formulación.	Procedencia del monómero	-
Formación de residuos y coágulos	Dependiente	Generación de material coagulado o depósitos sólidos durante la polimerización en emulsión.	Cuantificación de residuos retenidos mediante prueba de filtración.	Porcentaje de residuos retenidos	%
Viscosidad	Dependiente	Resistencia de la emulsión al flujo bajo condiciones de mediciones establecidas.	Medición mediante viscosímetro según procedimiento de control de calidad.	Valor de viscosidad	mPa.s
pH	Dependiente	Medida de acidez o basicidad de la emulsión acrílica estirenada.	Medición mediante potenciómetro calibrado.	Valor de pH	Adimensional
Sólidos	Dependiente	Contenido de material no volátil presente en la emulsión.	Determinación gravimétrica del contenido de sólidos.	Porcentaje de Sólidos	%
Turbidez	Dependiente	Grado de dispersión de la luz asociado a la presencia y distribución de partículas en el sistema.	Medición mediante turbidímetro.	Valor de turbidez	NTU
Resistencia al frote húmedo	Dependiente	Capacidad del recubrimiento para resistir la abrasión bajo condiciones húmedas.	Ensayo de abrasión sobre película de pintura satinada formulada con la emulsión obtenida.	Número de ciclos hasta falla o cumplimiento	Ciclos
Estabilidad en almacenamiento	Dependiente	Capacidad de la emulsión para mantener sus propiedades fisicoquímicas sin separación de fases, sedimentación o variaciones significativas.	Evaluación a 7, 15 y 30 días; para el análisis comparativo se consideró principalmente el día 30, por representar la condición más exigente del ensayo acelerado.	Variación de pH, viscosidad, sólido y turbidez.	% o valor comparativo

3.4. Enfoque de la investigación

La investigación presenta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la medición de variables fisicoquímicas y operativas, permitiendo evaluar de manera objetiva el efecto del cambio de procedencia del n-butil acrilato y de la dosificación del sistema emulsificante sobre el proceso de polimerización en emulsión y la calidad del producto final.

3.5. Tipo y nivel de investigación

- Tipo: Aplicada
- Nivel: Experimental

La investigación es de tipo aplicada, debido a que busca resolver un problema industrial específico relacionado con la estabilidad del proceso de síntesis de una emulsión acrílica estirenada ante el cambio de procedencia del n-butil acrilato. Asimismo, presenta un nivel experimental, ya que se manipula la dosificación del sistema emulsificante para evaluar su efecto sobre la formación de residuos, la estabilidad fisicoquímica de la emulsión y su desempeño como ligante en pintura satinada.

3.6. Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental comparativo secuencial a escala piloto, desarrollado bajo condiciones controladas de planta. El diseño permitió comparar el comportamiento de una formulación estándar con BUA de procedencia americana frente a la formulación elaborada con BUA de procedencia china en diferentes incrementos en la dosificación del sistema emulsificante.

Se consideraron los siguientes ensayos:

- Formulación estándar con BUA de procedencia americana.
- Formulación con BUA de procedencia china manteniendo la receta original.
- Ensayos piloto con BUA de procedencia china e incrementos de +10%, +15% y +20% en el sistema emulsificante.
- Repetición del ensayo seleccionado como óptimo para validar la reproducibilidad del proceso.

Este diseño permitió evaluar la influencia de las variables independientes sobre las variables dependientes y validar la reproducibilidad del proceso.

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

La presente investigación se desarrolló en una planta industrial dedicada a la producción de emulsiones poliméricas en base acuosa, utilizadas como ligante en la formulación de pinturas.

Por motivos de confidencialidad, no se especifica el nombre de la empresa; sin embargo, el estudio se llevó a cabo bajo condiciones reales de operación, utilizando equipos, materias primas y procedimientos estándar de producción a escala piloto e industrial.

4.2. Diseño de investigación

El estudio corresponde a una investigación de tipo experimental, con enfoque cuantitativo, orientada a evaluar el efecto del cambio de procedencia del n-butil acrilato sobre la estabilidad del proceso de polimerización en emulsión y la calidad del producto intermedio obtenido.

Se empleó un diseño experimental, en el cual se contrastó el proceso estándar formulado con BUA de procedencia americana frente a formulaciones elaboradas con BUA de procedencia china, considerando diferentes niveles de dosificación del sistema emulsificante.

Se consideraron los siguientes tratamientos:

- **Proceso control:** Formulación estándar con BUA de procedencia americana.
- **Ensayo diagnóstico:** Formulación con BUA de procedencia china manteniendo la receta original.
- **Ensayos experimentales:** Formulaciones elaboradas con BUA de procedencia china e incrementos del sistema emulsificante en +10%, +15% y +20%.
- **Ensayo de confirmación:** Repetición del tratamiento con mejor desempeño para evaluar la reproducibilidad del proceso.

Este diseño permitió comparar el proceso estándar con los ensayos formulados con BUA de procedencia china, evaluando el efecto generado por los ajustes en la dosificación del sistema emulsificante sobre la estabilidad látex y la reducción de residuos durante la síntesis.

4.3. Población y muestra

La población estuvo constituida por las emulsiones acrílicas estrenadas producidas bajo condiciones de planta a escala piloto, destinadas para su uso como productos intermedios para la formulación de recubrimientos como la pintura satinada. La muestra estuvo conformada por lotes experimentales piloto, identificados de la siguiente manera:

- PP01: Formulación estándar con BUA de procedencia americana.
- PP02: Formulación con BUA de procedencia china manteniendo la receta original.
- PP03: Formulación con BUA chino e incremento de + 10% del sistema emulsificante.
- PP04: Formulación con BUA chino e incremento de + 15% del sistema emulsificante.
- PP05: Formulación con BUA chino e incremento de + 20% del sistema emulsificante.
- PP06: Réplica confirmatoria del tratamiento con mejor desempeño para validar la reproducibilidad del proceso, Piloto PP05.

Estos ensayos piloto constituyeron la base experimental del estudio y permitieron comparar el comportamiento de las formulaciones evaluadas, seleccionar el tratamiento más favorable y confirmar su desempeño como producto intermedio en pinturas satinadas.

4.4. Materiales

Se emplearon materia prima de grado industrial utilizadas en la síntesis de emulsiones acrílicas estirenadas en base acuosa. Por motivos de confidencialidad, no se detallan las proporciones exactas de formulación; sin embargo, los materiales se agruparon de la siguiente manera:

4.4.1. Monómeros principales

- Acrilato de n-butilo (BUA):
  - BUA de procedencia americana, empleado en la formulación estándar
  - BUA de procedencia china, empleado en las formulaciones experimentales
- Estireno

4.4.2. Monómeros funcionales

- Acrilamida 98%
- Ácido acrílico
- Glicidil metacrilato (GMA)
- Viniltrimetoxisilano (VTMO)

4.4.3. Sistema Emulsificante

- Tensoactivos no iónicos
  - Arkopal N307
- Tensoactivos aniónicos
  - Emulsogen EPA073

4.4.4. Sistema iniciador y redox

- Persulfato de sodio
- Trigonox, peróxido orgánico
- Peróxido de hidrógeno
- Rongalit, agente reductor

4.4.5. Reguladores, conservante y auxiliares de proceso

- Ácido fórmico, empleado para el ajuste de pH durante el proceso
- Amoniaco, empleado para el ajuste final de pH y viscosidad de la emulsión
- Mergal K9N, empleado como preservante o conservante del látex
- Agua desionizada

4.5. Procedimiento experimental

4.5.1. Preparación de soluciones auxiliares

Previo al inicio del proceso de polimerización, se prepararon las siguientes soluciones auxiliares necesarias para la síntesis y acondicionamiento final de la emulsión. Estas se mantuvieron bajo agitación hasta lograr su completa disolución o dispersión según la naturaleza de cada componente.

Las soluciones preparadas fueron las siguientes:

Solución I: Iniciador inicial

- Agua desionizada
- Persulfato de sodio

Solución II: Refuerzo iniciador

- Agua desionizada
- Persulfato de sodio

Solución III: Sistema redox

- Agua desionizada
- Peróxido de hidrógeno

Solución IV: Aditivos post-proceso

- Agua desionizada
- Trigonox

Solución V: Aditivos final

- Agua desionizada
- Rongalit

4.5.2. Preparación de pre-emulsión

Se preparó una pre-emulsión compuesta por fase acuosa, monómeros principales, monómeros funcionales y sistema emulsificante. Los componentes empleados fueron los siguientes:

- Agua desionizada
- Acrilato de n- butilo BUA, según la procedencia evaluada
- Estireno
- Acrilamida
- Ácido acrílico
- Glicidil metacrilato (GMA)
- Viniltrimetoxisilano (VTMO)
- Sistema emulsificante, constituido por Arkopal N307 y Emulsogen EPA073.

La mezcla fue sometida a agitación continua durante aproximadamente 30 minutos, con la finalidad de asegurar una adecuada dispersión de los monómeros en la fase acuosa y obtener una pre-emulsión homogénea antes de su dosificación al reactor.

4.5.3. Carga y acondicionamiento del reactor

Se cargó el reactor con agua desionizada y una fracción del sistema emulsificante. Posteriormente, se ajustó el pH mediante la adición de ácido fórmico hasta alcanzar un rango aproximando de 4.0 – 4.2. Este control fue necesario para mantener las condiciones ácidas requeridas durante la etapa inicial del proceso, considerando que el pH puede influir en la estabilidad coloidal, la ionización de especies presentes en el sistema y el comportamiento de los tensoactivos durante la síntesis.

Una vez acondicionado el medio de reacción, el sistema fue calentado hasta alcanzar la temperatura de operación, aproximación 80°C. Durante esta etapa se mantuvo la agitación constante para favorecer la homogeneidad del sistema antes del inicio de la polimerización. El equipo empleado para esta etapa se muestra en la Figura 4.1.

Figura 4.1

Reactor empleado para los ensayos piloto.



Nota. *La figura muestra el reactor utilizado para la síntesis de las emulsiones acrílicas estirenadas a escala piloto durante la etapa de carga y acondicionamiento del medio de reacción.*

Fuente: *Elaboración propia.*

4.5.4. Inicio de polimerización

Una vez alcanzadas las condiciones de operación, se adicionó la Solución I y se incorporó una fracción inicial de la pre-emulsión. El sistema se mantuvo bajo agitación constante durante aproximadamente 30 minutos, con el propósito de favorecer el inicio controlado de la reacción de polimerización.

