



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PANORAMA ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA  
SUSTENTABLE EN LA INDUSTRIA DE PINTURAS Y  
RECUBRIMIENTOS PARA METALES EN MÉXICO**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**EVELYN JANET ALTAMIRANO GEMINIANO**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.**

**2021**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: Profesor: MARIA RAFAELA GUTIERREZ LARA**

**VOCAL: Profesor: MODESTO JAVIER CRUZ GOMEZ**

**SECRETARIO: Profesor: JUAN GOMEZ DUEÑAS**

**1er. SUPLENTE: Profesor: VICTOR MANUEL LUNA PABELLO**

**2° SUPLENTE: Profesor: EDUARDO HERNANDEZ VAZQUEZ**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**MODESTO JAVIER CRUZ GÓMEZ**

**SUSTENTANTE:**

---

**EVELYN JANET ALTAMIRANO GEMINIANO**

## AGRADECIMIENTOS

En el proceso de escritura del presente trabajo, el apoyo, la motivación, la comprensión y el cariño de las personas que más quiero fue de vital importancia. Por ello, quisiera expresar toda mi gratitud.

En primer lugar, agradezco enormemente a mi familia. A mi mamá Judith Altamirano Geminiano, a mi hermana Catalina Jazmín Altamirano Rodríguez, a mi tío Juan Simón Altamirano Geminiano y a mi abuela Catalina Geminiano Jiménez. Querida familia, gracias por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, su amor, su sacrificio, sus valores y por la motivación constante que me ha permitido ser la persona que soy ahora. Cada uno de ustedes son mi ejemplo por seguir de constancia, dedicación y esfuerzo.

Durante mi estancia universitaria, tuve la oportunidad de conocer a excelentes profesores, quienes sembraron en mí la capacidad de identificar, analizar y evaluar nuestro entorno, algo de gran importancia en esta vida. Entre ellos, agradezco especialmente a mi asesor de tesis, el Dr. Modesto Javier Cruz Gómez, por la dedicación, las recomendaciones, los valiosos conocimientos transmitidos y el apoyo que me ha brindado durante mi servicio social, estancia académica y en el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, agradezco al jurado conformado por la M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara, el Q. Juan Gómez Dueñas y el Dr. Modesto Javier Cruz Gómez, por sus acertadas observaciones durante la revisión de la prueba escrita.

A mis amistades más cercanas, Agustín García, Ivana Lemus, Emma Dalia, Enrique Vargas, Ernesto Ramos, Erick Juárez, Ricardo Valdez y Sebastián Alvarado, gracias por ser mi segunda familia, su amistad es un tesoro.

A la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por la formación de excelencia en el ámbito académico, profesional y personal que recibí dentro de sus aulas. Finalmente, pero no menos importante, agradezco a todas las mujeres dedicadas a la ciencia, por inspirar a miles de niñas a tomar este camino tan bello de progreso y tecnología. Sin ustedes no estaría aquí.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de figuras .....	6
Índice de tablas .....	7
Lista de abreviaturas .....	8
<b>1. Introducción</b> .....	9
Planteamiento del problema .....	9
Objetivos .....	10
<i>Objetivo general</i> .....	10
<i>Objetivos particulares</i> .....	10
Hipótesis del trabajo .....	10
Metodología.....	11
<b>2. Desarrollo del tema</b> .....	12
2.1 Aspectos generales de las pinturas y recubrimientos .....	12
2.1.1 Definición de pintura y recubrimiento .....	12
2.1.2 Componentes de las pinturas y recubrimientos .....	12
2.1.3 Clasificación de las pinturas y recubrimientos.....	24
2.1.4 Sistema de capas en el proceso de aplicación .....	25
2.1.5 Importancia de las pinturas y recubrimientos .....	26
2.2 Compuestos orgánicos volátiles (COV) .....	33
2.2.1 Definición.....	33
2.2.2 Contaminación del medio ambiente por COV .....	34
2.2.3 Efectos del COV, ozono troposférico y smog fotoquímico.....	38
2.3 Tecnología sustentable .....	46
2.3.1 Concepto de tecnología sustentable .....	46
2.3.2 Greenwashing o lavado verde .....	47

2.3.3 Desarrollo sustentable o sostenible .....	47
2.4 La tecnología sustentable en la industria de pinturas y recubrimientos para superficies metálicas .....	48
2.4.1 Recubrimientos base agua .....	49
2.4.2 Recubrimientos con alto contenido de sólidos .....	55
2.4.3 Recubrimientos en polvo .....	62
2.4.4 Recubrimientos de curado UV .....	70
2.4.5 Otras tecnologías.....	78
<b>3. Discusión .....</b>	<b>85</b>
<b>4. Conclusiones .....</b>	<b>90</b>
<b>Referencias: .....</b>	<b>91</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Composición típica de las pinturas .....	13
Figura 2. Estructura química de la nitrocelulosa.....	14
Figura 3. Polimerización de anhídrido ftálico y un monoglicérido, para la obtención de una resina alquídica .....	15
Figura 4. Distintas formas de las moléculas de agentes filmógenos.....	16
Figura 5. Comportamiento de la luz sobre una superficie pintada .....	17
Figura 6. Promedio de uso de solventes en diferentes sectores .....	18
Figura 8. Aportación económica global a la industria de recubrimientos por sector .....	28
Figura 9. Infografía del año 2019 proporcionada por la ANAFAPYT .....	29
Figura 10. Panorama del crudo derramado.....	31
Figura 11. Vista de la rotura de la balsa .....	31
Figura 12. Calle afectada por las explosiones .....	32
Figura 13. Planta de Union Carbide en Bhopal tras el desastre .....	32
Figura 14. Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante, 2014.....	34
Figura 15. El cuerpo humano y las enfermedades causadas por los COV .....	39
Figura 16. Polimerización de la resina en pinturas base agua.....	51
Figura 17. Reducción relativa de solvente con la introducción de tecnologías de recubrimientos con altos sólidos y base agua .....	56
Figura 18. Distintos defectos en la película .....	59
Figura 19. Proceso de rociado electrostático .....	65
Figura 20. Método de lecho fluidificado .....	66
Figura 21. Esquema de ruptura de un fotoiniciador en dos radicales libres.....	71
Figura 22. Esquema de ruptura de un fotoiniciador tipo catiónico .....	73
Figura 23. Estímulos externos en recubrimientos inteligentes.....	83

## Índice de tablas

Tabla 1. Datos físicos y de seguridad de los solventes más importantes utilizados en diversos procesos industriales .....	20
Tabla 2. Desastres ocasionados por la corrosión.....	31
Tabla 3. Contenido permisible de COV para pinturas domésticas base disolvente, México .....	43
Tabla 4. Algunos límites en el contenido de COV para recubrimientos arquitectónicos, Estados Unidos .....	44
Tabla 5. Límites permisibles en el contenido de COV para pinturas y barnices, Unión Europea .....	45
Tabla 6. Principales solventes verdes sintetizados .....	80



## Lista de abreviaturas

**COV** Compuestos Orgánicos Volátiles.

**NO<sub>x</sub>** Óxidos de Nitrógeno.

**ANAFAPYT** Asociación Nacional de Fabricantes de Pinturas y Tintas, A.C.

**OEM** Original Equipment Manufacturer (Fabricantes de equipo original).

**FHWA** Federal Highway Administration (Administración Federal de Carreteras).

**NACE** National Association of Corrosion Engineers (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión).

**SEMARNAT** Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales

**IARC** International Agency for Research on Cáncer (Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer)

**EPA** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental=

**CENAPRED** Centro Nacional de Prevención de Desastres

**PM<sub>2.5</sub>** Partículas en suspensión con tamaño inferior o igual a 2.5 micras.

**PM<sub>10</sub>** Partículas en suspensión con tamaño mayor a 2.5 micras y menor o igual a 10 micras

**NH<sub>3</sub>** Amoniaco

**SO<sub>2</sub>** Dióxido de azufre

## 1. Introducción

### Planteamiento del problema

En México, la industria de pinturas y recubrimientos ha sido una parte importante del sector económico en los últimos años. En virtud de ello, en el año 2019, esta industria registró un valor de 3 mil 200 millones de dólares, equivalente a 73 mil 468 millones de pesos, siendo uno de los sectores más grandes del área química en el país. (Rodríguez, 2020).

Esta industria tiene un desempeño importante en el desarrollo y funcionalidad de diversos procesos en la sociedad, entre ellos: la infraestructura, el transporte, el empaquetado de comida, el manejo de equipos industriales y electrónicos; debido a que extienden el tiempo de vida de los productos, protegiéndolos de los efectos del ambiente y de agentes corrosivos, además de reducir su mantenimiento y brindar decoración.

Las pinturas contienen en su formulación cuatro componentes principales: aglutinante, pigmento, aditivos y solvente; siendo este último el que propicia la contaminación fotoquímica del aire, ya que puede contener compuestos orgánicos volátiles (COV).

Los compuestos orgánicos volátiles, junto con los óxidos de nitrógeno (NOx), al ser liberados a la atmósfera tienen efectos nocivos en el medio ambiente y en la salud, además de incrementar el ozono troposférico y el smog fotoquímico (Zhang et al., 2019). Debido a esto, se han impulsado regulaciones ambientales para la reducción de contenido COV en las pinturas.

La solución más generalizada que se ha dado para esta problemática ha sido la tecnología sustentable enfocada a las pinturas base agua, las cuales poseen un menor contenido de COV. En diversos tipos de pinturas se ha incorporado esta solución de manera eficiente y óptima, particularmente en el sector de pinturas arquitectónicas, donde han proporcionado una excelente adherencia, nivelación y rendimiento.

No obstante, ha resultado un verdadero reto en el sector de pinturas para superficies metálicas, lo que ha llevado a diversos líderes manufactureros a desarrollar nuevas tecnologías sustentables, que permitan obtener la misma calidad y acabado en los productos que les demanda el mercado.

A pesar de ello, las nuevas tecnologías no han sido del todo reconocidas por los consumidores de esta industria, ya que se sigue prefiriendo el uso de pinturas con disolventes.

## Objetivos

### *Objetivo general*

Presentar una visión actual acerca de las tecnologías sustentables, desarrolladas en torno a la disminución de COV en las formulaciones de pinturas para superficies metálicas, a partir de la investigación bibliográfica detallada de artículos de revistas especializadas, para promover su implementación en las empresas dedicadas a la manufactura de pinturas, así como en los consumidores.

### *Objetivos particulares*

- Explicar qué son los compuestos orgánicos volátiles, su relación con la industria de pinturas y recubrimientos; así como los efectos provocados en la salud y medio ambiente por las emisiones de estos compuestos.
- Comparar las ventajas y desventajas que presenta cada tecnología, con la finalidad de conocer qué opciones son las más viables a seguir desarrollando, en futuras investigaciones de innovación tecnológica.
- Comprender la relación entre la industria de pintura, las regulaciones del gobierno y los consumidores con respecto a la sustentabilidad, para generar posibles soluciones hacia la conciencia ambiental.

## Hipótesis del trabajo

Los recubrimientos sustentables para superficies metálicas, que se han manufacturado a partir de las nuevas tecnologías para reducir el COV en su formulación, son igual de efectivas que las pinturas a base de solvente orgánico.

La mala concepción de sustentabilidad entre los consumidores del mercado de pinturas y recubrimientos para metales ha causado el bajo desarrollo de nuevas tecnologías sustentables en torno a la disminución de COV.

## Metodología

A continuación, se detallan las diferentes actividades que se realizaron durante el desarrollo de la investigación:

1. Elección y justificación del tema.  
A partir de una lluvia de ideas se eligió el tema a desarrollar, evaluando las razones de elección y la problemática que se analizaría.
2. Delimitación geográfica y temporal del tema.
3. Elaboración del plan de trabajo.  
Se elaboró un diagrama de Gantt con las actividades que se planeaban realizar, con un tiempo previsto de entrega para revisión, de igual forma se establecieron horarios de trabajo para el cumplimiento de las actividades.
4. Bibliografía preliminar.  
Se realizó un registro de las principales fuentes de consulta en revistas especializadas de la industria en pinturas y recubrimientos tales como: *CoatingsTech*, *REC*, *INPRA LATINA* etc. De igual manera, se utilizaron bases de datos como: *ScienceDirect*, *Springer*, *Wiley Online Library*, *IOPscience* y *Scifinder*, donde se utilizaron palabras clave en la búsqueda de artículos científicos relacionados al tema.
5. Elaboración del índice de contenido.  
Se diseñó una estructura preliminar del contenido que tendría el trabajo monográfico, el cual contó con algunos cambios a lo largo de la investigación, añadiendo o descartando subtemas.
6. Planteamiento del problema, objetivos e hipótesis del trabajo.
7. Selección de la información:  
Se seleccionaron los artículos que tuvieran mayor relevancia en cuanto a tiempo de publicación, conclusiones e innovación.
8. Elaboración de la monografía.
9. Análisis de la información y elaboración de conclusiones.
10. Correcciones finales.

## 2. Desarrollo del tema

### 2.1 Aspectos generales de las pinturas y recubrimientos

#### 2.1.1 Definición de pintura y recubrimiento

El recubrimiento se puede definir como el proceso de cubrir la superficie de un objeto, el cuál es comúnmente llamado “sustrato”. Tiene como principal objetivo mejorar las propiedades superficiales de los sustratos, la adhesión, humectabilidad y resistencia a la corrosión. Por lo que, un material de revestimiento es cualquier material que sea capaz de cumplir con dicho propósito (Li & Yang, 2019). Las pinturas forman parte de esta categoría.

La pintura es un recubrimiento que puede estar en forma líquida o sólida, que cuando se aplica sobre una superficie, se adhiere y endurece; formando una capa que protege, decora o añade una característica específica en la superficie en la que se deposita (Gupta, 2018).

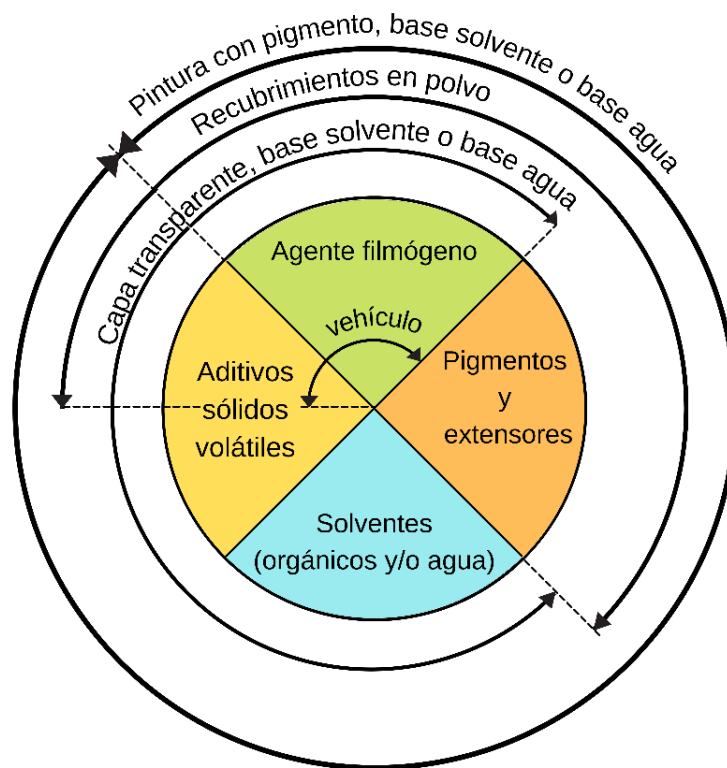
La selección de componentes usados para su manufactura afecta la estabilidad, duración, características de aplicación, manipulación, limpieza, eliminación y, lo más importante, el rendimiento del producto sobre el cuál se aplica (Talbert, 2008).

#### 2.1.2 Componentes de las pinturas y recubrimientos

De forma general, las pinturas contienen en su formulación los siguientes componentes:

- I. Resina (agente filmógeno).
- II. Pigmento.
- III. Disolvente.
- IV. Aditivos.

La proporción de cada componente dependerá del uso para el que se requiera (mantenimiento industrial, metales, automotriz, madera o arquitectónica); así como de la tecnología usada (base solvente, base agua, alto contenido en sólidos o pintura en polvo), tal como se ilustra en la figura 1.



**Figura 1. Composición típica de las pinturas (Imagen modificada de Goldschmidt & Streitberger, 2018).**

### *Resina*

La resina o también llamado aglutinante, es el componente filmógeno en la pintura, es decir, aquel que forma la película en la superficie donde se aplica. Debido a su función, se le conoce como el componente principal en la formulación.

Es el componente que debe estar siempre en la elaboración de recubrimientos, ya que, sin otras partes, la mayoría de los aglutinantes formarían una película brillante transparente. Otros componentes se pueden incluir de manera opcional, pero esto dependerá de las propiedades deseadas en la película a integrar (McKeen, 2016).

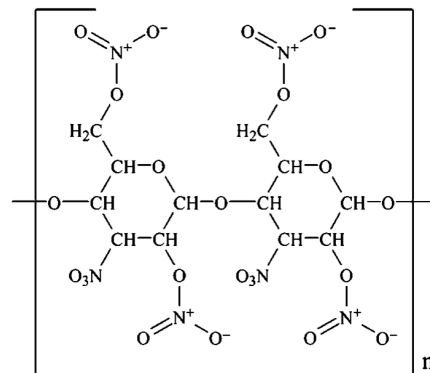
No obstante, es importante destacar que, las propiedades de recubrimiento óptimas solo se pueden obtener si el aglutinante puede humedecer el sustrato como una solución de resina, como una dispersión o como un recubrimiento en polvo fundido que pueda transformarse en una película lisa y visualmente atractiva (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

El componente filmógeno debe cumplir con numerosos criterios, relacionados fundamentalmente con la adherencia al sustrato y la capacidad de la película para que sus partículas permanezcan firmemente unidas entre sí (cohesión), manteniendo al mismo tiempo su elasticidad. Para cumplir tales requisitos, se utilizan materiales poliméricos macromoleculares, ya que su estructura molecular les permite cumplir varios de los requisitos mediante el enlace mecánico de las cadenas moleculares (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

### Clasificación

Los agentes filmógenos se pueden clasificar en dos grupos: por liberación de disolventes (secado físico), también llamados “aglutinantes no-convertibles”, o por aumento del peso molecular mediante reacción química, también llamados “aglutinantes convertibles”.

Los aglutinantes no-convertibles lo conforman aquellos compuestos totalmente polimerizados, los cuales se adhieren a la superficie a partir de la evaporación del disolvente en el cual están dispersos o emulsionados, por lo que no sufren de ningún cambio químico durante el proceso. Algunos ejemplos de ellos son la nitrocelulosa (figura 2), acetobutirato de celulosa, acrilatos y copolímeros de PVC (Bustillo Revuelta, 2021).

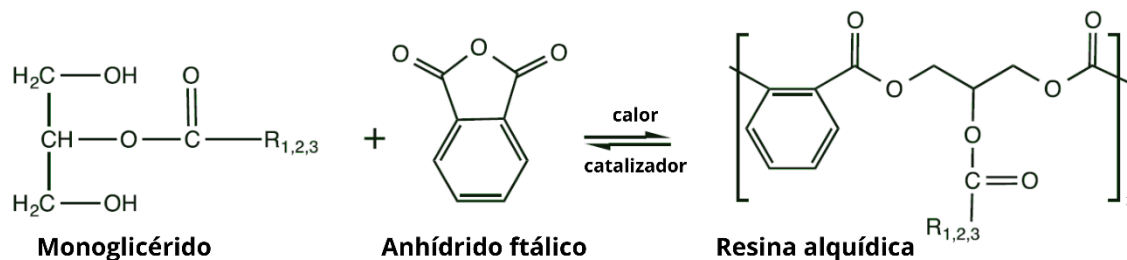


**Figura 2. Estructura química de la nitrocelulosa (McKeen, 2012).**

En cambio, los aglutinantes convertibles lo conforman compuestos que están o parcialmente polimerizados o no polimerizados en su totalidad, los cuales formarán una reacción después de la aplicación, esta reacción es conocida como

“reticulación” o de “entrecruzamiento (*crosslinking*)”, que forma una red de enlaces covalentes y puede iniciarse ya sea por calor o por un catalizador (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

Algunos ejemplos de los aglutinantes convertibles son resinas alquídicas (síntesis mostrada en la figura 3), resinas epóxicas, resinas acrílicas y resinas fenólicas (Bustillo Revuelta, 2021).



**Figura 3. Polimerización de anhídrido ftálico y un monoglicérido, para la obtención de una resina alquídica (Imagen modificada de Soucek & Salata, 2015).**

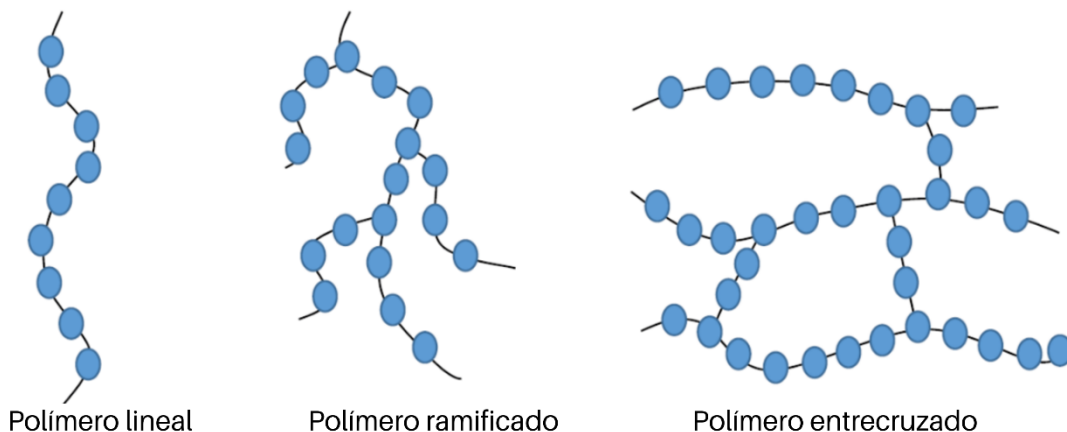
Usualmente, las formulaciones de recubrimientos con resinas convertibles permiten el uso de compuestos de bajo peso molecular, ya que son reactivos (tal como se ve en la figura 3), mientras que, las formulaciones con resinas de secado físico son de alto peso molecular, debido a que están polimerizadas desde el inicio de la elaboración del recubrimiento. En consecuencia, la cantidad de solventes necesarios utilizando aglutinantes convertibles puede reducirse significativamente, lo que contribuye a reducir las emisiones de solventes al aire, en comparación con los aglutinantes no-convertibles.

¿Qué influye en la elección de un aglutinante?

Las variadas formas y tamaños de las moléculas de los agentes filmógenos, determinan las propiedades del aglutinante y la aplicación para la que se pueden utilizar. Por ejemplo, los polímeros en forma de árbol (con gran ramificación), permiten una funcionalidad mucho más alta en comparación con los polímeros lineales o menos ramificados, proporcionando condiciones necesarias para una alta densidad de reticulación, lo que permite obtener propiedades de superficies altamente funcionales como resistencia a la corrosión, al rayado, repele al agua,



resistencia química (la capacidad de resistir procesos de deterioro) y protección en contra de los rayos UV (Goldschmidt & Streitberger, 2018). Algunos ejemplos de formas de agentes filmógenos se ilustran en la figura 4.



**Figura 4. Distintas formas de las moléculas de agentes filmógenos (Imagen modificada de Shrivastava, 2018).**

Por tanto, al elegir resinas para un revestimiento o pintura, el peso molecular y la distribución del peso molecular son indicadores importantes del tamaño de la molécula. Universalmente, grandes pesos moleculares están asociados con propiedades físicas superiores (Shrivastava, 2018).

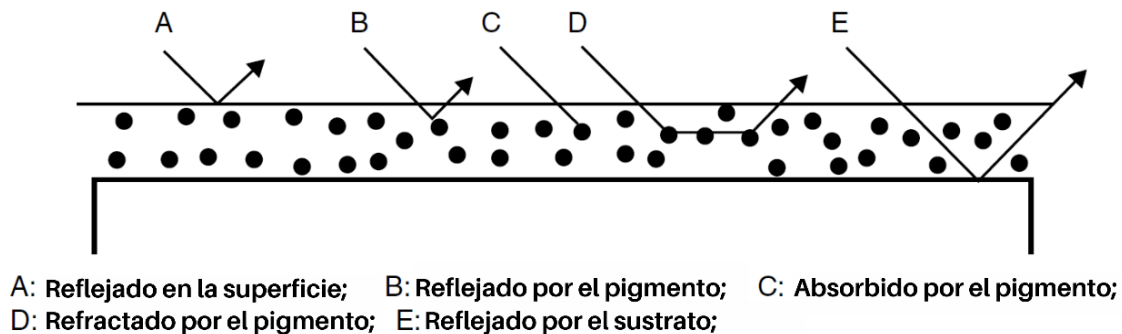
Los químicos de polímeros han desarrollado numerosos métodos para determinar estos indicadores, entre ellos se encuentran la viscosidad de la solución de resina (viscosimetría), la capacidad de difusión y la presión osmótica (osmometría) que se produce cuando se emplean membranas semipermeables, estos actúan como indicadores de los pesos moleculares (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

No obstante, existen otros métodos que implican la separación cromatográfica de las moléculas de resina de forma individual, que a veces varían considerablemente en tamaño, por lo que son más actualizados e informativos. Por lo tanto, la distribución del peso molecular es particularmente importante, ya que las propiedades aplicadas no pueden especificarse simplemente mediante el peso molecular promedio (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

## Pigmento

El pigmento es un sólido disperso en la pintura que tiene como principal propósito mejorar el comportamiento óptico: color, opacidad y brillo (De With, 2018). Generalmente son insolubles, física y químicamente no afectados por la mezcla en la que están incorporados. Alteran la apariencia de la superficie por absorción selectiva y/o dispersión de luz (Gürses et al., 2016).