Durante esta etapa se controlaron variables críticas como:

- Temperatura de reacción
- Velocidad de alimentación inicial
- Estabilidad del sistema
- Presencia de formación inicial de coágulos o residuos.

4.5.5. Dosificación de semi-batch

Posteriormente se procedió con la alimentación controlada del sistema mediante la dosificación progresiva de la pre- emulsión y la adición gradual de las soluciones auxiliares correspondientes.

Con las condiciones principales de operación:

- Temperatura de reacción mantenida aproximadamente en 80°C
- Tiempo total de dosificación de 4 horas
- Agitación constante durante todo el proceso

Durante este periodo se monitoreó el comportamiento del sistema, considerando principalmente

- Estabilidad del látex durante la reacción
- Formación de residuos y/o coágulos
- Comportamiento general de la polimerización

Esta etapa fue crítica debido a que la velocidad de alimentación, la generación de radicales y la estabilización de partículas influyen en la formación de coágulos y en la estabilidad final del látex. La evidencia fotográfica de esta etapa se presenta en la Figura 4.2.

Figura 4.2

Dosificación de pre-emulsión y soluciones auxiliares durante la síntesis piloto.



Nota. *La figura muestra la etapa de alimentación controlada de la pre-emulsión y de las soluciones auxiliares durante el proceso semibatch de síntesis de la emulsión acrílica estirenada.*

Fuente: *Elaboración propia.*

4.5.6. Post- tratamiento para reducción de monómero residual

Finalizada la dosificación principal, se realizó una etapa de post-tratamiento orientada a reducir el contenido de monómero residual.

Para ellos se adicionó la Solución III y se mantuvo la reacción durante aproximadamente 15 minutos.

Posteriormente, se incorporó la Solución IV y se efectuó un enfriamiento progresivo del sistema hasta aproximadamente 79 °C, de acuerdo con las condiciones establecidas en el procedimiento de síntesis.

4.5.7. Ajuste final y acondicionamiento

Finalmente, el sistema fue enfriado progresivamente hasta aproximadamente 35°C. A esta temperatura se adicionó la Solución V y se realizaron los ajustes finales del producto.

En esta etapa se acondicionó la emulsión mediante el ajuste de parámetros finales como pH, viscosidad y estabilidad visual. Asimismo, se incorporaron los aditivos finales correspondientes según el procedimiento establecido.

4.5.8. Variación experimental

La variable principal evaluada en los ensayos fue la dosificación del sistema emulsificante, constituido Arkopal N307 y Emulsogen EPA073. Esta variación se realizó con el fin de evaluar el efecto del incremento de la dosificación de tensoactivos sobre la estabilidad del sistema de polimerización, la formación de residuos y el desempeño posterior del látex como ligante en pintura satinada.

Los niveles considerados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Condiciones experimentales de los ensayos piloto.

ENSAYOS	PROCEDENCIA DE BUA	CONDICIÓN EXPERIMENTAL	FINALIDAD
PP01	Americana	Formulación estándar	Ensayo patrón o referencia de proceso original
PP02	China	Formulación original, sin ajuste del sistema emulsificante	Ensayo diagnóstico para evaluar el efecto directo del cambio de procedencia del BUA
PP03	China	Incremento de +10% del sistema emulsificante	Evaluar un primer ajuste
PP04	China	Incremento de +15% del sistema emulsificante	Evaluar un segundo ajuste
PP05	China	Incremento de +20% del sistema emulsificante	Evaluar un tercer ajuste
PP06	China	Repetición del tratamiento seleccionado como óptimo	Confirmar la reproducibilidad del ensayo con mejor desempeño

Esta variación permitió evaluar el efecto del sistema emulsificante sobre:

- Formación de residuos y coágulos.
- Estabilidad del proceso de polimerización
- Propiedades fisicoquímicas de la emulsión
- Filtrabilidad del látex
- Desempeño posterior como ligante de pintura satinada

4.6. Ensayos de control de calidad

Las emulsiones acrílicas estirenadas obtenidas en los ensayos pilotos fueron evaluadas mediante controles de calidad para su comparación con el sistema de referencia.

De esta manera, los resultados permitieron comparar el comportamiento del látex patrón frente a los ensayos modificados y seleccionar el tratamiento con mejor equilibrio entre baja formación de residuos, estabilidad fisicoquímica y desempeño en pintura satinada.

Las muestras fueron tomadas al finalizar el proceso de síntesis, después del enfriamiento y acondicionamiento final de la emulsión. Antes de cada medición, las muestras fueron homogenizadas cuidadosamente para asegurar su representatividad, evitando incorporar aire o generar espuma excesiva. Los resultados obtenidos fueron comparados con las especificaciones internas de control de calidad empleadas para este tipo de emulsión acrílica estirenadas.

Los controles considerados fueron:

- Aspecto físico y color
- Contenido de Sólidos (%)
- Viscosidad (mPa.s)
- pH
- Turbidez (NTU)
- Formación de residuos o coágulos mediante test de filtración
- Estabilidad después de 30 días de almacenamiento
- Desempeño como ligante en pintura satinada

4.6.1. Evaluación fisicoquímica inicial del látex

La evaluación fisicoquímica inicial se realizó con el propósito de verificar si las emulsiones obtenidas cumplían con las características básicas requeridas para un látex acrílico estirenado destinado al uso como ligante. Se realizó un seguimiento de las propiedades de las emulsiones:

a) Aspecto físico y color

El aspecto físico y el color fueron evaluados visualmente, considerando la homogeneidad de la emulsión, la presencia de grumos, natas, separación de fases, sedimentación, espuma persistente o material coagulado visible.

En una emulsión acrílica estirenada estable se espera a una apariencia homogénea, viscosa y de color blanco característico. La presencia de grumos, partículas gruesas o separación de fases puede indicar una emulsión inestable o una tendencia a la coagulación.

b) Contenido de sólidos

El contenido de sólidos fue determinado con la finalidad de estimar la fracción no volátil presente en la emulsión. Este parámetro se relaciona con la concentración del polímero en el látex y permite verificar si el proceso de polimerización alcanzó un comportamiento bajo las condiciones evaluadas.

Un valor dentro del rango especificado indica que le látex mantiene una concentración de polímero adecuada para su aplicación como ligante. Por el contrario, desviaciones importantes podrían sugerir pérdidas de material por formación de residuos, variaciones en la conversión, arrastre de volátiles o diferencias en el acondicionamiento final del producto.

El porcentaje de sólidos puede expresarse de manera general mediante la siguiente relación:

$$\%\ Sólidos = \frac{Masa\ de\ residuo\ seco}{Masa\ inicial\ de\ muestra} x100$$

c) Viscosidad

La viscosidad fue evaluada como indicador del comportamiento reológico inicial de la emulsión. Este parámetro permite conocer la resistencia del látex al flujo y está relacionado con el contenido de sólidos, el tamaño y la distribución de partículas, la interacción entre partículas, el pH y la dosificación del sistema emulsificante.

Una viscosidad dentro del rango de control indica que la emulsión conserva condiciones adecuadas de manejo, bombeo, almacenamiento y aplicación posterior. Por el contrario, incrementos excesivos pueden asociarse a floculación, crecimiento de partículas, interacción coloidal elevada o inestabilidad durante el almacenamiento.

La medición se realizó bajo condiciones controladas de temperatura, considerando el método interno correspondiente y las condiciones establecidas para este producto, tales como medición a 23 ºC, uso de spindle nº 5 y velocidad de 20 rpm.

d) pH

El pH fue determinado para evaluar el grado de acidez o alcalinidad de la emulsión final. En sistemas acrílicos estirenados, este parámetro es importante

porque influye en la estabilidad coloidal, la ionización de grupos funcionales, la compatibilidad con aditivos y la estabilidad durante el almacenamiento.

El pH fuera de rango especificado puede favorecer la pérdida de carga superficial de las partículas, incrementar la tendencia a la floculación o afectar la viscosidad final de la emulsión.

e) Turbidez

La turbidez fue determinada como un indicador indirecto del grado de dispersión de las partículas látex. En emulsiones poliméricas, la turbidez puede verse influenciada por el tamaño de partícula, la distribución de partículas, la presencia de agregados finos y la homogeneidad de la dispersión.

f) Formación de residuos o coágulos mediante test de filtración

La formación de residuos fue evaluada mediante test de filtración, debido a que este parámetro representa uno de los criterios más importantes de la investigación.

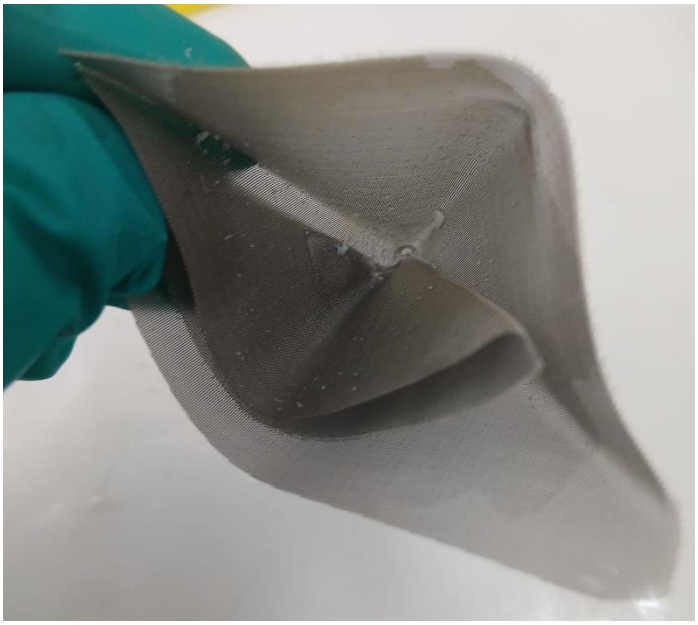
Por ello, la prueba de filtración permitió cuantificar la cantidad de material coagulado o retenido después de la síntesis. Es decir, una mayor cantidad de residuos retenidos indica tendencia a coagulación, deficiente estabilización coloidal o presencia de partículas gruesas formadas durante la reacción. En cambio, una reducción del porcentaje de residuos evidencia una mejora en la estabilidad del sistema y una menor probabilidad de ensuciamiento del reactor. La evidencia del procedimiento de test de filtración 1 y 2 para identificación del porcentaje de residuo retenido se muestra en la Figura 4.3.