Una de las propiedades más importantes en las pinturas es el “poder cubriente” (hiding power), que es la capacidad de una pintura para cubrir las diferencias de color de una superficie. Como se ha mencionado con anterioridad, la mayoría de los aglutinantes son transparentes, por lo que el trabajo de esconder el sustrato recae en los pigmentos que se utilizan. El pigmento contribuye al poder cubriente de tres maneras: con reflexión, refracción o absorción de la luz que entra en la película de pintura, a la vez evitando la degradación tanto del sustrato como de la película (Bustillo Revuelta, 2021). La figura 5 muestra la reflexión, refracción, y absorción por una película de pintura.



**Figura 5. Comportamiento de la luz sobre una superficie pintada (Modificada de Talbert, 2008).**

Los pigmentos se pueden clasificar en:

- Inorgánicos. En color se distinguen entre pigmentos blancos y pigmentos con color. Dentro de los pigmentos blancos se utilizan típicamente óxidos como dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) o sulfuros como sulfuro de zinc ( $\text{ZnS}$ ). Para pigmentos con color se emplean a menudo negro de humo o

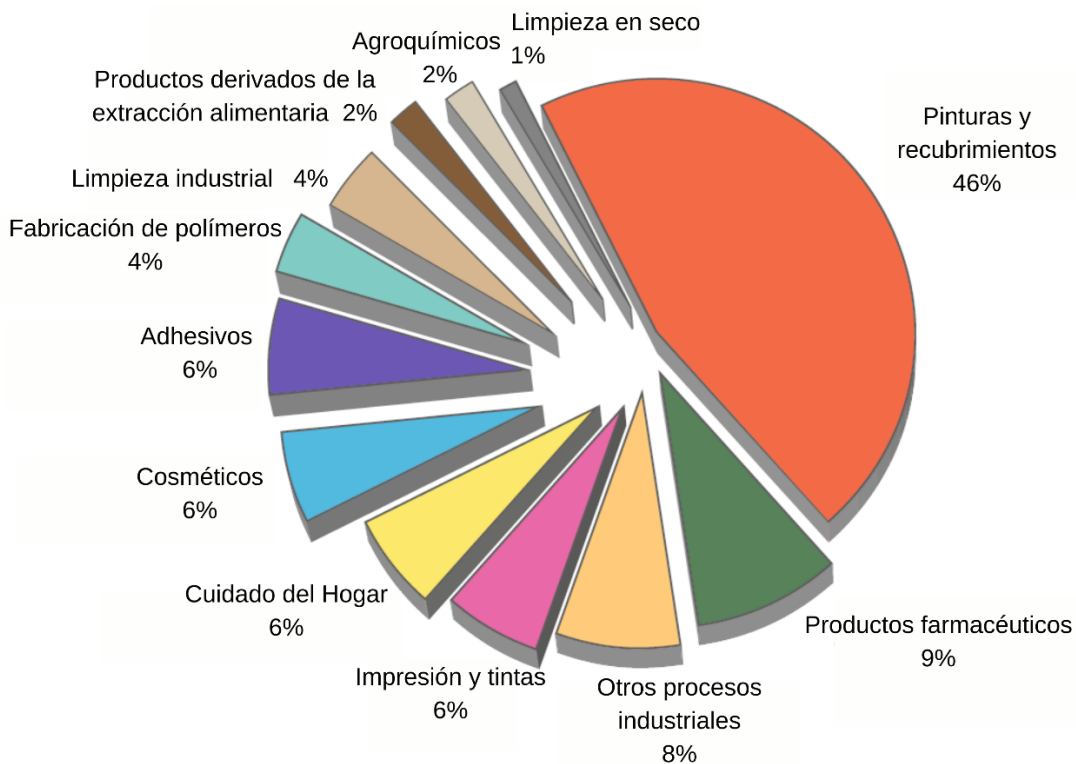
negro de hollín. óxidos mixtos como óxido de hierro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y escamas metálicas (De With, 2018).

- Orgánicos. En esta categoría se encuentran la mayoría de pigmentos con color, donde los compuestos azoderivados son los que más destacan, además de las ftalocianinas (De With, 2018).

Se tiene como estándar ideal, que los pigmentos sean de baja absorción de aceite, para facilitar la dispersión y permitir la máxima carga de pigmento, esto también ayuda a reducir el contenido de disolvente en la pintura. Además, los pigmentos deben ser químicamente inertes, térmicamente estables, puros en su composición y no tóxicos (Webster & Ryntz, 2017).

### *Solvente*

Los solventes son utilizados en una gran variedad de procesos industriales, no obstante, la industria de la pintura y recubrimientos es la que mayor consumo presenta, tal y como se muestra en la figura 6.



**Figura 6. Promedio de uso de solventes en diferentes sectores (Imagen modificada de Calvo-Flores et al., 2018).**

El objetivo principal de los solventes es su uso en la producción y aplicación de la pintura (De With, 2018). Los disolventes transportan las dispersiones de resinas y se utilizan simultáneamente para reducir la viscosidad, facilitar la aplicación y ayudar a controlar la formación de la película. El rango de los productos químicos que pueden actuar como disolventes es bastante amplio. La base de las dispersiones acuosas es el agua, mientras que, los disolventes orgánicos se utilizan en dispersiones no acuosas (Harris & Casey, 2016).




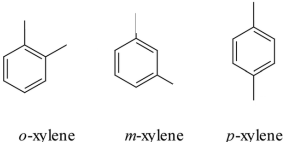
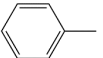
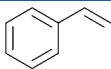

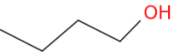
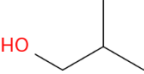
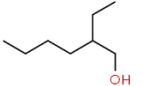
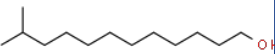
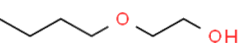
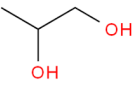
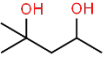
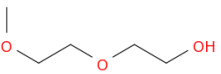
Además, juegan un papel importante en la solubilidad del aglutinante, la dispersabilidad general y la estabilidad de todos los componentes a lo largo de la preparación de la formulación y también durante el almacenamiento (De With, 2018). Se conoce que, para que un solvente cumpla su función, es necesario que tenga características químicas similares a los componentes que se desean disolver.

Los solventes se pueden clasificar en 4 categorías principalmente:

- Disolventes verdaderos. Son aquellas sustancias que disuelven eficazmente una determinada resina, con miscibilidad total para cualquier proporción (Simões, 2015).
- Disolventes auxiliares. Son sustancias que no pueden disolver la resina por sí solas, pero que permiten la disolución al agregar un solvente verdadero (Simões, 2015).
- Diluentes. Aquellos compuestos orgánicos que no disuelven la resina, pero ayudan a controlar las propiedades de la mezcla líquida y a controlar la velocidad de evaporación, además de aumentar el volumen de la mezcla a un precio bajo (Simões, 2015).
- Diluyentes. Son líquidos que se añaden a la formulación con el objetivo de disminuir la viscosidad (Simões, 2015).

En tabla 1 se muestran indicadores importantes del rendimiento físico (masa molar, punto de ebullición y número de evaporación) de los disolventes más importantes utilizados en la industria. Adicionalmente, por razones de seguridad en el uso de estos componentes, otros valores como el punto de inflamabilidad, también deben de considerarse (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

**Tabla 1. Datos físicos y de seguridad de los solventes más importantes utilizados en diversos procesos industriales (Goldschmidt & Streitberger, 2018).**

Solvente	Estructura molecular	Masa molar (g/mol)	Punto de ebullición/región (°C)	Número de evaporación	Temperatura de inflamabilidad (°C)
Hexano		86.2	65-70	1.4	-22
Solvesso 100	No aplica	123	155-181	40-45	41
Solvesso 150	No aplica	135	178-209	120	62
Nafta disolvente	No aplica	123	150-195	40-45	41
Benceno		131	135-175	25-30	-22
Ciclohexano		84.2	80.5-81.5	3.5	-17
Xileno	 <i>o-xylene</i> <i>m-xylene</i> <i>p-xylene</i>	106.2	137-142	17	25
Tolueno		92.1	110-111	6.1	6
Estireno		104.2	145	16	31
Propanol		60.1	97.2	16	23
Butanol		74.1	117.7	33	34
Isobutanol		74.1	107.7	25	28
Etilhexanol		130.2	183.5-185	600	76
Isotridecanol		200.2	242-262	>2000	115
Butilglicol		118.2	167-173	163	67
Propilenglicol		104.2	150.5	75	51
Hexilenglicol		146.2	208	1200	91
Metildiglicol		120.2	194.2	576	90

Solvente	Estructura molecular	Masa molar (g/mol)	Punto de ebullición/región (°C)	Número de evaporación	Temperatura de inflamabilidad (°C)
Butildiglicol		162.2	224-234	>1200	98
Metoxipropanol		90.1	122.8	25	38
Etoxipropanol		104.1	132	33	40
Butilacetato		116.1	123-127	11	25
Etil 3-etoxipropionato		146.2	170	96	59
Etilacetato		88.1	76-78	2.9	-4
Isobutilacetato		116.2	114-118	8	19
Etoxipropilacetato		146.2	158		54
Metoxipropilacetato		132.2	143-149	33	45
Pentilacetato		130.2	146	14	23
Butilglicolacetato		160.2	190-198	250	75
Metilisobutilcetona		100.2	115.9	7	14
Acetona		58.1	56.2	2	-19
Ciclohexanona		98.2	155	40	44
Metiletilcetona		72.1	79.6	2.6	-14
Metilnamilcetona		114.2	150.5	25	49
Metilisoamilcetona		114.2	141-148	55	41
Isoforona		138.2	215	230	96
Agua		18	100		-
Propilencarbonato		102.2	242	>1000	123

Nota. (Imágenes obtenidas de ChemEssen, 2019; Royal Society of Chemistry, 2021).

En realidad, no existe una correlación real entre los puntos de ebullición y el tiempo de evaporación de la película de pintura a medida que se forma. Por lo anterior, el tiempo de evaporación de un disolvente se expresa numéricamente en “números de evaporación (NE)” que se obtienen de la comparación del éter dietílico (NE= 1), los cuales se clasifican en grupos de alta volatilidad (NE < 10), volatilidad media (NE entre 10 y 35) y baja volatilidad (NE > 35) (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

Si los aglutinantes se disuelven en el solvente, la velocidad de evaporación se reduce debido a la interacción de las moléculas entre el aglutinante y disolvente. Este efecto es más pronunciado cuanto mejor es la solubilidad del polímero en el disolvente correspondiente. Sin embargo, las condiciones reales son más complicadas, ya que las pinturas siempre contienen combinaciones de disolventes cuyas propiedades de solubilidad y evaporación deben coordinarse entre sí (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

Normalmente, se usa la combinación de varios solventes para coordinar la interacción con las moléculas de resina y la velocidad de evaporación asociada durante la formación de la película: las moléculas de resina adoptan diversas conformaciones en espiral y las cadenas macromoleculares se entrelazan en mayor o menor medida durante el endurecimiento de la película, lo que provoca un efecto en la resistencia mecánica (Goldschmidt & Streitberger, 2018). Por otro lado, la velocidad de evaporación del solvente controla la cantidad de solvente restante, la viscosidad y la tensión superficial (De With, 2018). En consecuencia, la elección de disolventes para un sistema de recubrimientos está limitada por estos dos aspectos y también por el método de aplicación (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

Tradicionalmente, la industria de la pintura utiliza una gran variedad de disolventes, como hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, alcoholes, ésteres, acetonas y glicoles. En las últimas tres décadas, por motivos ambientales se han impuesto límites estrictos en cuando al uso de COV, que ha llevado a cambios drásticos en las formulaciones de pinturas, para disminuir su uso (Simões, 2015). Esto se retomará con más profundidad en el capítulo 2.2.

## *Aditivos*

Los aditivos son sustancias que se añaden en pequeñas cantidades a una pintura o material de recubrimiento para mejorar o modificar ciertas propiedades del revestimiento durante su manufactura, almacenamiento, transporte o aplicación. La cantidad de aditivos que se añaden en promedio son el 1.5% de la formulación total (De With, 2018). Comprenden un pequeño porcentaje en formulaciones de recubrimientos, tintas, adhesivos y pinturas, pero su impacto es significativo (Höfer, 2012).

Los aditivos tienen como ventaja que facilitan la dispersión de los pigmentos durante la producción, es decir, suprimen la tendencia de que los pigmentos se asienten. Además, mejoran la fluidez donde se aplica la pintura y fomentan la nivelación durante la formación de la película (Goldschmidt & Streitberger, 2018).

Los aditivos se pueden etiquetar según su función, se distinguen como:

### Espesantes.

Se agregan para resolver problemas de carácter reológico, esto es, para optimizar el comportamiento del flujo de la pintura para un sistema en particular; ajustando la viscosidad para el almacenamiento, procesamiento y aplicación (De With, 2018).

### Agentes tensoactivos.

Las pinturas y recubrimientos tienen por sí mismo una superficie, la cual contiene interfaces con partículas de pigmento. Los problemas que resuelven son la mejora de propiedades de humectación o esparcimiento del líquido en un sistema donde se reduce la tensión superficial y enriquece la solución con interfaces (De With, 2018).

### Modificadores de superficies.

Dado que a menudo un revestimiento también tiene una función estética, la superficie es importante desde esta perspectiva. Dentro de esta categoría se encuentran los agentes matizadores, niveladores y coalescentes (De With, 2018).



- ✚ Aditivos catalíticamente activos.

Se aplican no solo para acelerar las reacciones químicas involucradas, como la reticulación, sino también para mejorar otras reacciones químicas que tienen lugar durante la formación de la película (De With, 2018).

- ✚ Aditivos de efectos especiales.

Esta categoría comprende agentes antipiel, estabilizadores de luz, inhibidores de corrosión, biocidas, retardadores de llama y fotoiniciadores (De With, 2018).

La selección del aditivo a utilizar depende del sustrato y rendimiento deseado, ya que, son a menudo multifuncionales, por lo que pueden influir tanto en el acabado que se tendrá en la superficie, así como en las propiedades de la pintura (Bustillo Revuelta, 2021).

De igual forma, su uso requiere un equilibrio adecuado de interacciones con los demás componentes, es decir, los pigmentos vía absorción, aglutinantes vía asociación y solventes vía solubilización (De With, 2018).

En la situación actual de grave contaminación ambiental, la dirección de desarrollo de aditivos se ha enfocado en poder mejorar las propiedades de las formulaciones realizadas a partir de las nuevas tecnologías, por ejemplo, en la disminución de la tendencia a corrosión de las pinturas en equipos industriales.

### 2.1.3 Clasificación de las pinturas y recubrimientos

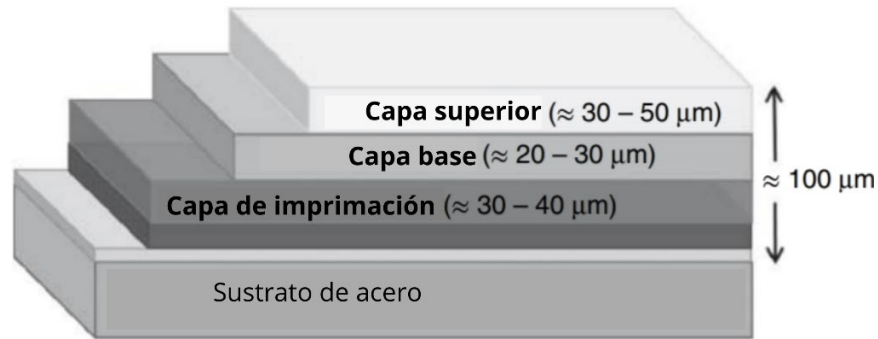
La tecnología de la industria de pinturas y recubrimientos está en constante evolución: cada año surgen nuevos productos que amplían el catálogo de soluciones que ofrecen, por ello, las pinturas se pueden categorizar de diferentes formas. Las clasificaciones que más se utilizan son las que dependen del aglutinante empleado, tipo de tecnología usada y del sector al cual está dirigido.

Para el presente proyecto, se utilizará la clasificación por tipo de tecnología usada:

- ❖ Recubrimientos base solvente.  
Contienen hasta un 80% de componentes sólidos dispersos en el disolvente orgánico. Son de secado rápido y pueden contener una amplia gama de aglutinantes (Kopeliovich, 2014).
- ❖ Recubrimientos base agua.  
No son tóxicas ni combustibles, pero se caracterizan por tener un tiempo de secado más prolongado que el de las pinturas base solvente. Suele utilizarse con aglutinantes poliméricos de bajo peso molecular (Kopeliovich, 2014).
- ❖ Recubrimientos con alto contenido en sólidos.  
Son consideradas las pinturas con bajo contenido de solventes, ya que contienen más del 80% de componentes sólidos dispersos en solventes orgánicos (Kopeliovich, 2014).
- ❖ Recubrimientos en polvo.  
Son obtenidas a partir de resinas en polvo, cuyas partículas son atraídas por la fuerza electrostática a la superficie del sustrato, este fenómeno es llamado “electrodeposición”. Además, no involucra disolventes en el proceso (Kopeliovich, 2014).
- ❖ Recubrimientos curables por radiación.  
Se forman a partir de una mezcla de monómeros y aditivos que se curan bajo radiación ultravioleta. Los recubrimientos curables por radiación se endurecen rápidamente y, al igual que las pinturas en polvo, no contienen disolventes (Kopeliovich, 2014).

#### 2.1.4 Sistema de capas en el proceso de aplicación

Para que el recubrimiento cumpla con todos los requisitos de protección para el sustrato, a menudo se necesitan varias capas de aplicación, así como se muestra en la figura 7.



**Figura 7. Diseño típico de un sistema de recubrimiento para el acero (Imagen modificada de De With, 2018).**

La primera capa se llama imprimación, la cual se encarga de sellar el sustrato del medio ambiente y combatir la corrosión, proporcionando al mismo tiempo una buena adherencia a los recubrimientos aplicados sobre la superficie imprimada (De With, 2018; Talbert, 2008).

Las capas intermedias son llamadas capas base y son aquellas que proporcionan alguna función en especial y sirven como preparación del sustrato para la capa superior o de acabado, que es la última capa aplicada que proporciona cierta funcionalidad, aspectos estéticos y mejora el rendimiento (De With, 2018).

#### 2.1.5 Importancia de las pinturas y recubrimientos

La función de la tecnología de recubrimientos es el proveer protección y decoración a superficies. La protección que ofrecen las pinturas, selladores y otros recubrimientos conserva y prolonga la vida útil de hogares, edificios, transporte, todo tipo de vehículos (como automóviles, camiones, trenes y barcos), equipos industriales y otras infraestructuras (Cunningham et al., 2019).

En realidad, cada proceso de fabricación que da como resultado la producción de un producto “no-líquido”, incluye un proceso para recubrir el producto terminado, haciendo que la industria de recubrimientos sea una parte integral y un socio de la industria manufacturera (American Coatings Association, 2020).

Los recubrimientos tienen como principal ventaja que se requiere una cantidad pequeña de material, con capas delgadas de unas pocas decenas a cientos de

micrómetros, para darle funcionalidad a todo un sustrato con poco o ningún impacto en otras propiedades, como la cohesión y, por lo tanto, los recubrimientos funcionales también contribuyen a la economía y la sostenibilidad de los materiales y dispositivos (De With, 2018).

El hecho de que existan muy pocos objetos que no requieran revestimiento es un indicador de la enorme importancia de esta industria (Goldschmidt & Streitberger, 2018). A nivel global, se estima que el tamaño de la industria de pinturas y recubrimientos alcanzó en 2019, un valor de 155 billones de dólares (Orr & Boss Consulting Incorporated, 2020).

Mientras que, en México, esta industria se valoró en 3.2 billones de dólares en el año 2019, contando con el 7.4% del PIB de la industria química y con una producción de 1,236 millones de litros de pintura, siendo uno de los más grandes del área química del país (Rodríguez, 2020; Toledo, 2020). Lo anterior puede dar un contexto más completo acerca del gran valor y aportación que le dan a la economía.

Sin recubrimientos, muchas industrias tendrían grandes dificultades, por ejemplo, los salvavidas y material médico como los monitores de signos vitales, tienen varias piezas y componentes que deben revestirse para protegerlos y garantizar que funcionen según lo diseñado. Cada una de estas piezas se fabrican en diferentes sitios, por diferentes proveedores de piezas. Cada uno de los proveedores compran las pinturas y recubrimientos de múltiples fuentes, por lo que, es necesario que tengan diversas opciones para elegir al proveedor que disponga del recubrimiento necesario lo antes posible (American Coatings Association, 2020).

De igual forma, han tomado aún más importancia debido al equipo médico necesario para la primera línea de respuesta contra la COVID-19 (American Coatings Association, 2020).

#### *Importancia de las pinturas en superficies metálicas.*

En la figura 8, se muestra un panorama de la industria global de pinturas y recubrimientos por sector (figura 8).

## Industria global de recubrimientos, 2019 \$155 Billones de dólares



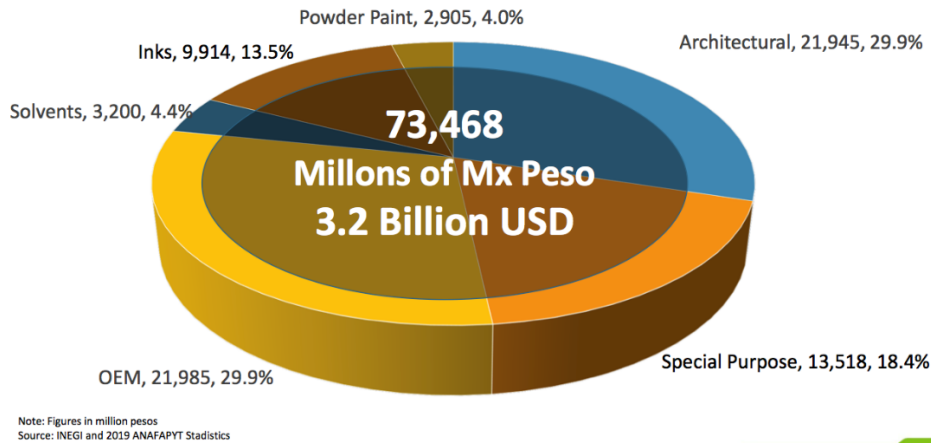
**Figura 8. Aportación económica global a la industria de recubrimientos por sector (Imagen modificada de Orr & Boss Consulting Incorporated, 2020).**

Como se puede observar en la figura 8, además de los recubrimientos para decoración, los recubrimientos usados para autos e industria en general, así como para su mantenimiento y protección son de los principales sectores de manufactura.

En una gran parte de estos sectores, como lo son la construcción de dispositivos industriales y construcción de instalaciones, el material principal que se utiliza son piezas de metal.

En México, el sector de manufacturas originales (OEM) ocupa un 29.9% de la distribución total del mercado de pinturas, mientras que los solventes puros un 4.4%, tal y como se muestra en la figura 9. Por lo que, las pinturas y recubrimientos para superficies metálicas tienen un gran impacto en la industria del país.

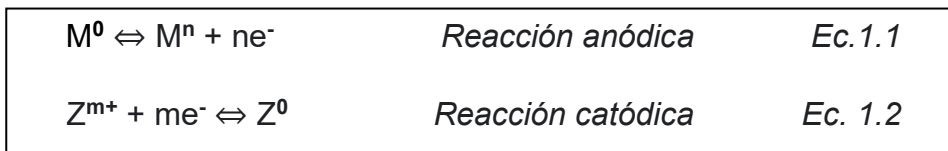
Además, los recubrimientos a base de disolvente orgánicos están fuertemente dirigidos al sector de manufacturas originales, mientras que, los recubrimientos base acuosa son dirigidos mayoritariamente al sector arquitectónico (Restrepo, 2021; Rojas, 2018).



**Figura 9. Infografía del año 2019 proporcionada por la ANAFAPYT (Toledo, 2020).**

En el ámbito de funcionalidad, la importancia de la industria de la pintura en superficies metálicas es evitar la corrosión, que es la degradación de un material por una reacción electroquímica con su entorno.

De manera general, este fenómeno sucede cuando de manera simultánea ocurren los procesos de oxidación del metal (reacción anódica, ecuación 1.1) y de reducción de la especie oxidante (reacción catódica, ecuación 1.2), como puede ser el oxígeno disuelto en el agua, los iones provenientes de las sales disueltas en el agua, entre otros (Perez Seleni, 2019).



La corrosión causa una degradación severa en la propiedad integral y la funcionalidad del material metálico.

Si no se detecta y repara a tiempo, la propagación de la corrosión puede resultar finalmente en fallas catastróficas de la estructura, con graves consecuencias económicas, ambientales y de seguridad para las personas que trabajan dentro de los arreglos metálicos (L. Ma et al., 2021).

Dentro del ámbito económico, existen diversos estudios que han evaluado las pérdidas millonarias que se tienen por la corrosión. Entre ellos, destacan dos.


El primero, es el estudio realizado por la FHWA (Federal Highway Administration) y NACE (National Association of Corrosion Engineers) entre 1999 y 2001, el cual reveló que, en Estados Unidos los costos directos totales por corrosión ascienden a 276,000 millones de dólares, equivalente a 3.1% de su PIB. (De la Cruz Pérez, 2019).

Estas cifras han sido utilizadas por países de Latinoamérica para alarmar y generar conciencia en las personas sobre este fenómeno (De la Cruz Pérez, 2019). Teniendo en cuenta que el PIB de México en el año 2019, fue de 1,269,000 millones de dólares, se puede hablar de una pérdida por corrosión de aproximadamente 393 billones de dólares.