El porcentaje de residuos retenidos puede expresarse de manera general mediante la siguiente relación:

$$\%\, Test\ de\ filtro = \frac{Masa\ de\ residuo\ seco\ retenido}{Masa\ de\ muestra\ evaluada} \times 100$$

Figura 4.3

Evidencia del test de filtración para la evaluación de residuos en las emulsiones piloto.



Nota. *En la imagen se observa el filtro empleado para retener residuos y coágulos generados durante la síntesis de las emulsiones piloto.*

Fuente: *Elaboración propia.*

El test de filtro 1 se realizó sobre una muestra de 50g de látex tomada del piloto, con la finalidad de obtener una primera referencia del material coagulado presente en una fracción del lote. Posteriormente, el lote completo fue filtrado mediante una malla de 80 µm, lo que permitió retener residuos gruesos, coágulos visibles y partículas formadas durante la síntesis. Luego del filtrado total, se tomó una nueva muestra de 50g para realizar el test de filtro 2, orientado a evaluar la presencia de residuos finos remanentes en el látex filtrado.

Debido a que el test de filtro 1 representa solo una fracción del lote, su interpretación se realizó de manera complementaria con la observación del material retenido durante el filtrado total con el resultado del filtro 2.

4.6.2. Evaluación de estabilidad acelerada durante almacenamiento

La estabilidad de las emulsiones fue evaluada mediante una prueba de almacenamiento acelerado de estufa a 52 ºC, con el propósito de observar posibles cambios fisicoquímicos y visuales del látex en condiciones más exigentes que las del almacenamiento a temperatura ambiente. Esta evaluación tuvo como finalidad

determinar si las emulsiones mantenían sus características fisicoquímicas en el tiempo o si presentaban cambios asociados a inestabilidad coloidal, floculación, separación de fases o aumento excesivo de viscosidad.

Las muestras fueron colocadas en recipientes cerrados, debidamente identificados, y almacenadas en una estufa a 52 ºC. Las evaluaciones se realizaron a los 7, 15 y 30 días. Según el criterio interno empleado, 7 días en estufa representan aproximadamente 3 meses de almacenamiento, 15 días equivalen a 6 meses y 30 días representan una vigencia estimada de 1 año para el uso del producto.

Esta equivalencia fue considerada como criterio interno de evaluación acelerada, con la finalidad de estimar el comportamiento del producto durante su vida útil. Por ello, la estabilidad a 30 días en estufa fue empleada como una referencia para evaluar la vigencia aproximada del látex durante un año de almacenamiento.

Los parámetros evaluados durante el almacenamiento fueron:

- Aspecto físico y color
- Contenido de Sólidos
- Viscosidad
- pH
- Presencia de desfase, sedimentación o formación visible de coágulos.

Este cálculo permitió identificar que formulación presentó menor variación durante el almacenamiento acelerado. En el caso de la viscosidad, un incremento excesivo pudo asociarse con mayor interacción entre partículas, floculación parcial o pérdida de estabilidad coloidal. En el caso del pH, una disminución fuera del rango de especificación pudo indicar cambios en el equilibrio químico del sistema, afectando la carga superficial de las partículas y favoreciendo fenómenos de desestabilización.

Por otro lado, la estabilidad del contenido de sólidos permitió verificar que no existieran pérdidas significativas de material, separación de fases o alteraciones importantes en la concentración efectiva del látex.

De esta manera, la estabilidad acelerada a 52 ºC permitió seleccionar con mayor seguridad la dosificación del sistema emulsificante más conveniente para viabilizar el uso de BUA de procedencia china, asegurando que la emulsión

acrílica estirenada mantenga condiciones adecuadas como producto intermedio y pueda ser utilizada posteriormente como ligante en pintura satinada.

Figura 4.4

Evaluación de estabilidad acelerada en estufa a 52 °C de las emulsiones.



Nota. *En la imagen se muestran las emulsiones acrílicas estirenadas correspondientes a los ensayos realizados durante la evaluación de estabilidad acelerada en estufa.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Asimismo, se realizó el almacenamiento correspondiente a la pintura satinada formulada con cada una de las emulsiones realizadas, con la finalidad de verificar el comportamiento del látex seleccionado al incorporarse en una formulación real de recubrimiento. Estas muestras acondicionadas para esta evaluación se muestran en la Figura 4.5.

Figura 4.5

Muestras de pintura satinada acondicionadas para evaluación de desempeño.



Nota. *En la imagen se muestran las pinturas satinadas preparadas con la formulación interna de evaluación.*

Fuente: *Elaboración propia.*

4.6.3. Evaluación del desempeño como ligante en pintura satinada

Después de evaluar las propiedades fisicoquímicas y la estabilidad de las emulsiones, el tratamiento con mejor desempeño fue seleccionado para su validación en una formulación de pintura satinada. Esta etapa tuvo como finalidad comprobar si el tratamiento con mejor desempeño (emulsión optimizada con BUA chino) podía cumplir adecuadamente como ligante y dar su validación como aplicación real, en comparación con la emulsión patrón elaborada con BUA americano.

Cabe resaltar que la pintura satinada elaborada fue parte de un control de evaluación propio interno al igual que su formulación, por lo cual no fue objetivo principal de optimización de la investigación.

La evaluación aplicativa fue destinada a verificar si el látex obtenido mantenía un comportamiento funcional aceptable al incorporarse en una formulación real de recubrimiento. Por ello, la formulación de pintura se mantuvo constante, variando únicamente la emulsión empleada como ligante.

Se formuló una pintura satinada con las siguientes proporciones:

- Pasta base: 80%
- Emulsión acrílica estirenada: 20%

Para poder evitar confusión entre la denominación de los pilotos de emulsión y las pinturas preparadas, se empleó la siguiente denominación:

- **PS-PP01:** Pintura satinada preparada con la emulsión estándar PP01, elaborada con BUA de procedencia americana.
- **PS-PP06:** Pintura satinada preparada con la emulsión PP06, correspondiente a la réplica del piloto con mejor desempeño, elaborado con BUA de procedencia china.

La preparación de la pintura satinada utilizada para la validación aplicativa del látex se aplicó sobre lenetas, las cuales sirvieron para su evaluación en la máquina de abrasión como se puede observar en la Figura 4.6.

Figura 4.6

Aplicación de pintura satinada sobre cartilla Leneta para evaluación de desempeño del recubrimiento.



Nota. *En la imagen se observa la aplicación de la pintura formulada con el látex obtenido en los ensayos piloto frente a la formulación de referencia, principalmente mediante la prueba de resistencia a la abrasión o frote húmedo.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Los parámetros evaluados en la pintura fueron:

- Viscosidad (KU)
- pH
- Contenido de sólidos

- Resistencia a la abrasión o frote húmedo a 7 días
- Resistencia a la abrasión o frote húmedo a 28 días
- Evaluación visual complementaria

a) Viscosidad de la pintura

La viscosidad medida en unidades KU, fue evaluada para verificar la consistencia de la pintura satinada formulada con la emulsión seleccionada. Este parámetro permitió determinara si el cambio de ligante afectó la facilidad de aplicación, nivelación y manejo del recubrimiento.

b) pH de la pintura

El pH de la pintura fue determinado para evaluar la compatibilidad de la emulsión con los demás componentes de la formulación. Un pH adecuado favorece la estabilidad del sistema, evita incompatibilidades de la formulación de pintura como con los espesantes, dispersantes u otros aditivos y contribuye a mantener la estabilidad durante el almacenamiento.

c) Sólidos de la pintura

El contenido de sólidos de la pintura permitió verificar la concentración de material no volátil en el recubrimiento formulado. La evaluación de este parámetro se relaciona con el rendimiento, el cuerpo de la película, el poder cubriente de la pintura.

d) Resistencia a la abrasión o frote húmedo

La resistencia a la abrasión fue evaluada como parámetro funcional del desempeño de la pintura satinada. Esta evaluación permitió medir la capacidad de la película formada para resistir ciclos de frote bajo condiciones húmedas, ya que está directamente asociada con la cohesión de la película, la calidad del ligante y la resistencia del recubrimiento durante el uso.

La evaluación se realizó a 7 y 28 días, por lo que el desempeño de la película puede variar con el tiempo de secado y curado. En los resultados, una resistencia igual o superior a la pintura patrón indica que la emulsión optimizada mantiene un desempeño funcional adecuado como ligante.

e) Evaluación visual complementaria

Adicionalmente, como evaluación visual complementaria, la pintura satinada fue aplicada sobre bloques de concreto, cartillas de leneta y láminas sobre vidrio, con la finalidad de observar el comportamiento superficial del recubrimiento en diferentes sustratos. Esta evaluación permitió verificar aspectos como cobertura, uniformidad formación de película, presencia de defectos visibles y apariencia general del secado, como complemento a los ensayos fisicoquímicos y de desempeño realizado.

La aplicación sobre bloques de concreto permitió observar de manera preliminar la cobertura, uniformidad y apariencia superficial del recubrimiento sobre sustrato poroso. Para ello, los bloques fueron pintados y dejados secar a temperatura ambiente. Posteriormente, fueron remojados en agua durante 24 horas y secados nuevamente a temperatura ambiente, a fin de verificar de manera preliminar la apariencia superficial, cobertura, adherencia visual y posibles cambios del recubrimiento en contacto con el agua, como se muestra en la Figura 4.7.