El segundo es un estudio más reciente llamado "IMPACT" y realizado por NACE en 2016, el cual dio a conocer que el costo mundial de la corrosión se estima en 2,505 mil millones de dólares. Además, el estudio informa que entre un 15% y 35% del costo de corrosión se podría ahorrar mediante el uso de las actuales prácticas de control de corrosión disponibles, como lo son el uso de recubrimientos y pinturas (De la Cruz Pérez, 2019).

En cuanto al impacto ambiental y de seguridad, se muestra a continuación la tabla 2, con algunos de los accidentes y catástrofes más importantes en este ámbito.

**Tabla 2. Desastres ocasionados por la corrosión.**

Desastre	Descripción
<p data-bbox="237 338 797 415"><i>Derrame de petróleo en Santa Bárbara, California (2015).</i></p>  <p data-bbox="237 932 797 1010">Figura 10. Panorama del crudo derramado (Excelsior, 2015).</p>	<p data-bbox="824 338 1385 730">Se generó una descarga de 540 m<sup>3</sup> de crudo en una de las costas con mayor diversidad biológica de Estados Unidos. A partir de investigaciones, se conoció que el cuadrante inferior de la tubería redujo su espesor en un 45% debido a la corrosión, la cual propagó grietas (Petrovic, 2016). En la figura 10 se puede observar la gran cantidad de crudo derramado.</p>
<p data-bbox="237 1121 797 1199"><i>Rotura de una balsa de residuos mineros de Aznalcóllar, España (1998).</i></p>  <p data-bbox="237 1688 797 1766">Figura 11. Vista de la rotura del dique perimetral (Morillo, 2018).</p>	<p data-bbox="824 1121 1385 1654">Se produjo una rotura en el dique perimetral en su borde suroeste. En consecuencia, se vertieron lodos tóxicos, aguas ácidas y fluidos con altas concentraciones de metales pesados sobre las riberas de los ríos Agrio y Guadiamar, llegando hasta las puertas del Parque Nacional de Doñana; un espacio protegido clave para la migración de aves entre Europa y Asia. Es considerada uno de los mayores desastres medioambientales de Europa (Ayala-Carcedo, 2004; Rodríguez Santos, 2017). En la figura 11 se muestra la rotura de la balsa.</p>



Desastre	Descripción
<p data-bbox="237 285 797 359"><i>Derrame de gasolina en Guadalajara, México (1992).</i></p>  <p data-bbox="237 854 797 928">Figura 12. Calle afectada por las explosiones (CENAPRED, 2020).</p>	<p data-bbox="820 285 1386 632">Ocurrieron numerosas explosiones de gasolina en el sistema de alcantarillado, además de incendios, los cuales destruyeron 12 km de calles (Figura 12). Se estima que este suceso tomó la vida de al menos 200 personas, además de miles de afectados que perdieron sus viviendas y pérdidas económicas millonarias (Petrovic, 2016).</p>
<p data-bbox="237 1041 643 1073"><i>Desastre de Bhopal, India (1984).</i></p>  <p data-bbox="237 1587 797 1661">Figura 13. Planta de Union Carbide en Bhopal tras el desastre (Fraga López et al., 2006).</p>	<p data-bbox="820 1041 1386 1115">Es considerado uno de los peores desastres industriales a nivel mundial.</p> <p data-bbox="820 1129 1386 1797">Se produjo una fuga de isocianato de metilo (MIC) en una fábrica de plaguicidas, dejando más de 2000 muertos y medio millón de personas expuestas al gas. Durante una tarea de limpieza y mantenimiento, entró agua a uno de los tanques de almacenamiento, lo que provocó una reacción exotérmica y la liberación a la atmósfera del gas. Entre los factores que causaron el desastre se encuentran el haber parado los sistemas de protección sin haber vaciado los tanques con MIC, así como la falta de mantenimiento a los equipos y tuberías desgastados por corrosión (Petrovic, 2016; Rajkumar, 2017). La figura 13 muestra la planta abandonada.</p>

## 2.2 Compuestos orgánicos volátiles (COV)

### 2.2.1 Definición

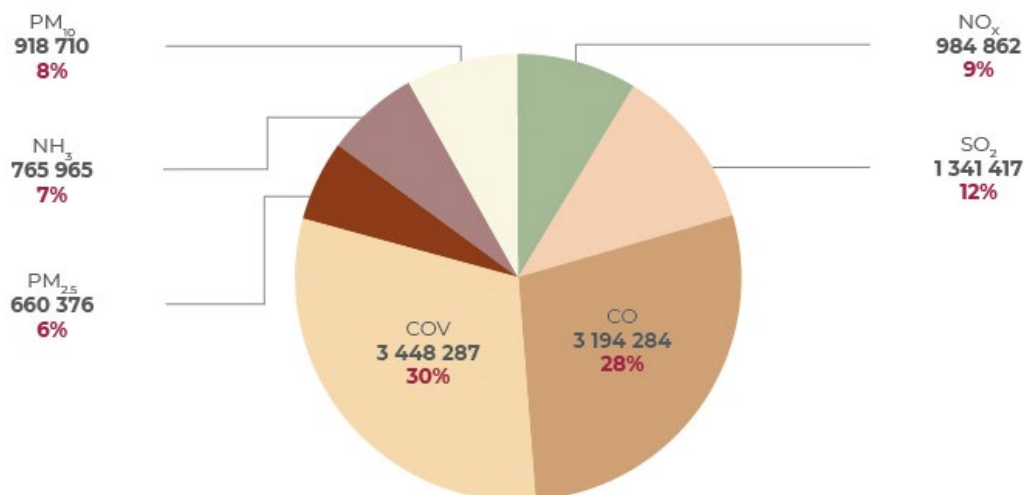
Bajo un esquema ambiental, los compuestos orgánicos volátiles se definen como compuestos que tienen uno o más átomos de carbono en su estructura molecular (excluyendo monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carburos o carbonatos metálicos y carbonato de amonio), que liberan vapores bajo condiciones normales de presión y temperatura, es decir, a 25°C y 1 atm, los cuales participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas (EPA, 2017; Palomo Briones et al., 2016).

Los COV son clasificados dependiendo de su estructura molecular o grupo funcional, ya que forman parte de una larga familia química. Entre ellos están principalmente los hidrocarburos lineales (saturados o no) como heptano (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>), hexano (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>), pentano (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) y alcoholes minerales; hidrocarburos aromáticos monocíclicos o policíclicos como el benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), tolueno (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>) o xileno (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>); COV oxigenados como aldehídos, alcoholes, cetonas o ésteres y los COV clorados como tetracloroetileno (C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>), tricloroetileno (C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>) y diclorometano (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) (Anand et al., 2014).

De igual manera, se pueden clasificar a partir de su origen, que puede ser tanto biogénico (de forma natural) como antropogénico (resultado de actividades humanas).

El uso extendido de estos compuestos ha provocado su diseminación por el medio ambiente, es muy probable que todos hayamos sido expuestos a los COV aunque sea en cantidades mínimas, debido a que, al ser solventes, se utilizan ampliamente en pinturas, barnices, ceras, productos de limpieza, cosméticos, productos desinfectantes, aerosoles, repelentes, adhesivos, productos para autos, entre otros (Anand et al., 2014).

En México, la información sobre la mezcla de COV en el aire es escasa, de hecho, los sitios más estudiados en el país son las grandes ciudades como Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara (Montero Montoya et al., 2018).



**Figura 14. Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante, 2014 (SEMARNAT, 2018).**

El último reporte sobre contaminación ambiental a nivel nacional es del año 2014, con actualizaciones en 2018. En ese reporte, se indica que los contaminantes emitidos por fuentes antropogénicas en mayor proporción fueron los COV, lo que se puede observar en la figura 14.

### 2.2.2 Contaminación del medio ambiente por COV

Los COV están considerados como uno de los mayores contaminantes presentes en el aire a nivel del suelo. Son contaminantes primarios, debido a que son emitidos de una fuente directa y suelen ser muy reactivos, por lo que, en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar, la oxidación de los COV conduce a la formación de diversos foto-oxidantes (Koppmann, 2020; Salimifard & Reynoso, 2019).

El representante más importante de los foto-oxidantes es el ozono troposférico, ya que provoca efectos tanto en la salud humana como en cultivos y vegetación. De igual forma, el ozono troposférico forma parte de una mezcla de contaminantes llamada smog fotoquímico, lo que afecta la calidad del aire en ciudades con gran densidad de población (Koppmann, 2020).

Cabe destacar que la contaminación por COV no sólo se da a partir del uso de productos que contengan estos componentes, sino también durante la etapa de producción, procesamiento, almacenamiento y transporte.

## Ozono y los COV

El ozono ( $O_3$ ) es una molécula triatómica formada por átomos de oxígeno, es un alótropo del oxígeno mucho más reactivo que el oxígeno diatómico ( $O_2$ ), lo que lo hace un poderoso oxidante que reacciona rápidamente con otros compuestos químicos, inestable cuando se encuentra en altas concentraciones. Bajo condiciones atmosféricas normales, el ozono decae a oxígeno diatómico en un lapso de aproximadamente 30 minutos (Batakliiev et al., 2014; Feal Veira, 2020).

El ozono está presente tanto en la tropósfera, que es la capa de la atmósfera que está en contacto con la superficie de la Tierra, como en la estratósfera, la cual se encuentra por encima de la troposfera. Dependiendo de la altitud en donde se encuentre este gas, tendrá un desempeño diferente.

### Ozono estratosférico

La mayor parte del ozono se encuentra en una región de la estratósfera a más de 20 km de la superficie, llamada ozonósfera o capa de ozono. El ozono estratosférico es llamado “ozono bueno”, ya que juega un papel vital en absorber y limitar el ingreso de radiación ultravioleta de onda media (UV-B) proveniente del Sol, evitando enfermedades como melanomas, cáncer de piel y supresión del sistema inmune, además de evitar el desequilibrio de cultivos sensible a la radiación UV (Zhang et al., 2019). Asimismo, el ozono estratosférico protege el oxígeno en altitudes más bajas de romper su enlace por la acción de la luz UV-B (Abbasi & Abbasi, 2017). Las reacciones fotoquímicas que describen este proceso son las siguientes:

Formación de ozono:



Dstrucción de ozono:



Es la reacción (Ec. 2.3) la que consume gran parte de la radiación ultravioleta de onda corta (UV-C) y algunas de las partes de UV-B de la luz del sol, absorbiendo la radiación UV en longitud de onda con rango de 200 a 320 nm, evitando que la mayor parte llegue hacia nosotros (Abbasi & Abbasi, 2017).

### *Ozono troposférico y smog fotoquímico*

Al nivel de la superficie, el ozono en altas concentraciones es un contaminante del aire que provoca efectos nocivos en la salud humana, las plantas y los animales. Tiene además una contribución al calentamiento global. Debido a esto, el ozono troposférico o a nivel del suelo recibe el sobrenombre de “ozono malo” (Zhang et al., 2019).

De manera natural, existe un flujo de ozono desde la estratósfera a la tropósfera que contribuye a los niveles de ozono a nivel del suelo. Sin embargo, la fuente predominante del ozono troposférico son las reacciones fotoquímicas que involucran COV y NO<sub>x</sub>, compuestos principalmente de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y óxido nítrico (NO) (Zhang et al., 2019).

En concentraciones bajas de COV y de monóxido de carbono (CO), el ozono troposférico alcanza una concentración de estado estacionario que depende de la intensidad solar, la temperatura ambiente y la relación entre la concentración de NO<sub>2</sub> y de NO (Zhang et al., 2019). El proceso fotoquímico se describe a continuación:

Fotólisis de NO<sub>2</sub>



Donde M representa un tercer cuerpo que absorbe el calor de la reacción y estabiliza al ozono. El ozono vuelve a reaccionar, consumido por NO para generar NO<sub>2</sub>.



Este ciclo da como resultado una acumulación cero de concentración de ozono.

No obstante, a concentraciones altas de COV y CO, se favorecen una serie de reacciones fotoquímicas complejas donde se producen radicales libres que compiten con el ozono para reaccionar con el NO. Los efectos de estas reacciones incluyen la acumulación de ozono en la tropósfera, la oxidación de COV en compuestos orgánicos oxigenados, la formación de compuestos que contienen nitrógeno y la oxidación de CO en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Lu et al., 2019; Zhang et al., 2019).

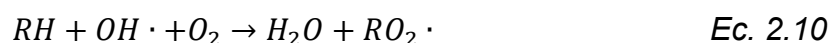
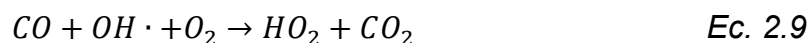
La siguiente secuencia muestra de manera simple el proceso:

Generación de radicales hidroxilo (OH·), a partir de ozono y vapor de agua.

Retomando la ecuación 2.3



Ocurre la oxidación de CO, hidrocarburos (RH) o radicales alcoxi (RO·) provenientes de los COV



Donde RO<sub>2</sub>· representa un radical hidroperoxilo, RO<sub>2</sub>· es un radical peroxi orgánico y R'O representa a un carbonilo. La presencia de radicales oxidantes (HO<sub>2</sub>· y RO<sub>2</sub>·) proporciona vías adicionales para convertir NO en NO<sub>2</sub>



Lo que provoca nuevamente la fotólisis de NO<sub>2</sub>



Esta cadena termina por la pérdida de radicales HO<sub>x</sub>, que ocurre por la oxidación del NO<sub>2</sub> por el radical hidroxilo, y la auto reacción del radical hidroperoxilo (HO<sub>2</sub>·).



Donde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es peróxido de hidrógeno y HNO<sub>3</sub> es ácido nítrico, los cuales se eliminan de la tropósfera por deposición húmeda, debido a su alta solubilidad en agua.

Cabe destacar que la fotoquímica del ozono no es lineal: A niveles bajos de óxidos de nitrógeno, la producción de ozono está limitada por el suministro de NO<sub>x</sub> y no es sensible a los hidrocarburos, por tanto, la reacción que termina la cadena es la ecuación 2.14, llamada “Régimen sensible a NO<sub>x</sub>” (Lu et al., 2019).

Mientras que, a niveles altos de NO<sub>x</sub>, la producción de ozono aumenta linealmente con las concentraciones de COV y disminuye con las concentraciones de NO<sub>x</sub>, por tanto, la reacción que termina la cadena es la ecuación 2.15, llamada “Régimen sensible a COV” (Lu et al., 2019). Se conoce que la mayor parte de la Ciudad de México vive bajo este último régimen (Peralta et al., 2021).

Debido a que la mayor parte de los productos formados por la oxidación de COV tienen baja volatilidad, se encuentran en fase condensada, por tanto, se les denominan aerosoles orgánicos secundarios (AOS). La mezcla que conforman estos aerosoles, junto con el ozono y sus precursores gaseosos se le denomina smog fotoquímico, dejando el aire teñido de color marrón rojizo (Zhang et al., 2019).

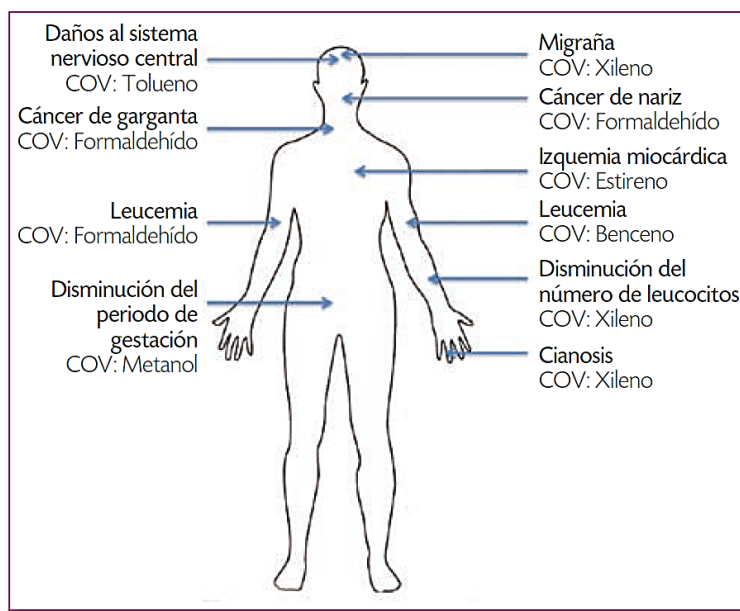
### 2.2.3 Efectos del COV, ozono troposférico y smog fotoquímico

#### *Efectos en la salud*

Los COV no solamente tienen efectos en el medio ambiente y en la salud como contaminantes al oxidarse, si no que por sí mismos afectan a los seres humanos por su uso en solventes y en productos cotidianos.

De manera general, la vida media de los componentes orgánicos volátiles en la atmósfera (que puede variar de minutos a meses), les permite viajar grandes distancias desde la fuente de emisión y entrar el cuerpo humano, principalmente a través del aire y de la piel, lo que provoca distintas patologías como asma, dermatitis atópica, irritación de garganta y nariz, náuseas y mareos; hasta problemas crónicos como daños renales, daños neuronales y cáncer (Montero Montoya et al., 2018; Palomo Briones et al., 2016). De hecho, algunos COV como el benceno, el 1,3-butadieno y el cloruro de vinilo ( $C_2H_3Cl$ ) han sido clasificados por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, como cancerígenos de Grupo 1 para los seres humanos (IARC, 2021).

Los efectos de los COV en la salud pueden variar dependiendo del compuesto y del grado de exposición. Algunos de los principales efectos se muestran en la figura 15.



**Figura 15. El cuerpo humano y las enfermedades causadas por los COV (Palomo Briones et al., 2016).**

Con respecto a los efectos en la salud por el ozono troposférico, se han hecho diversos estudios que han dado a conocer que existen efectos significativos sobre la morbilidad y mortalidad humana. En 2017, se atribuyó el 1.4% de las muertes a nivel global a la contaminación por ozono (Stenke, 2020).



Debido a la baja solubilidad del ozono en agua, este tiene la capacidad de llegar fácilmente a los pulmones. La exposición crónica al ozono al que millones de personas están expuestas de manera regular, da como resultado daños significativos dentro de los bronquiolos, en las células epiteliales de las vías respiratorias y tejidos pulmonares; esto debido a que cambia el equilibrio oxidante/antioxidante en el fluido que recubre las vías respiratorias de los pulmones, provocando estrés oxidativo (Poma et al., 2017).

Esto último se ha observado en años recientes con estudios caso-control en humanos, los cuales indican que los niveles de ozono inducen alteraciones funcionales y bioquímicas, principalmente en el tracto respiratorio (Poma et al., 2017).

Se han manifestado morbilidades relacionadas con el ozono como bronquitis, asma y embolias pulmonares, además de que se ha demostrado que el ozono puede interactuar sinérgicamente con infecciones virales (Madronich et al., 2015). Esto último ha tomado relevancia por la pandemia de COVID-19, ya que, aunque el número de estudios sobre este tema aún es escaso, la mayoría de los resultados indican que la exposición crónica a contaminantes del aire retrasa y complica la recuperación de los pacientes de COVID-19, además de conducir a formas más graves y letales de esta enfermedad (Domingo & Rovira, 2020).

De forma complementaria, se conoce que la mezcla de contaminantes en el aire tiene efectos mutagénicos y genotóxicos, que son de suma preocupación, ya que pueden conducir a enfermedades mortales (la más común, el cáncer) y también puede transferirse a generaciones futuras, afectando el acervo genético y las estructuras de la población (Bafana et al., 2018).

El ozono como agente genotóxico y mutagénico se ha estudiado en microorganismos, plantas y cultivos celulares *in vitro*, donde se ha observado daños en el ADN y la alteración de la viabilidad celular, es decir, la proporción de células vivas y funcionales existentes en una población celular (Poma et al., 2017).

### *Efectos en el medio ambiente*

Además de los daños en la salud, la contaminación atmosférica por COV, ozono y smog causa una variedad de efectos ambientales.

Muchos COV clorofluorocarbonados pueden presentar estabilidad química, por lo que son capaces de alcanzar la estratósfera y formar parte de los procesos de fotólisis estratosférica, lo que provoca la liberación de compuestos desencadenantes de la destrucción de la capa de ozono (Montero Montoya et al., 2018).

A nivel del suelo, la troposfera contiene un delicado equilibrio de gases naturales que atrapan parte del calor del sol, lo que se conoce como “efecto invernadero”, mantiene estable la temperatura de la Tierra. Desafortunadamente, este equilibrio natural es perturbado por los contaminantes atmosféricos como el ozono troposférico y como resultado, la tropósfera atrapa más calor del sol, provocando un aumento en la temperatura promedio de la Tierra (Lu et al., 2019).

El ozono en sí es un gas de efecto invernadero, por tanto, el aumento del ozono (y de manera general del smog) a nivel del suelo contribuye al calentamiento global. De igual forma, el aumento de la temperatura provoca que aumenten las reacciones de oxidación de contaminantes, lo que aumenta el ozono, es por ello que durante el verano se tienen mediciones más altas de concentración de ozono (Zhang et al., 2019).

Para las plantas, el contaminante atmosférico de mayor importancia es el ozono, ya que daña el rendimiento de cultivos de gran importancia para los seres humanos como el trigo, arroz, soja y maíz. Además, se ha estudiado los efectos de este contaminante en los microorganismos del suelo (vitales para la producción de alimentos) donde se ha encontrado que la abundancia y diversidad de bacterias metanogénicas en suelos de arrozales se han visto reducidos después de su exposición a concentraciones elevadas de ozono a nivel del suelo (Madronich et al., 2015).

De igual forma, se ha observado que el smog oscurece la parte de abajo de las hojas conocida como envés, seguido del colapso de células y necrosis. Además, se ha observado un retraso en el crecimiento de las plantas (Grukke & Heath, 2020).

#### 2.2.4 Cálculo de emisiones de COV y regulaciones en recubrimientos

Es importante poder medir el contenido de COV en pinturas para la implementación de nuevas tecnologías. En 1984, se creó el “Método 24” por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), con el cual se puede determinar el contenido de compuestos orgánicos volátiles, densidad, sólidos en volumen y sólidos en peso de recubrimientos (EPA, 2020).

Este método suele ser eficiente si se tiene más de 250 g de COV sobre litro de pintura o revestimiento. Sin embargo, debajo de los 250 g/L se tiene un rango de error en las mediciones, el cual aumenta a medida que disminuye el contenido de COV en los recubrimientos, por ejemplo, en las pinturas base agua. A pesar de ello, sigue siendo el método más frecuentemente utilizado para pinturas base solvente, además de que se siguen mejorando las técnicas analíticas para el caso de productos con poco contenido de COV (EPA, 2020; Mania et al., 2001).

Por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana NOM-123-SEMARNAT-1998 establece la determinación del contenido de COV que producen ozono con el método de Karl-Fisher, mientras que, para los COV que no producen ozono (los que denomina la norma como solventes exentos), la determinación se establece por cromatografía de gases (Diario Oficial de la Federación, 1999).

De igual manera, la norma determina el contenido máximo permisible de COV en la fabricación de cuatro tipos de pinturas para uso doméstico, pero únicamente para base disolvente (tabla 3).

**Tabla 3. Contenido permisible de COV para pinturas domésticas base disolvente, México (Diario Oficial de la Federación, 1999).**

Tipo de pintura	Contenido de COV permisible (g/L*)
Esmalte Arquitectónico	450
Esmalte Doméstico	450
Esmalte Alquidálico	450
Pintura de Aceite	450

Nota. (\*) Gramos de disolventes orgánicos por litro de pintura fabricada y envasada.

En Estados Unidos, desde la creación de la Ley de Aire Limpio en 1963 y reforzada en 1970, se ha tenido la preocupación por los COV. Desde 1998, existen regulaciones dadas por la EPA sobre el contenido de COV para una amplia gama de recubrimientos como en aerosol, arquitectónicos, aeroespaciales, superficies de electrodomésticos, mantenimiento industrial, superficies de automóviles, muebles, productos de cuero, piezas metálicas entre otros (EPA, 2007; U.S. Government Information, 2016).

Adicionalmente, en cada normativa se clasifican diferentes subcategorías, por lo que, cada empresa manufacturera tiene que considerar para cada uno de sus productos distintas limitaciones en el contenido de solvente. Asimismo, muchos estados han redactado sus propios límites de contenido de COV, entre ellos California, los cuales llegan a ser más estrictos que los límites establecidos a nivel nacional (California Air Resources Board, 2019; U.S. Government Information, 2016).

En la tabla 4 se muestran algunas de los productos considerados en la categoría de pinturas arquitectónicas.

**Tabla 4. Algunos límites en el contenido de COV para recubrimientos arquitectónicos, Estados Unidos (Tabla acortada de U.S. Government Information, 2016).**

Subcategoría de producto	Gramos de VOC por litro preparado	Libras de COV por galón
Compuestos de curado de concreto	350	2.9
Compuestos de curado y sellado de concreto	700	5.8
Recubrimientos protectores de concreto	400	3.3
Recubrimientos de extrema durabilidad	800	6.7
Recubrimientos exteriores	250	2.1
Recubrimientos interiores	250	2.1
Recubrimientos de mantenimiento industrial	450	3.8
Recubrimientos pigmentados metálicos	500	4.2
Esmaltes	450	3.8
Primers, selladores e imprimadores	450	3.8
Recubrimiento multicolor	580	4.8

En la Unión Europea, la directiva 2004/42/CE es la que establece las limitaciones al uso de disolventes orgánicos en pinturas, así como en barnices decorativos y recubrimientos para vehículos. La directiva es estricta, ya que requiere que los proveedores etiqueten la subcategoría del producto, el valor límite legal para el contenido de COV y el contenido máximo de COV del producto en su momento de comercialización. Además, en el 2010 introdujeron una reducción mayor al contenido permisible de estos compuestos, conocida como “Fase II” (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004).