Figura 4.7

Aplicación de pintura satinada sobre bloques de concreto

SECADO A TEMPERATURA AMBIENTE		**SECADO DESPUÉS DE LA INMERSIÓN EN AGUA POR 24 H**	
PS-PP01	PS-PP06	PS-PP01	PS-PP06



Nota. *Los bloques de concreto fueron pintados, secados a temperatura ambiente, remojados en agua durante 24 horas y secados nuevamente para observar la apariencia y adherencia visual del recubrimiento.*

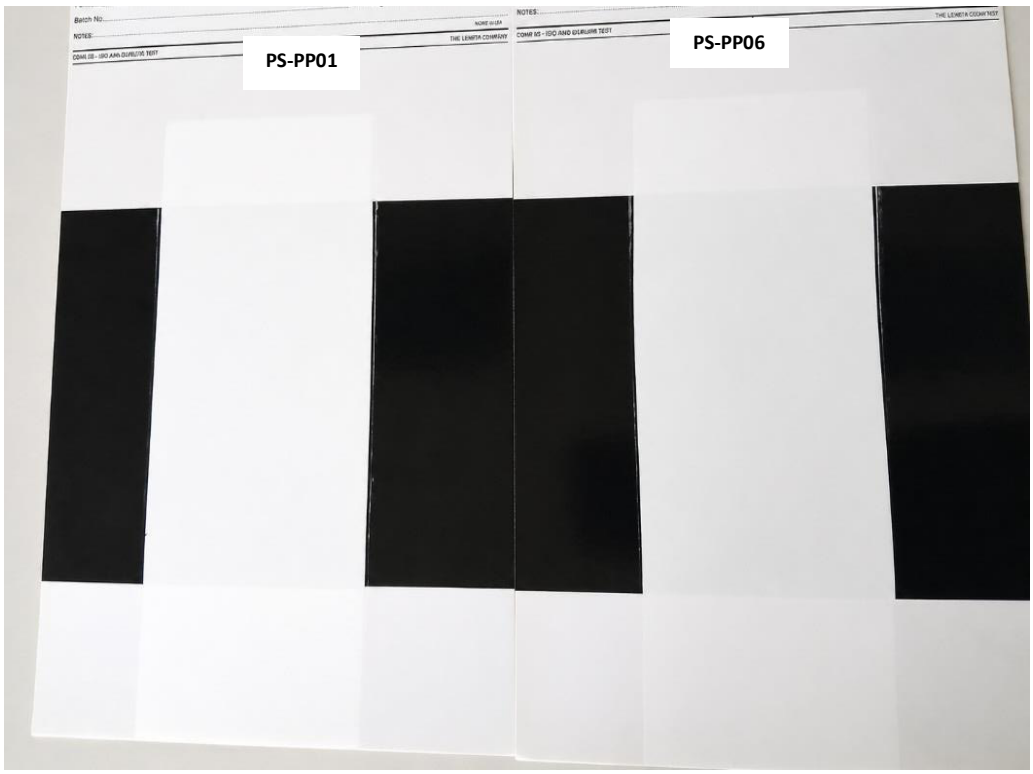
Fuente: *Elaboración propia.*

Por su parte, el estirado sobre cartilla leneta permitió evaluar la distribución de la película y su comportamiento como recubrimiento antes del ensayo de abrasión, como se observa en la Figura 4.8.

Figura 4.8

Estirado de pintura satinada sobre cartilla de leneta de poder cubriente.

PINTURA SATINADA CON EMULSIÓN ESTÁNDAR	PINTURA SATINADA CON EMULSIÓN DE PRUEBA
PS-PP01	PS-PP06



Nota. *En la imagen se observa el estirado de pintura sobre cartilla leneta de poder cubriente, utilizado para evaluar la cobertura, uniformidad y distribución de la película.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Finalmente, la aplicación sobre vidrio permitió observar con mayor claridad la formación de la lámina, continuidad de la película, presencia de defectos visibles y apariencia general del secado, como se observa en la Figura 4.9.

Figura 4.9

Aplicación de pintura satinada sobre vidrio para evaluación de lámina

PINTURA SATINADA CON EMULSIÓN ESTÁNDAR	PINTURA SATINADA CON EMULSIÓN DE PRUEBA
PS-PP01	PS-PP06



Nota. *En la imagen se comparan las pinturas PS-PP01 y PS-PP06 aplicadas sobre vidrio, para observar la formación y continuidad de la película seca.*
Fuente: *Elaboración propia.*

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados de los ensayos

Se realizó la evaluación de los 6 ensayos pilotos (PP01-PP06) correspondientes a las síntesis de emulsiones acrílicas estirenadas, con la variante de procedencia del monómero acrilato de n-butilo (BUA) y la dosificación del sistema emulsificante, consecuentemente la evaluación correspondiente de las variables operativas en el reactor, la estabilidad del producto intermedio y su aplicación final.

5.1.1. Evaluación de propiedades fisicoquímicas de las emulsiones

Para la evaluación del comportamiento inicial de las emulsiones obtenidas se determinaron los parámetros fisicoquímicos principales, incluyendo contenidos de sólidos, viscosidad, pH, color y aspecto físico. Los resultados de los ensayos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1.

Propiedades fisicoquímicas iniciales de los ensayos pilotos

CONTROLES	CRITERIO DE ACEPTACIÓN	PP01	PP02	PP03	PP04	PP05	PP06
Aspecto físico Método MEED0001	Viscoso	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Color Método MEED0001	Blanco	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Sólidos a **105 °C (%)** Método MEED0004	49,0 – 51,0	50,1	40,5	49,6	49,6	49,6	49,0
Viscosidad 23°C (mPa.s) Spindle n°5; 20 rpm Método MEED0005	9 000 – 15 000	15 000	9 000	14 000	15 000	15 000	14 000
pH al 50% Método MEED0003	6,8 – 7,5	7,0	6,8	6,8	7,4	7,3	6,8
Brillo Método MEED0101	**Fondo Blanco** 20° 60° 85° **Fondo Negro** 20° 60° 85°	49,6 85,4 89,5 51,8 83,9 85,7	47,5 78,8 82,2 45,2 72,5 86,1	57,9 78,2 91,7 56,2 68,3 94,8	83,3 94,9 95,1 79,2 92,8 93,8	80,0 94,5 101,5 84,8 94,2 96,5	73,5 95,6 98,5 75,5 94,9 99,5

Nota. *Datos obtenidos de los ensayos piloto realizados en planta.*

Los resultados iniciales muestran que PP01, PP03, PP04, PP05 y PP06 presentaron valores compatibles con el producto esperado; sin embargo, PP02 presentó una desviación importante en sólidos, lo que evidencia que el uso directo del BUA chino sin ajuste del sistema emulsificante afectó el comportamiento del látex. Por ello, la selección del tratamiento óptimo no debe basarse únicamente en las propiedades iniciales, sino también en la formación de residuos, el test de filtración, la estabilidad acelerada y el desempeño posterior como ligante en pintura satinada.

5.1.2. Turbidez

La turbidez fue evaluada como indicador de la dispersión de partículas dentro del sistema. Este parámetro permitió comparar el comportamiento óptico inicial del látex y detectar posibles variaciones asociadas a la distribución de partículas, presencia de agregados finos o diferencias en la estabilidad coloidal del sistema. La tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5.2. Turbidez de las emulsiones obtenidas

CONTROLES	CRITERIO DE ACEPTACIÓN	PP01	PP02	PP03	PP04	PP05
Turbidez (NTU) Método MEED0099	< 400	342	286	388	309	359

Nota. Valores medidos inmediatamente después de la síntesis.

La turbidez se mantuvo dentro de las especificaciones en todos los ensayos, donde el ensayo PP02 presentó el menor valor de turbidez; sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela, debido a que dicho ensayo corresponde a la formulación con BUA de procedencia china sin ajuste del sistema emulsificante.

Por ello, la turbidez no mostró una relación directa con la formación de residuos o coágulos, por lo que no debe interpretarse criterio para seleccionar el tratamiento óptimo sino considerar resultados junto con el test de filtración y la estabilidad acelerada.

5.1.3. Formación de residuos y coágulos

La formación de residuos y coágulos fue evaluada mediante el test de filtración 1 y 2, considerados como un indicador crítico de la estabilidad del sistema. El test de filtro 1 se realizó con una muestra representativa, realizado con una proporción de 50g de emulsión tomada de cada piloto. Al finalizar esta primera evaluación, se filtró la totalidad del piloto mediante una malla de 80 micras, permitiendo observar los residuos de mayor tamaño, coágulos visibles o material grueso formado durante el proceso de polimerización, como se muestra en Figura 5.1. El segundo control se tomó nuevamente una muestra representativa (50g) que permitió evaluar con mayor sensibilidad la presencia de residuos finos remanentes en la emulsión.

Figura 5.1

Residuos retenidos durante la filtración del lote piloto completo mediante malla de 80 µ.

PP01	PP02	PP03	PP04	PP05	PP06



Nota. *Se observa residuos gruesos y partículas finas adheridas al filtro retenidos luego de filtrar en totalidad el piloto mediante malla de 80 µm.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Asimismo, se registró evidencia fotográfica del estado interno del reactor al finalizar los ensayos piloto, con la finalidad de observar la presencia de material adherido, residuos en la paredes internas y zonas de acumulación de coágulos, como se muestra en la Figura 5.2.

Figura 5.2

Estado interno del reactor luego de los ensayos piloto.

PP02	PP03	PP04	PP05	PP06



Nota. *Se observa residuos adheridos en las paredes internas del reactor luego de los ensayos piloto, asociado a la formación de residuos durante la polimerización.* ***Fuente:*** *Elaboración propia.*

Esta evaluación permitió cuantificar el material retenido después del proceso de polimerización y comparar la tendencia de cada formulación a generar residuos, partículas gruesas o material coagulado. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Resultados del test de filtración

CONTROLES	RANGO	PP01	PP02	PP03	PP04	PP05	PP06
Test de filtro 1 (%) Método EED0008	-	0,074	0,322	0,162	0,218	0,281	0,198
Test de filtro 2 (%) Método EED0008	≤ 0,012%	0,008	0,048	0,018	0,004	0,002	0,002

Nota. *Test de filtro 2, residuos más finos*

Aunque el filtro 1 mostró valores variables entre los ensayos, este parámetro no contó con un criterio de aceptación definido y debe interpretarse como un indicador complementario de residuos gruesos o material retenido en la primera etapa de filtración. En cambio, en el filtro 2 permitió evaluar con mayor sensibilidad la presencia de residuos finos, por lo que fue considerado el criterio principal para analizar la mejora del sistema emulsificante.

Como se observa en la Tabla 5.3, el filtro 2 permitió diferenciar con mayor claridad el efecto del ajuste emulsificante. PP02 presentó 0.048%, valor superior al criterio de aceptación de ≤ 0,012 %. En cambio, PP05 y PP06 alcanzaron 0,002%, lo que evidencia una reducción importante de residuos finos después del filtrado total del piloto. Esto indica una mejora en la estabilidad coloidal del sistema.