En la tabla 5 se muestran algunas de las subcategorías con sus respectivos límites de disolventes orgánicos.

**Tabla 5. Límites permisibles en el contenido de COV para pinturas y barnices, Unión Europea (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2004).**

Subcategoría de producto	Tipo	Fase 1 (g/L*), a partir del 1/01/2007	Fase 2 (g/L*), a partir del 1/01/2010
Pinturas interiores/exteriores para madera o metal, carpintería y revestimientos	Base Agua	150	100
	Base Solvente	400	100
Barnices y lasures interiores/exteriores para carpintería, incluyendo lasures opacos	Base Agua	150	130
	Base Solvente	500	400
Lasures interiores/exteriores de espesor mínimo	Base Agua	150	130
	Base Solvente	700	700
Primers	Base Agua	50	30
	Base Solvente	450	350
Recubrimientos multicolor	Base Agua	150	100
	Base Solvente	400	100
Recubrimientos de efectos decorativos	Base Agua	300	200
	Base Solvente	500	200

Nota. (\*) Gramos de disolventes orgánicos por litro de revestimiento lista para usarse.

Comparado con otros países, en México es evidente que no existe una regulación eficiente en cuanto a la emisión de COV en pinturas y recubrimientos. Desde el año 2020, el Diario Oficial de la Federación ha publicado un proyecto para la modificación de la NOM-123-SEMARNAT-1998, donde se tiene como objetivo actualizar los límites máximos permisibles de emisión de COV y establecer nuevas especificaciones. Además, existe otro proyecto para la publicación de una nueva

NOM con respecto a los límites máximos permisibles de COV de pinturas y recubrimiento para uso arquitectónico. Sin embargo, para ambos proyectos no se tiene un alto grado de avance (Diario Oficial de la Federación, 2020, 2021).

## 2.3 Tecnología sustentable

### 2.3.1 Concepto de tecnología sustentable

Para poder clasificar las distintas soluciones que se han desarrollado en torno al uso de solventes orgánicos en pinturas y recubrimientos, es necesario definir qué significa la palabra “sustentable” y las que se vinculan con ella, como “desarrollo sustentable”.

Debido a los problemas progresivos a nivel mundial como el cambio climático, la contaminación ambiental, el crecimiento de población y el uso ineficiente de los recursos naturales; las empresas y gobiernos de cada país necesitan emplear tecnologías y enfoques hacia la actividad económica que puedan disminuir estas dificultades (Guo et al., 2020).

A partir de estas dificultades, nace el desarrollo sustentable. En 1987, la Comisión Brundtland de Naciones Unidas, en su informe *Nuestro futuro común*, define el concepto de desarrollo sustentable como aquel que permite cubrir las necesidades presentes sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para cubrir sus necesidades (World Commission on Environment and Development, 1987). Desde hace más de 30 años, es el concepto que ha sido más comúnmente aceptado, ya que establece vínculos entre las dimensiones sociales, económicas y ambientales (Cortés Mura & Peña Reyes, 2015).

Por lo tanto, el desarrollo sustentable está indudablemente asociado con un menor daño ambiental, además de estar impulsado por políticas integrales, tanto internacionales como de países individuales que tienen en cuenta las necesidades de las generaciones futuras. Entre estas políticas, varias sugieren el empleo de tecnologías verdes (Guo et al., 2020).

No existe una definición estándar para la tecnología sustentable, ya que tiene diferentes nombres a nivel global. Este tipo de tecnología se le ha denominado

limpia, verde, ecológica o sustentable; no obstante, si bien se utiliza una terminología diferente, cada una se refiere a soluciones tecnológicas innovadoras para prevenir y reducir el daño ambiental, además de adoptar un nivel de conciencia ambiental en la sociedad a partir de su implementación (Ebrahim, 2020).

De forma general, la tecnología sustentable se refiere al diseño de productos químicos que ofrezcan soluciones y alternativas amigables con el medio ambiente, lo que puede implicar diversos factores, entre ellos; que sean menos tóxicas, el uso de materias primas renovables, de solventes y condiciones de reacción más seguros o que aumenten la eficiencia energética (Ebrahim, 2020; Valavanidis, 2016).

### 2.3.2 Greenwashing o lavado verde

No obstante, el implementar tecnologías sustentables es un proceso complejo y que no se debe de tomar a la ligera, ya que las empresas pueden caer en la práctica del “lavado verde” o “Greenwashing”; el cual es un fenómeno que implica una discrepancia entre las afirmaciones ecológicas de un producto o proceso, y su desempeño ambiental real. Esto es un problema grave, ya que es un intento de aprovechar los beneficios que originan un posicionamiento ecológico, como lo es el marketing, sin comportarse en consecuencia, perdiendo de esta forma, la verdadera importancia del desarrollo sustentable (de Jong et al., 2020).

Por lo tanto, la gran advertencia que necesitan tener las empresas y organizaciones que desean implementar tecnologías sustentables, es que se debe de tener una comunicación honesta y transparente sobre los procesos que implementan para ser amigables con el medio ambiente, únicamente de esta forma podrá resultar beneficioso para el desarrollo sustentable (de Jong et al., 2020).

### 2.3.3 Desarrollo sustentable o sostenible

Es importante destacar el uso de las palabras “desarrollo sustentable” y “desarrollo sostenible” dentro de esta investigación. En la literatura en español, estas dos palabras se han interpretado y aplicado de diversas maneras, por lo que, existen



artículos donde se usan como sinónimos, así como en otros artículos se indica que existen diferencias entre las dos.

A partir de una revisión de la literatura, Cortés Mura y Peña Reyes (2015) concluyeron que, varios autores coinciden en que el desarrollo sostenible es aquel tipo de desarrollo que se da en una nación que puede mantener o sostener el equilibrio en la parte social, económica y ambiental; y desarrollo sustentable, implica todo lo que refiere el desarrollo sostenible pero lo lleva a su mantenimiento en el tiempo, de tal forma que genera una mejor calidad de vida, sin dejar que el consumismo afecte las generaciones futuras. Por tal motivo, en el presente trabajo se utiliza el término “sustentable” y sus derivados.

#### 2.4 La tecnología sustentable en la industria de pinturas y recubrimientos para superficies metálicas

En el mercado de pinturas y recubrimientos, la creciente demanda de productos con menor impacto ambiental ha impulsado esfuerzos de investigación para desarrollar nuevas soluciones de recubrimientos, tanto en el ámbito académico como en el industrial (Pourhashem, 2020).

La tecnología sustentable en este caso, está enfocada principalmente en dos objetivos: reducir el contenido de COV en las formulaciones y optimizar el proceso de manufactura para tener una menor huella de carbono, es decir, la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos de manera indirecta o directa del proceso (Somani, 2019).

Esto ha sido un verdadero reto, sobre todo en los recubrimientos para superficies metálicas donde las exigencias son más altas, ya que se requiere de una buena protección corrosiva (como se explicó anteriormente en la importancia de este sector de pinturas), además de la misma flexibilidad (la capacidad de la película a adaptarse a deformaciones sin sufrir fisuras), resistencia mecánica, apariencia y adherencia que ofrecen los solventes orgánicos en las formulaciones.

Existen dos enfoques principales para reducir el contenido de COV en las formulaciones de pintura. La primera forma es usando solventes que no se evaporen

a la atmósfera y que no sean peligrosos para la salud, así como el uso de equipamiento que pueda acumular vapores peligrosos durante la aplicación del recubrimiento. El segundo método es el desarrollo de recubrimientos con un bajo contenido de solventes orgánicos o sin solvente alguno, como es el caso de los revestimientos con alto contenido de sólidos, 100% sólidos o pinturas en polvo (Javadi et al., 2020). A continuación, se describirán las tecnologías actualmente implementadas y en desarrollo, para reducir el contenido de COV en recubrimientos para superficies metálicas.

#### 2.4.1 Recubrimientos base agua

La tecnología de resinas en base de agua está cambiando el mundo de los recubrimientos desde hace un par de décadas, además de que han demostrado características de rendimiento mejoradas en los últimos años (Shikha, 2018). De hecho, los recubrimientos a base de agua han dominado el mercado de la arquitectura durante muchos años.

Como su nombre lo indica, este tipo de tecnología usa el agua como solvente para dispersar las resinas, además de ayudar a reducir la viscosidad del producto final, haciendo que sean fáciles de aplicar, además de ser ecológicos (Javadi et al., 2020).

Es importante destacar que los recubrimientos base agua pueden contener solventes orgánicos que ayudan en la integración de otros elementos a la formulación, aunque estos suelen estar en una proporción mínima que no excede el 30% del producto debido a las regulaciones ambientales en diversos países, por lo que siguen siendo considerados como recubrimientos con bajo contenido de COV (Shikha, 2018).

En el mercado actual, existen tres principales tipos de recubrimientos base agua:

- 1) Recubrimientos solubles en agua.

Contienen resinas que se disuelven completamente en agua. Estas resinas se producen mediante reacciones de polimerización en un medio orgánico, por lo que usualmente contienen solventes secundarios que son orgánicos, como alcoholes,

éteres de glicol u otros que contengan oxígeno y que son solubles en agua. Las resinas utilizadas suelen ser poliésteres, poliacrilatos, epoxis y éteres epoxi. Suelen proporcionar un alto nivel de brillo, protección contra corrosión, buen pigmento, humectación y estabilización (Javadi et al., 2020).

## 2) Pinturas o recubrimientos dispersables en agua.

Contienen pequeños grupos de partículas de resina insolubles que se suspenden en agua mediante agitación mecánica. Suelen utilizar pequeñas cantidades de disolventes orgánicos como agentes coalescentes, que se evaporan al secarse (Javadi et al., 2020). Las resinas utilizadas incluyen copolímeros de propionato de vinilo, copolímeros de acetato de vinilo, copolímeros de acrilato-metacrilato y copolímeros y polímeros de estireno-butadieno. Las dispersiones coloidales se utilizan principalmente para revestir materiales porosos (Shikha, 2018).

## 3) Emulsiones/pinturas de látex:

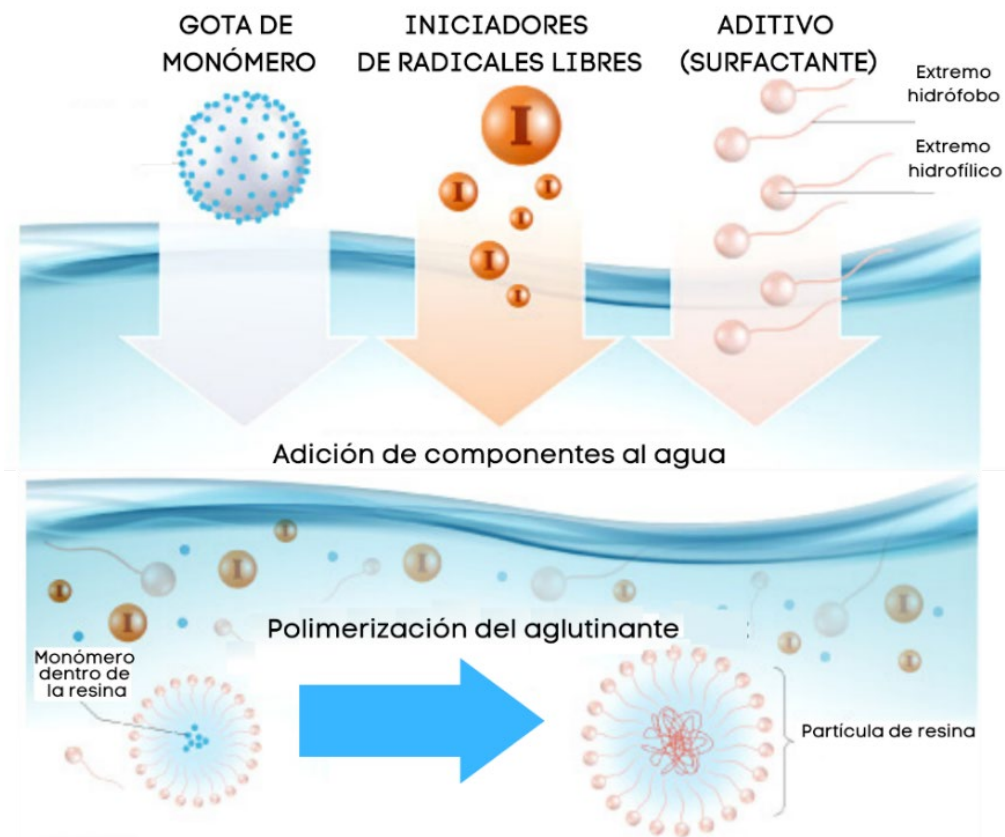
Contienen resinas insolubles en agua, al ser la mayoría, las emulsiones son de los recubrimientos base agua más producidos.

Las resinas utilizadas incluyen copolímeros de estireno-butadieno, acrílicos, alquidos, acetato de polivinilo y poliestireno. Estas pinturas poseen una mayor permeabilidad que le permite a la película formada "respirar", reduciendo así la formación de "ampollas" (burbujas de aire entre la película formada y el sustrato) o descamación, es decir, que el recubrimiento se agriete y se desprenda (Shikha, 2018).