5.1.4. Estabilidad acelerada

En esta evaluación se tuvo como finalidad determinar si las emulsiones mantenían sus características principales en el tiempo mediante la estabilidad acelerada de las emulsiones mediante un almacenamiento controlado en estufa a 52 °C.

En la presente investigación, el ensayo PP02, correspondiente a la formulación con BUA de procedencia china sin ajuste de sistema emulsificante, no fue considerado como una formulación estable para el análisis comparativo de almacenamiento, debido a que este correspondió al ensayo diagnóstico, ya que

presentó una elevada formación de coágulos grandes, residuos visibles y material retenido en el test de filtración como se puede ver en la Figura 5.3.

Figura 5.3

Residuos formados en el reactor durante el ensayo diagnóstico con BUA chino



Nota. *En la imagen se observa la presencia de residuos y coágulos formados durante el proceso del ensayo PP02, correspondiente a la formulación con BUA de procedencia china sin ajuste del sistema emulsificante.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Durante el ensayo de estabilidad acelerada, se realizó el seguimiento control de las emulsiones piloto a 7, 15 y 30 días de almacenamiento en estufa a 52 ºC, con la finalidad de evaluar progresivamente su comportamiento fisicoquímico bajo condiciones exigentes, permitiendo analizar la tendencia de variación de cada formulación en el tiempo.

En esta evaluación, el control a 30 días representa la condición más exigente del ensayo, debido a que emplea como referencia interna para estimar la estabilidad del producto frente a una vida útil aproximada de un año bajo condiciones normales de almacenamiento.

Los resultados del seguimiento de estabilidad acelerada de las emulsiones piloto preparadas se presentan en la Tabla 5.4, donde se comparan los valores obtenidos a los 7,15 y 30 días de almacenamiento a 52 °C.

Tabla 5.4

Evaluación de estabilidad acelerada de las emulsiones.

Estabilidad a 7 días a 52°C											
CONTROLES	**RANGO**	**PP01-25**		**PP03-25**		**PP04-25**		**PP05-25**		**PP06-25**	
		INICIO	**DÍA 7**	**INICIO**	**DÍA 7**	**INICIO**	**DÍA 7**	**INICIO**	**DÍA 7**	**INICIO**	**DÍA 7**
pH al 50% Método MEED0003	6,8 – 7,5	7,3	7,3	6,8	6,8	7,4	7,4	7,3	7,2	6,8	6,8
Sólidos a 105 °C (%) Método MEED0004	49,0–51,0	50,1	50,1	49,6	49,5	49,6	49,6	49,6	49,6	49,0	49,0
Viscosidad 23ºC (mPa.s) Spindle n°5; 20 rpm Método MEED0005	9 000 –15 000	15 000	16 000	14 000	15 850	15 000	15 500	15 000	16 250	14 000	14 600
Estabilidad a 15 días a 52°C											
CONTROLES	**RANGO**	**PP01-25**		**PP03-25**		**PP04-25**		**PP05-25**		**PP06-25**	
		INICIO	**DÍA 15**	**INICIO**	**DÍA 15**	**INICIO**	**DÍA 15**	**INICIO**	**DÍA 15**	**INICIO**	**DÍA 15**
pH al 50% Método MEED0003	6,8 – 7,5	7,3	7,3	6,8	6,8	7,4	7,3	7,3	7,2	6,8	6,8
Sólidos a 105 °C (%) Método MEED0004	49,0–51,0	50,1	50,3	49,6	49,4	49,6	49,2	49,6	49,3	49,0	49,1
Viscosidad 23ºC (mPa.s) Spindle n°5; 20 rpm Método MEED0005	9 000 –15 000	15 000	19 000	14 000	17 000	15 000	17 750	15 000	17 500	14 000	15 000
Estabilidad a 30 días a 52°C											
CONTROLES	**RANGO**	**PP01-25**		**PP03-25**		**PP04-25**		**PP05-25**		**PP06-25**	
		INICIO	**DÍA 30**	**INICIO**	**DÍA 30**	**INICIO**	**DÍA 30**	**INICIO**	**DÍA 30**	**INICIO**	**DÍA 30**
pH al 50% Método MEED0003	6,8 – 7,5	7,3	7,1	6,8	6,8	7,4	7,3	7,3	7,1	6,8	6,8
Sólidos a 105 °C (%) Método MEED0004	49,0–51,0	50,1	50,4	49,6	49,4	49,6	49,2	49,6	49,3	49,0	49,1
Viscosidad 23ºC (mPa.s) Spindle n°5; 20 rpm Método MEED0005	9 000 –15 000	15 000	22 000	14 000	19 500	15 000	19 000	15 000	18 250	14 000	15 600

Nota. *Evaluación realizada después de almacenamiento controlado.*

Los resultados de estabilidad acelerada evidencian que el ajuste de sistema emulsificante permitió mejorar el comportamiento del látex obtenido con BUA de procedencia china, en comparación con el ensayo diagnóstico PP02. Este ensayo presentó inestabilidad visible, formación significativa de residuos de mayor tamaño y presencia de coágulos por lo que no fue considerado técnicamente adecuado para la evaluación comparativa de estabilidad en almacenamiento.

En ese sentido, el ensayo PP02 se empleó únicamente como punto de partida para identificar el efecto negativo del cambio de procedencia del BUA ya que no se le realizó ningún ajuste en el sistema emulsificante. A partir de este diagnóstico, las formulaciones posteriores con incremento en la dosificación de tensoactivos presentaron un comportamiento más favorable, reflejado en una menor formación de residuos y una mejor estabilidad visual del látex durante el periodo de evaluación.

Asimismo, la condición óptima identificada en PP05 y confirmada mediante PP06 mostró el mejor comportamiento relativo de estabilidad. Este resultado se evidenció principalmente en la réplica confirmatoria PP06, que presentó una menor variación de viscosidad durante el almacenamiento acelerado, en comparación con las demás formulaciones evaluadas. Por ello, la selección del tratamiento óptimo debe establecerse bajo un criterio integral que considere el cumplimiento fisicoquímico inicial, la reducción de residuos en el test de filtración, la estabilidad acelerada y el desempeño posterior como ligante en pintura satinada.

5.1.5. Evaluación en pintura

La evaluación en pintura satinada permitió validar el comportamiento de la emulsión seleccionada como ligante. Por ello, se consideró una formulación de 80% de pasta base y 20% de emulsión. La comparación se realizó entre el piloto PP01 (formulación estándar) y PP06 que confirma la condición óptima y reproducibilidad del ensayo piloto PP05.

Entonces, se realizó la siguiente preparación de pinturas:

- PS-PP01: Pintura satinada formulada con la emulsión PP01.

- PS-PP06: Pintura satinada formulada con la emulsión PP06.

Estas muestras de pintura satinada fueron colocadas en almacenamiento para evaluar su estabilidad acelerada a los 30 días de preparadas con el fin de realizar un seguimiento de estabilidad del ligante en la pintura. Como se muestra en la Tabla 5.5. los resultados iniciales y a 30 días de la evaluación de parámetros de control, como las evaluaciones de resistencia al frote en húmedo a 7 y 28 días de la pintura.

Tabla 5.5

Resultados de la evaluación en pintura satinada

CONTROLES	RANGO	PS-PP01		PS-PP06	
		INICIO	DÍA 30	INICIO	DÍA 30
Sólidos a 105 °C (%) Método MEED0004	43,0 – 45,0	44,3	40,9	44,8	41,7
Viscosidad 23ºC (KU) Método MEED0005	90 - 110	100,2	97,2	99,2	92,6
pH Método MEED0003	7,5 – 8,5	8,0	7,7	8,1	7,8
Resistencia al Frote 7 días Método MEED0011	-	467 455		549 555	
Resistencia al Frote 28 días Método MEED0011	-	397 403		440 425	

Nota. *Valores medidos después de preparación de pinturas satinadas preparadas.*

Los resultados obtenidos evidencian que la pintura formulada con PS-PP06 presentó un desempeño funcional favorable como ligante, principalmente por los valores de viscosidad, pH y resistencia al frote húmedo como se muestran en la Tabla 5.5.

Sin embargo, el contenido de sólidos a 30 días quedó por debajo del rango establecido, este comportamiento puede estar asociado a la variación propia de almacenamiento de la pintura, donde pueden presentar sedimentación, ligera separación de fases o falta de completa homogeneidad de la muestra antes de la medición, por lo que este parámetro debe considerarse como un punto de seguimiento.

Los valores correspondientes a la resistencia al frote húmedo se presentan en la Tabla 5.5, donde se observa que la pintura formulada con la emulsión optimizada mostró un desempeño favorable tanto a los 7 y 28 días de secado, lo que sugiere que el látex seleccionado mantuvo un desempeño funcional adecuado como ligante.

Asimismo, en la Figura 5.4 se muestran las cartillas leneta después de ser sometidas a la máquina de abrasión. En ellas se observa el rayado o desgaste generado durante el ensayo, el cual permite evidenciar visualmente la resistencia de la película frente al frote húmedo.

Figura 5.4

Evaluación de resistencia al frote húmedo de la pintura satinada.

PINTURA SATINADA CON EMULSIÓN ESTÁNDAR		**PINTURA SATINADA CON EMULSIÓN DE PRUEBA**	
PS-PP01		**PS-PP06**	
A 7 Días	A 28 Días	A 7 Días	A 28 Días



Nota. *En la imagen se observan las cartillas después del ensayo de abrasión, realizado a 7 y 28 días de secado, para evaluar la resistencia el frote húmedo.*

Fuente: *Elaboración propia.*

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Influencia del cambio de procedencia del BUA en el proceso de polimerización

De acuerdo a los resultados obtenidos, se evidencia que la sustitución del acrilato de n-butilo (BUA) de procedencia americana por BUA de origen chino, genera variaciones en el comportamiento del sistema de polimerización en una emulsión a base acuosa, en lo relacionado con la estabilidad coloidal y la formación de residuos, aun cuando se mantenga la misma identidad química del monómero.

Las diferencias presentadas se pueden atribuir a variaciones en la pureza del monómero, contenido de inhibidores y presencia de otras impurezas, las cuales pueden afectar la cinética de polimerización y la eficiencia de nucleación de partículas. En sistemas de polimerización en emulsión, la estabilidad depende en gran medida del equilibrio entre generación de radicales, formación de micelas y crecimiento de partículas; cualquier alteración en estos factores puede inducir fenómenos de coagulación (Cheng, Ariafar, Sheibat, Pohn, & Mckenna, 2018).

El ensayo PP02, elaborado con BUA de procedencia china sin ajuste del sistema emulsificante, mostró una desviación importante en el contenido de sólidos inicial y una mayor formación de residuos en el test de filtración.

Por ello, el resultado de PP02 cumple una función diagnóstica que demuestra que el cambio de procedencia del BUA requiere un ajuste del sistema emulsificante para recuperar estabilidad operativa y la reducción de residuos.

6.2. Efecto del sistema emulsificante sobre la formación de residuos

En la comparación de los ensayos realizados con BUA chino, muestra que el incremento de la dosificación del sistema emulsificante redujo de forma marcada la formación de residuos finos retenidos en el filtro 2.

Este comportamiento puede explicarse por una mayor disponibilidad de tensoactivos para estabilizar la interfase monómero/agua y cubrir la superficie de las partículas poliméricas

en crecimiento, reduciendo así la probabilidad de que las partículas pierdan estabilidad, colisionen y formen agregados.

En particular en los ensayos PP05 (+20%) y PP06 (repetición confirmatoria del tratamiento seleccionado) presentaron los menores valores de residuo fino, lo cual indica una mejora en la estabilidad coloidal del látex.

Según lo observado, el ensayo con un incremento de 20% en tensoactivos, mostró el mejor desempeño, lo que indica que este nivel de dosificación es el suficiente y adecuado para compensar las variaciones introducidas por el BUA chino.

Desde un enfoque teórico, esta mayor concentración de tensoactivos se explica por:

a) **La formación de un mayor número de núcleos de polimerización:**
   Las moléculas del tensoactivo no sólo se disuelven, una mayor cantidad de éstas ocasiona que ellas se agrupen formando micelas. Una mayor cantidad de micelas proporciona una mayor cantidad de núcleos o "nidos" en donde tiene lugar la polimerización. Cuando la concentración de tensoactivos es insuficiente, disminuye la disponibilidad de sitios de estabilización y nucleación, lo que puede favorecer la formación de partículas menos protegidas y aumentar la tendencia a la coagulación. (Gilbert, 1995)
b) **La reducción del tamaño de partícula**
   Al aumentar el número de centros el polímero se reparte entre ellos formando muchas partículas pequeñas. Si hubiera pocos núcleos, el polímero se concentraría sólo en algunos lugares formando pocas partículas y grandes.
c) **La mejora en la estabilidad electrostática y estérica.**
   Los tensoactivos absorbidos sobre la superficie de las partículas aportan estabilización electrostática y/o estérica, reduciendo la probabilidad de agregación. Así, si dos partículas chocan, el tensoactivo evita que éstas se peguen. Si no hay suficiente tensoactivo, las partículas del polímero están sin esta capa protectora y se fusionan formando coágulos. (Chern, 2008)

6.3. Interpretación de las propiedades fisicoquímicas iniciales:

Las propiedades fisicoquímicas iniciales permitieron verificar si los látex obtenidos presentaban condiciones básicas compatibles con el producto esperado. Según los

resultados mostrados en la Tabla 5.1. se observó que los ensayos PP01, PP03, PP04, PP05 y PP06 mantuvieron valores de sólidos, viscosidad y pH dentro o cerca de los rangos establecidos.

Sin embargo, en el ensayo PP02, muestra un menor porcentaje en el contenido de sólidos (40,5%). Esta desviación evidencia que el cambio directo de procedencia del BUA, manteniendo la formulación original, sí generó una alteración importante en el comportamiento del sistema.

En cuanto a la viscosidad, los ensayos evaluados se mantuvieron dentro del rango especificado (9000 a 15000 mPa.s). No obstante, la viscosidad puede estar influenciada por la concentración de sólidos, la interacción entre partículas y la dosificación de tensoactivos. En ese sentido nos indica que por más que los valores iniciales sean aceptables no asegura por sí solo la estabilidad del látex en el tiempo, por lo que fue necesario complementar este análisis con la evaluación de estabilidad acelerada.

Respecto al pH, los valores obtenidos se encontraron dentro del rango establecido de 6,8 a 7,5. Esto sugiere que los sistemas presentaron una condición química adecuada para mantener la estabilidad coloidal inicial. Sin embargo, también debe evaluarse su comportamiento durante el almacenamiento, debido a que variaciones posteriores podrían afectar la carga superficial de las partículas y favorece fenómenos de floculación o inestabilidad.

6.4. Interpretación de la turbidez y formación de coágulos

Según los resultados mostrados en la Tabla 5.2, todos los ensayos presentan valores menores al límite de aceptación establecido de 400 NTU, por lo que las emulsiones cumplen con el rango de especificación. Sin embargo, se observó que el menor valor correspondió al ensayo PP02, con 286 NTU, a pesar de que este mismo tratamiento presentó una mayor formación de residuos y coágulos durante la síntesis.

Este comportamiento puede explicarse considerando que la turbidez no solo depende de la cantidad de partículas presentes, sino también de su estado de dispersión. Cuando una emulsión se mantiene estable, las partículas poliméricas permanecen finamente dispersas en el medio acuoso, generando una mayor dispersión de luz, por tanto, una apariencia más opaca o lechosa. En cambio, cuando un sistema pierde estabilidad coloidal, las partículas finas pueden agregarse entre sí y formar grumos o coágulos de mayor tamaño,

de esta manera disminuye la cantidad de partículas finas suspendidas en el líquido, haciendo que este se observe más claro o traslúcido y en consecuencia presente un menor valor de turbidez. Por ello, la turbidez en PP02 podría estar asociado a la desestabilización de la emulsión, donde parte de las partículas dejaron de permanecer suspendidas y pasaron a formar residuos o coágulos visibles.

Esta interpretación se refuerza con los resultados de la tabla 5.3, donde PP02 presentó un valor de 0,048% en el filtro 2, superando el criterio de aceptación de ≤ 0,012%.

En contraste los ensayos con incremento del sistema emulsificante mostraron una reducción importante de residuos en el filtro 2. El ensayo PP04 presentó un valor de 0,004%, mientras que PP05 y PP06 alcanzaron 0,002%, siendo los menores valores obtenidos. Esto indica que el aumento de la dosificación del sistema emulsificante favoreció una mejor estabilización de las partículas de látex, reduciendo la formación de coágulos, residuos grandes y finos, mejorando la filtrabilidad del producto.

En eses sentido, el test de filtración tuvo mayor relevancia porque permitió evidenciar de forma más directa la presencia de residuos y material coagulado generado durante la polimerización.

6.5. Interpretación de estabilidad en el tiempo

Los ensayos de estabilidad acelerada permitieron evaluar el comportamiento de las emulsiones después de 30 días de almacenamiento controlado, considerando principalmente la variación de sólidos, viscosidad y pH. Esta evaluación permitió comprobar si los látex que inicialmente cumplían con las especificaciones mantenían sus propiedades en el tiempo o si presentaban señales de inestabilidad coloidal.

Según los resultados mostrados en la Tabla 5.4, todas las emulsiones evaluadas presentaron contenido de sólidos relativamente estables después de 30 días, manteniéndose en el rango de especificación de 49,0% a 51,0%. Esto indica que no se evidenciaron pérdidas significativas de material no volátil ni cambios importantes asociados a separación de fases o sedimentación durante el periodo de almacenamiento acelerado.

En cuanto la viscosidad, se observó un incremento en todos los ensayos evaluados después de 30 días. Este comportamiento puede asociarse al aumento de las interacciones entre partículas durante el almacenamiento, especialmente en sistemas coloidales

concentrados. Sin embargo, la magnitud del incremento no fue igual para todos los tratamientos. El ensayo PP01 aumentó en 31,8%, el PP03 en 28,2%, PP04 en 21,1% y PP05 en 17,8%, en cambio en el ensayo PP06, correspondiente a la réplica del tratamiento óptimo, PP05, presentó el menor incremento de viscosidad, 16,7%.

Respecto al pH, los ensayos presentaron variaciones pequeñas durante los 30 días de almacenamiento. En el caso de PP06, el pH se mantuvo en 6,8, valor del límite inferior del rango especificado. Este comportamiento sugiere que el sistema conservó una condición química aceptable, aunque debe ser controlada cuidadosamente debido a que una disminución mayor de pH podría reducir la estabilidad electrostática de las partículas y favorecer fenómenos de floculación.

Por ello, PP06 fue considerado adecuado para la validación posterior como ligante en pintura satinada, al representar la réplica confirmatoria del tratamiento óptimo.

6.6. Interpretación del desempeño en pintura satinada

La evaluación en pintura satinada permitió validar el comportamiento de la emulsión optimizada como ligante dentro de la formulación de aplicación real. Para esta etapa se comparó la pintura elaborada con la emulsión patrón PP01, correspondiente al sistema con BUA de procedencia americana, frente a la pintura formulada con PP06, que corresponde a la réplica confirmatoria del tratamiento óptimo, PP05, elaborado con BUA de procedencia china y un incremento de +20% del sistema emulsificante.

Esta comparación fue importante porque permitió verificar si la optimización realizada en la síntesis del látex no solo mejoraba la estabilidad del proceso y reducía la formación de residuos, sino que además mantenía un desempeño funcional adecuado al incorporarse en una pintura satinada. En ese sentido, la pintura no fue objetivo principal de optimización, sino un medio de validación aplicativa en látex obtenido.

Según los resultados mostrados en la Tabla 5.5, la pintura formulada con PP06 presentó valores iniciales de sólidos, viscosidad y pH dentro de los rangos establecidos, lo que indica una adecuada compatibilidad del látex optimizado con la formulación de pintura.

Después de 30 días de almacenamiento, se observó una disminución en el contenido de sólidos de ambas pinturas. En PP01, los sólidos pasaron de 44,3% a 40,9%, lo que representa una reducción aproximada de -7,67%. En PP06, el valor disminuyó de 44,8%

a 41,7%, equivalente a una reducción aproximada de -6,92%. Aunque ambos valores quedaron por debajo del rango de aceptación establecidos para sólidos, la disminución fue ligeramente menor en la pintura formulada con PP06. Este comportamiento debe interpretarse con cuidado, debido a que en pinturas satinadas pueden presentarse cambios durante el almacenamiento, como sedimentación parcial, separación ligera de fases o variaciones en la distribución de sólidos. Por ello, antes de realizar medición, es necesario homogenizar adecuadamente la muestra mediante una buena agitación, a fin de obtener una lectura más representativa del sistema.

En relación a la viscosidad, la pintura patrón PP01 disminuyó de 100,2 KU a 97,2 KU, lo que representa una variación de -2,99%. Por su parte, la pintura formulada con PP06 disminuyó de 99,2 KU a 92,6 KU, equivalente a una variación de -6,65%, a pesar de estas reducciones, ambos valores se mantuvieron dentro del rango especificado de 90 a 110 KU.

Respecto al pH, PP01 disminuyó de 8,0 a 7,7, lo que representa una variación de -3,75%, mientras que PP06 disminuyó de 8,1 a 7,8 equivalente A -3,70%. En ambos casos, los valores se mantuvieron dentro del rango de aceptación de 7,5 a 8,5, lo que indica que la incorporación de la emulsión optimizada no generó una alteración significativa en la condición química de la pintura.

El resultado más relevante de esta evaluación fue la resistencia al frote húmedo. A los 7 días, la pintura patrón PP01 presentó un promedio de 461 ciclos, mientras que la pintura formulada con PP06 alcanzó un promedio de 552 ciclos. Esto representa una mejora aproximada de +19,74% respecto al patrón. A los 28 días PP01 presentó un promedio de 400 ciclos, mientras PP06 alcanzó un promedio de 432,5 ciclos, equivalente a una mejora aproximada de +8,13%.

Estos resultados indican que la emulsión optimizada mantuvo una adecuada capacidad de formación de película y buena cohesión interna como ligante en pintura satinada. La evaluación a 7 y 28 días de curado permitió comprobar el desarrollo progresivo de la resistencia del recubrimiento, considerando que durante este proceso continúan procesos como la evaporación de agua, compactación de partículas, coalescencia y consolidación de la película.

La evaluación en pintura satinada confirmó que la condición optimizada, identificada en PP05 y confirmada mediante PP06, presentó un desempeño favorable como ligante. Por

ello, los resultados de viscosidad, pH y resistencia el frote húmedo respalda que la emulsión optimizada conservó un desempeño funcional adecuado para su aplicación como ligante en pintura satinada.

6.7. Evaluación final

En base a los resultados experimentales obtenidos, permite validar la hipótesis planteada, debido a que el sistema emulsificante permitió viabilizar técnicamente el cambio de procedencia del n-butil acrilato, de origen americano a origen chino, en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada. Esta viabilidad no se sustentó únicamente en la obtención del látex, sino en la reducción de residuos, el mantenimiento de propiedades fisicoquímicas aceptables, la estabilidad relativa del sistema y su desempeño posterior como ligante en pintura satinada.

El ensayo diagnóstico, PP02, elaborado con BUA de procedencia china sin ajuste del sistema emulsificante¸ permitió evidenciar el efecto del cambio directo de procedencia de la materia prima. Este ensayo presentó una mayor formación de residuos y coágulos, además de una desviación importante en el contenido de sólidos lo que confirmó que la formulación original no era suficiente para mantener la estabilidad del sistema cuando se emplea BUA chino. Por ello, PP02 cumplió una función importante dentro de la investigación, ya que permitió identificar el problema técnico que debería corregirse mediante el ajuste de la dosificación del sistema emulsificante.

A partir de los ajustes realizados, el tratamiento PP05, corresponde al incremento de +20% del sistema emulsificante, presentó el mejor comportamiento integral entre las formulaciones evaluadas. Este tratamiento destacó por la reducción de residuos y coágulos, considerando no solo los valores obtenidos en los test de filtración, sino también la observación del material retenido durante el filtrado total del piloto. Es importante precisar que el test de filtro 1 se realizó sobre una muestra de 50g de látex, por lo que representó únicamente una fracción pequeña del lote sintetizado. En consecuencia, aunque este ensayo permitió obtener una primera referencia de la presencia de material coagulado, no reflejó por sí solo la totalidad de residuos generados durante la polimerización.

Por ello, se evidencia que el test de filtro 1 no debía analizarse de manera aislada. Si bien algunos ensayos, como PP03 y PP04, presentaron valores relativamente menores en la

muestra puntual de 50g, durante el filtrado total del piloto se observó una mayor cantidad de residuos grandes dentro del reactor. Esto indica que una muestra pequeña puede no representar completamente la distribución real de coágulos en el lote, especialmente cuando los residuos no se encuentran uniformemente dispersos en la emulsión.

En ese sentido, la selección del tratamiento óptimo requirió considerar de manera conjunta tres aspectos en la reducción de residuos: el valor del filtro 1, la observación del material retenido durante el filtrado total del piloto y el valor del filtro 2. Por el cual, PP05, mostró una mejora más consistente, ya que el látex se observó más homogéneo y con menor presencia de residuos visibles en comparación con los ensayos anteriores. Por esta razón fue seleccionado como tratamiento óptimo y posteriormente repetido mediante el ensayo PP06, con el fin de confirmar la reproducibilidad de la condición seleccionada y brindar mayor respaldo técnico a la validación final del proceso.

6.8. Consideración técnico-económica preliminar del ajuste emulsificante

En la presente investigación se dio incrementos en la dosificación del sistema emulsificante, quedando como la opción favorable el ensayo con un incremento del +20%, si bien implica un aumento en la dosificación de tensoactivos respecto a la formulación estándar, este efecto no debe evaluarse de manera aislada. En una formulación estándar, el costo total depende de la participación relativa de cada materia prima, del precio unitario de los insumos y de los costos operativos asociados al proceso. En este caso, el ajuste del sistema emulsificante permitió reducir la formación de residuos, mejorar la filtrabilidad y disminuir el riesgo de ensuciamiento del reactor, factores que pueden compensar parcialmente el incremento del costo de tensoactivos mediante una mayor eficiencia operativa, menor pérdida del producto y menor necesidad de limpieza.

Adicional a ello, el BUA constituye una materia prima de mayor participación en la formulación frente al sistema emulsificante, por lo que la conveniencia económica del cambio de procedencia debe evaluarse considerando la diferencia de costo entre BUA americano y el BUA chino, junto con el sobrecosto generado por el incremento de tensoactivos. Debido a la confidencialidad de precios industriales, la presente investigación no desarrolló un análisis económico detallado; sin embargo, los resultados obtenidos permiten sustentar la viabilidad técnica del sistema y dejan planteada la necesidad de realizar una evaluación técnico-económica complementaria.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se logró optimizar el sistema emulsificante empleado en la síntesis de una emulsión acrílica estirenada utilizando n-butil acrilato de procedencia china, logrando una condición técnicamente viable frente al sistema patrón elaborado con BUA de procedencia americana. De esta manera, la condición optimizada permitió reducir la formación de residuos, mantener propiedades fisicoquímicas aceptables y conservar un desempeño funcional favorable como ligante en pinturas satinadas.
- El cambio directo de procedencia del BUA, manteniendo la formulación original, afectó el comportamiento del proceso de polimerización en emulsión. Esto se evidenció en el ensayo PP02, el cual presentó mayor formación de residuos, presencia de coágulos visibles y desviaciones en algunos parámetros de control. Por ello, se confirmó que la formulación estándar no era suficiente para trabajar con BUA de procedencia china sin modificar la dosificación del sistema emulsificante. Estos efectos pueden afectar la operatividad del proceso, la estabilidad coloidal del látex y las características finales del ligante obtenido.
- Entre los tratamientos evaluados, el ensayo PP05, correspondiente al incremento de +20% del sistema emulsificante, presentó el mejor balance técnico entre reducción de residuos, comportamiento fisicoquímico y estabilidad relativa. Su selección no se basó en un solo resultado, sino en la evaluación conjunta del test de filtro 1, la observación del filtrado total del piloto mediante malla de 80 µm y el resultado del test de filtro 2, que permitió identificar la presencia de residuos finos remanentes.
- La réplica confirmatoria PP06 permitió respaldar la reproducibilidad de la condición óptima identificada en PP05. Este ensayo mantuvo un comportamiento favorable durante la estabilidad acelerada, especialmente por presentar una menor variación relativa de viscosidad frente a los demás tratamientos evaluados. Este resultado permitió fortalecer la selección de la condición optimizada.

- La pintura satinada formulada con PS-PP06 presentó un desempeño funcional favorable como ligante, principalmente en los parámetros de viscosidad, pH y resistencia al frote húmedo. En este último ensayo, la pintura preparada con la emulsión optimizada mostró un resultado superior al sistema patrón PS-PP01, tanto a los 7 como a los 28 días de secado, lo que evidencia una adecuada formación de película y cohesión del recubrimiento.
- La pintura formulada PS-PP06 mostró un buen desempeño aplicativo, el contenido de sólidos a los 30 días se ubicó por debajo del rango establecido. Por esta razón, este parámetro debe considerarse como un punto de seguimiento en futuras evaluaciones de estabilidad de pintura, asegurando una adecuada homogenización de la muestra antes de realizar la medición.
- Los resultados obtenidos permiten aceptar favorablemente la hipótesis de investigación, debido a que el ajuste de la dosificación del sistema emulsificante permitió viabilizar técnicamente el uso de BUA de procedencia china. Esta optimización contribuyó a reducir la formación de residuos, mejorar la estabilidad relativa del látex y mantener su funcionalidad como ligante en una formulación de pintura satinada.

7.2 Recomendaciones

1. Realizar estudios de caracterización comparativa más detallada del BUA de procedencia china y del BUA de procedencia americana, considerando parámetros como pureza, humedad, acidez, concentración de inhibidor e impurezas. Esto permitirá identificar con mayor precisión qué características de la materia prima influyen directamente en la estabilidad del proceso de polimerización.
2. Evaluar la condición optimizada en lotes piloto adicionales y, posteriormente, en una escala de producción mayor. Esto permitiría confirmar la reproducibilidad del proceso bajo condiciones más cercanas a la operación industrial, evaluando el efecto de las otras variables operativas, como temperatura, velocidad de agitación y perfil de alimentación o dosificación, para conseguir optimizar más el proceso.
3. Realizar un análisis técnico-económico que considere la diferencia de costo entre BUA americano y el BUA chino, el incremento del sistema emulsificante, la reducción de residuos, el tiempo de limpieza del reactor, la pérdida de producto y la eficacia operativa del proceso. Esto permitirá complementar la viabilidad técnica con una evaluación económica más completa.
4. Ampliar la evaluación aplicativa de la emulsión optimizada en otras formulaciones de recubrimientos base agua, con la finalidad de verificar si el desempeño observado en pintura satinada se mantiene en otros tipos de productos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd El-Wahab, H., Attia, M., Hassan, W., & Nasser, A. (2019). Preparation, characterization and evaluation of some acrylate polymers nanoparticles as binder to improving the physical properties of water-based paints. *International Journal of Nanoparticles and Nanotechnology*.

Arjmandi, A., Bi, H., Urth, S., & Dam-Johansen, K. (2024). From Wet to Protective: Film Formation in Waterborne Coatings. *ACS Applied Materials and Interfaces*.

Arjmandi, R., Johansson, M., & Malmström, E. (2024). *Journal of Coatings Technology and Research.* Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s11998-024-01020-4

Ayhan, B., Sakar, D., & Tarakci, E. (2023). Effect of anionic/nonionic surfactant systems on the properties of water-based styrene/ acrylic copolymer latexes. *Bulgarian Chemical Communications*, 267-272. https://bcc.bas.bg/BCC_Volumes/Volume_55_Number_3_2023/bcc-55-3-267-272-sakar-icntc06.pdf

Bilgin, S., Bahraaeian, S., Ling, M., Tomovska, R., & Asua, J. (2022). Surfactant-free latexes as binders in paint applications. *Progress in Organic Coatings*.

Bourgeat-Lami et al. (27 de enero de 2020). *Royal Society of Chemistry homepage.* Obtenido de https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/py/d0py00140f

Brito, E. L., & Ballard, N. (2023). Film formation of hard-core/soft-shell latex particles. *Journal of Polymer Science, 61*, 410–421. https://doi.org/10.1002/pol.20220546

Cheng, D., Ariafar, S., Sheibat, N., Pohn, J., & Mckenna, T. (2018). Particule Coagulation of Emulsion Polymers: A Review of Experimental and Modelling Studies. *Polymer Reviews*, 717-759.

Chern, C. (2008). *Principles and Applications of Emulsion Polymerization.* N.J.: Jhon Wiley & Sons, Inc.

Elizalde, L., Mendoza, J., Ledezma, R., Treviño, M., & Mondragon, M. (2020). Synthesis of butyl acrylate-styrene-TMI latexes and their application as water-based coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 1-9.

Eren, B., & Solmaz, Y. (octubre de 2020). *Sakarya University Journal of Science.* Obtenido de https://dergipark.org.tr/en/pub/saufenbilder/article/761756

Guyot, A. (2002). *Elsevier Science.* Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S007967000200014X?via%3Dihub

Gaur, T., & Sood, A. (1 de octubre de 2020). *Journal of Chemical Engineering Research Updates.* Obtenido de https://www.avantipublishers.com/index.php/jceru/article/view/985

Gilbert, R. (1995). *Emulsion Polymerization: A Mechanistic Approach.* London: Academic Press Limited.

González, C., Moreno, A., Zapata, C., García, F., & Medina, J. (2022). Reformulación y caracterización de una resina acrílica estirenada a partir de la recuperación de poliestireno expandido (EPS). *Ciencia en Revolución*, 298-314.

Hoffmann, K., Langhoff, A., Adams, J., Huellemeier, A., Auugustin, W., Scholl, S., & Johannsmann, D. (2024). Differences in emulsion polymerization fouling between acrylates and vinyl acetate studied in-situ with a quartz crystal microbalance (QCM). *Heat Exchanger Fouling & Cleaning Conference*, 228-236.

Jiao, C., Sun, L., Shao, Q., Song, J., Hu, Q., Naik, N. & Guo, Z. (2021, enero 21). *ACS Omega.* Retrieved from https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c05593

José M. Asua et al. (2024). *Macromolecular Materials and Engineering.* Obtenido de https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/mame.202400026

Khristov, K., & Tchoukov, P. (2024). Amphiphilic Molecules, Interfaces and Colloids. *Molecules*.

Keshk, H., El-Aziz, A., Mohamed, S., Hanafy, S., & Hussain, A. (2025). Preparation and characterization of crosslinked poly/styrene-butyl acrylate) for applications in interior decorative paints. *Egyptian Journal of Chemistry*, 225-235.

Li, Keran et al. (8 de Julio de 2020). *American Chemical Society Publications.* Obtenido de https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.0c01493?goto=supporting-info

Lovell, P. A., & El-Aasser, M. S. (Eds.). (1997). *Emulsion polymerization and emulsion polymers*. Wiley.

Lovell, P. A., & Schork, F. J. (16 de junio de 2020). *American Chemical Society Publications.* Obtenido de https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00769

Liu, B., Wang, Y., Zhang, M., & Zhang, H. (2016). Initiator systems effect on particle coagulation and particle size distribution in one-step emulsion polymerization of styrene. *Polymers*.

Maafa, I. (2023). Inhibition of Free Radical Polymerization: A Review. *Polymers*.

Marqués, M., Rosário, M., Othman, N., & McKenna, T. (s.f.). Coagulation of Emulsion Polymers. *Universidad de Lisboa*.

Menard, K. P., & Menard, N. R. (2020). *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction* (3rd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429190308

Moreno, A., & Sipponen, M. H. (5 de noviembre de 2020). *Nature Communications.* Obtenido de https://www.nature.com/articles/s41467-020-19407-3

Murphy, S., & Hunt, E. (2024). Butyl acrylate. *Encyclopedia of Toxicology*.

Odian, G. (2004). *Principles of Polymerization (4th ed.).* Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-Interscience. Obtenido de https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/047147875X

Ozdamar, B. (2016). *Synthesis of styrene-acrylic copolymers and their use in paint.* Istanbul Thechnical University.

Patil, S., Parekh, N., & More, A. (2025). An overview of styrene acrylic emulsions: synthesis, properties, and applications. *Polymer Bulletin*, 10553-10586.

Pieters, K., & Mekonnen, T. (2024). Progress in waterborne polymer dispersions for coating applications: commercialized systems and new trends. *RSC Sustainability*, Doi: https://doi.org/10.1039/D4SU00267A

Praw, M. (2023). *PCI Magazine.* Retrieved from https://www.pcimag.com/articles/111721-effect-of-different-surfactants-on-emulsion-polymerization-of-a-vinyl-acrylic-latex

Rosti, M., & Takagi, S. (2021). Shear-thinning and shear-thickening emulsions in shear flows. *Physics*.

Różańska, S., Różański, J., Wagner, P., & Warmbier-Wytykowska, E. (2024). Rheological properties of emulsions stabilized by cellulose derivatives with the addition of ethyl alcohol. *Materials*.

Sardari, A., & Mannari, V. (2024). Emulsion polymerization process: effects of particle nucleation mechanism on properties of acrylic-styrene latex. *Journal of Coatings Technology and Research*.

Shaghayegh Hamzehlou, J. M. (13 de agosto de 2020). *Elsevier B.V.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/S0065237720300223?via%3Dihub

Solera-Sendra, J., Franco, L., & Puiggali, J. (2025, abril 10). *MDPI Journals.* doi: https://doi.org/10.3390/polym17081027

Surmacz, K., & Chmielarz, P. (6 de abril de 2020). *MDPI.* Obtenido de https://www.mdpi.com/1996-1944/13/7/1717#metrics

Tadros, T. (2013). *Emulsion formation, stability, and rheology.* Wiley Online Library.

Tavakoli, J., Raston, C., & Tang, Y. (2020). Tuning Surface Morphology of Fluorescent Hydrogels Using a Vortex Fluidic Device. *Molecules*.

Van Herk, A. M. (Ed.). (2013). *Chemistry and technology of emulsion polymerisation* (2nd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118638521

Veeramanoharan, A., & Kim, S. (2024). A comprehensive review on sustainable surfactants from CNSL: chemistry, key applications and research perspectives. *RSC Advances*, 25429-25471.

Wang, M., Zhijun, M., Zhu, D., Zhang, D., & Yin, W. (2013). Core-Shell latex synthesized by emulsion polymerization using an alkali-soluble resin as sole surfactant. *Journal of Applied Polymer Science*.

Wang, Y., Sun, B., Hao, Z., & Zhang, J. (2023). Advances in organic-inorganic hybrid latex particles via in situ emulsion polymerization. *Polymers*.

Xiang, S., Cheng, Z., Shi, W., Zheng, T., Gao, Y., Zhang, J. & Huang, L. (2024). *RSC Advances.* Retrieved from https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d4ra01844c

Xin, F., Liu, J., Zeng, Y., Li, H., Yang, G., & Wang, Y. (2026, febrero 12). *MDPI Journals.* Retrieved from https://www.mdpi.com/2073-4360/18/4/468

Zhang, C., & Gudla, H. (2024). How to determine glass transition temperature of polymer materials. *The Journal of Physical Chemistry B.*

Zhang, S., Zhang, Q., Shang, J., Mao, Z., & Yang, C. (2021). Measurement methods of particle size distribution in emulsion polymerization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*.

Zheng, S. X., & Chen, H. S. (2023, abril). *Elsevier B.V.* Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944022007007?via

Zavecz, I., Palma, C., Yokomichi, M., Alves, G., Rodriguez, L., Moreira, D., & Oliveira, M. (2025). Colloidal stability of styrene-acrylic latexes using anionic and nonionic polymerizable surfactants by seeded emulsion polymerization for waterborne paints. *Colloid and Polymer Science*, 247-260.

Zavecz, I., Palma, C., Yokomichi, M., Moreira, D., & Oliveira, M. (2024). Enhancing the colloidal stability of carboxylated styrene-acrylic latexes using anionic and nonionic polymerizable surfactants for architectural paints. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2079-2092.