Para lograr que sean efectivos, se incorporan aditivos surfactantes que sean capaces de compatibilizar el agua y las resinas utilizadas (Sarkar & Jayaram, 2018).

Los surfactantes se componen de una parte hidrófoba y un resto hidrófilo o soluble en agua; su estructura molecular permite que la parte hidrófoba sea compatible con la resina y la parte hidrófila con el agua, lo que produce un agregado estable conocido como micela (Rojas, 2018; Sarkar & Jayaram, 2018).

Dentro de la micela, que está rodeada de agua, ocurre el proceso de polimerización de la resina, la cual termina en emulsión. Luego de la aplicación, el agua se evapora y la distancia entre micelas se acorta, formando así la película, este proceso se muestra con mayor claridad con la figura 16 (Rojas, 2018; Sarkar & Jayaram, 2018).



**Figura 16. Polimerización de la resina en pinturas base agua (Imagen modificada de Mallard Creek Polymers, 2020).**

En el caso de las pinturas de uso industrial, las resinas son incompatibles con el agua, por lo que agregar surfactantes no es suficiente y se necesitan agregar compuestos que neutralicen la resina, para que de esta manera se puedan formar compuestos con polaridad suficiente para hacerlos solubles en agua (Rojas, 2018).

Usualmente, se utilizan aminas como neutralizantes, las dos que destacan en este uso es la 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP) y la dimetiletanolamina (DMEA) (Javadi et al., 2020).

### *Ventajas de uso*

Los beneficios de los recubrimientos base agua van más allá de lo ambiental. Existe un acuerdo general dentro de la industria, que las tecnologías actuales de recubrimientos a base de agua para muchas aplicaciones cumplen o superan el desempeño de sus contrapartes a base de solventes (Challener, 2020).

Además de la baja toxicidad, su alto contenido de agua hace que sean menos inflamables, lo cual es un factor importante para las empresas al reducir el riesgo de explosión y las tarifas de seguro. De igual forma, el uso del agua como solvente da como resultado la reducción de eliminación de desechos, esto debido a que las pistolas de pintura y los contenedores utilizados durante la aplicación son más fáciles de limpiar porque no necesitan diluyentes específicos, algo que sí es de vital importancia al utilizar recubrimientos base solvente orgánico (Javadi et al., 2020).

Otra de las ventajas que poseen los recubrimientos a base de agua es que también pueden cubrir más área de superficie, en comparación con los recubrimientos a base de solventes orgánicos (Javadi et al., 2020). Por lo tanto, se necesita de menos producto para cubrir un área, lo que reduce los costos del usuario. Por último, la vida útil de estos productos es relativamente larga y se pueden conservar en un recipiente sellado para su uso en un futuro (Shikha, 2018).

### *Desventajas de uso*

De manera general, dos de los principales desafíos en el rendimiento de los recubrimientos son la capacidad de lograr una excelente resistencia a los disolventes y a la corrosión, siendo el costo una consideración importante. A pesar de los avances en las soluciones a base de agua, todavía tienen dificultades para lograr un rendimiento satisfactorio para estas propiedades (Cunningham et al., 2019).

En el sector industrial, muchos requisitos de rendimiento como anticorrosión, resistencia, resistencia química, demanda de alto brillo, apariencia y los problemas relacionados con las condiciones de aplicación; aún deben mejorarse para facilitar

el reemplazo de los sistemas de base solvente por sistemas de base agua (Cunningham et al., 2019).

De forma más específica, el desarrollo de recubrimientos base agua para metales no ha sido sencillo, y su desempeño no es catalogado como óptimo, esto debido, a que uno de los principales obstáculos que tiene el uso del agua como solvente, es que no tiene una buena capacidad de humectación, por la alta tensión superficial que tiene el agua. Esto se puede mejorar con el uso de aditivos surfactantes, pero no se consigue la misma humectación que con pinturas base solvente orgánico. (Rojas, 2018)

Tener una buena humectación significa una mejor adherencia, en consecuencia, una mejor protección y mejor desarrollo de propiedades mecánicas. De igual forma, los tiempos de secado suelen ser más largos en las pinturas base agua, lo que dificulta la productividad (Rojas, 2018).

Otro aspecto es la oxidación instantánea, que ocurre cuando una superficie metálica activa entra en contacto con el agua, para evitar esto se necesita incorporar aditivos antioxidantes especiales. La nivelación que se obtiene con los recubrimientos base agua suele ser pobre y además tienden a ser más sensibles a condiciones de aplicación no ideales, esto debido a que la formación de la película depende de la humedad relativa y la temperatura del lugar de aplicación (Challener, 2017; Rojas, 2018).

De igual forma, se ha reportado que los recubrimientos a base de agua pueden mostrar defectos con mayor facilidad, ya que si no contiene los aditivos correctos, es más fácil que la suciedad ingrese el sistema, lo que provoca eventualmente defectos en la película (Challener, 2017; Rojas, 2018).

De manera general, los productos de recubrimientos base agua son complicados de desarrollar debido a los diversos aditivos específicos que se deben de añadir a la formulación, por lo tanto, aunque se eliminan ciertos costos (como los diluyentes), en el caso del sector de recubrimientos para metales suelen ser más costosas.

### *Avances recientes en los recubrimientos base agua para metales*

Aunque es importante mencionar que, los avances en el diseño de polímeros, resinas y aditivos, así como el desarrollo de compuestos compatibles con el agua para mejorar la resistencia química, junto con una mejor comprensión de los mecanismos de formación de películas; han podido abordar muchos de los problemas de rendimiento de estos recubrimientos (Cunningham et al., 2019).

La adición de nanomateriales a las emulsiones de agua puede alterar las complejas interacciones en los sistemas y la sinergia entre las nanopartículas y los tensioactivos, lo que resulta en la mejora de la estabilidad de las emulsiones y las propiedades de los recubrimientos resultantes (Soleimani et al., 2021).

Entre los nanomateriales, las nanopartículas de sílice han mostrado propiedades únicas, como una alta relación de aspecto y dureza, lo que las convierte en un candidato adecuado para la preparación de recubrimientos resistentes a la corrosión. Se encontró que la estabilidad se mejoró para emulsiones epoxi en agua con nanopartículas de hasta un 3% en peso (Soleimani et al., 2021).

También el uso de óxido de cerio a nanoescala, mejor conocida como nanocería, ha aparecido como un posible candidato para la solución de la oxidación instantánea en los recubrimientos base agua para metales. Se ha investigado su uso contra la corrosión del acero en pinturas con aglutinantes acrílicos, donde se han percibido que a una concentración de nanocería en peso del 1%, se tiene una mayor eficiencia de protección (Ecco et al., 2016).

Adicionalmente, se han realizado investigaciones con fosfato de zinc, el cual ha servido como un relleno anticorrosivo no tóxico y respetuoso con el medio ambiente, y con el grafeno, que es un tipo de material de carbono recientemente descubierto (en 2004) en forma de lámina de una sola capa, la cual está formada por hibridación  $sp^2$  de átomos de carbono, que tiene una estructura 2D única de espesor de capa que evita que las moléculas de oxígeno y agua se difundan a la superficie de los materiales, logrando así el objetivo de proteger al metal (Zhou et al., 2018).

Se ha estudiado el funcionamiento de recubrimientos base agua con aglutinantes de poliuretano y un compuesto derivado del grafeno sulfonado y el fosfato de zinc (SG-ZP), donde se ha concluido que el añadir el compuesto SG-ZP en una proporción de 0.5% en peso, provoca la mejor propiedad de anticorrosión y la máxima resistencia de recubrimiento (Wu et al., 2019).

Para contrarrestar el problema del secado de los recubrimientos base agua, se han incorporado aditivos fotoiniciadores que permiten el curado UV de la película. La radiación ultravioleta (UV) es una tecnología muy bien aceptada para el curado rápido de materiales poliméricos, ya que, además de ayudar al tiempo de secado, ha tenido un rendimiento excepcional. Su funcionamiento es a partir de la reacción de polimerización entrecruzada que forma una red altamente reticulada, que da como resultado una alta resistencia química a las manchas y disolventes (Tennebroek et al., 2018).

Los fotoiniciadores se han utilizado últimamente en polímeros hiperramificados de poliuretano con agua como disolvente (Lin et al., 2014). Esto es debido a que, como se mencionó en el capítulo de aspectos generales de los recubrimientos, los polímeros más ramificados exhiben mejores propiedades que los polímeros lineales. El curado UV por sí solo es un tipo de tecnología sustentable, del cual se hablará con mayor profundidad posteriormente.

#### 2.4.2 Recubrimientos con alto contenido de sólidos

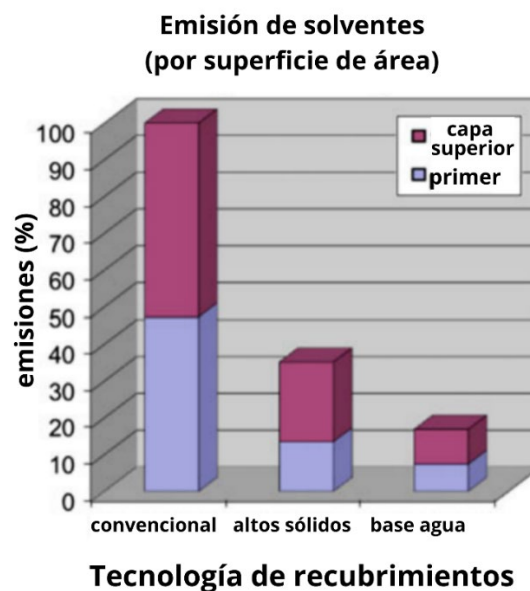
Como se ha visto con anterioridad, los recubrimientos a base de agua son complicados de formular, debido a que deben de imitar las mismas propiedades que tienen los recubrimientos a base de solventes orgánicos, algo que es de vital importancia en la industria de metales para evitar, por ejemplo, la corrosión.

Debido a esta complejidad, nace la tecnología de recubrimientos con alto contenido de sólidos, ya que no se han podido sustituir completamente los solventes orgánicos debido a sus grandes propiedades mecánicas, de adhesión y la excelente adaptabilidad a materiales industriales. Esta tecnología permite la reducción de los COV a la vez de conservar las ventajas inherentes de los solventes orgánicos.



Los recubrimientos con alto contenido de sólidos son un grupo de recubrimientos que se parecen bastante a los de base solvente orgánico, pero que contienen menos del 30% de disolvente. Por definición, un recubrimiento de alto contenido de sólidos normalmente contiene más de 60% de sólidos en peso u 80% de sólidos en volumen, donde “sólidos” hace referencia a la mezcla de pigmento, aglutinante y aditivos (Pélissier & Thierry, 2020).

Esta tecnología ha sido aceptada por la industria automotriz, aeroespacial y marina para su uso, sobre todo en formulaciones de capa superior o capa final (Pélissier & Thierry, 2020). Además, es comúnmente admitida por ser una tecnología “intermedia” para la reducción de emisiones de COV, tal y como se muestra en la figura 17.



**Figura 17. Reducción relativa de solvente con la introducción de tecnologías de recubrimientos con altos sólidos y base agua (Imagen modificada de Visser et al., 2016).**

En recubrimientos con alto contenido de sólidos, existe una reducción directa del contenido de solvente orgánico, lo que implica un enorme aumento de la viscosidad de la mezcla y, de no ser modificada, puede causar problemas de aplicación. Por tal motivo, es necesario reducir el peso molecular de las resinas en paralelo a la reducción del contenido de solvente orgánico, lo cual puede lograrse con polímeros de bajo peso molecular (Giudice, 2014).

No obstante, el uso de polímeros de bajo peso molecular lleva a pobres propiedades físico-mecánicas de la película. Esto se ha solucionado con la introducción de reacciones de post-curado luego de la aplicación sobre el sustrato, ya que convierten a los polímeros de bajo peso molecular en redes tridimensionales de alto peso molecular, lo que aumenta las propiedades mecánicas y la resistencia química (Giudice, 2014). Por lo tanto, las resinas utilizadas en este tipo de tecnología, además de ser de bajo peso molecular, deben de tener grupos funcionales reactivos.

Sin embargo, también se debe de tomar en cuenta que el uso incorrecto de resinas y de agentes de curado pueden ser perjudiciales para una buena flexibilidad, a pesar de tener una buena resistencia química. Es por ello que de forma general, las formulaciones de recubrimiento con alto contenido de sólidos son mezclas de varias resinas y agentes de curado para encontrar el equilibrio adecuado entre la película seca y las propiedades de aplicación (Visser et al., 2016).

Además, la distribución de los pesos moleculares resulta de gran importancia en este tipo de recubrimientos. Se ha encontrado que los polímeros que tienen una estrecha distribución de pesos moléculas son más adecuados para las pinturas de altos sólidos, ya que estas resinas otorgan menos viscosidad a la mezcla, comparadas con las resinas con amplia distribución de pesos moleculares (Giudice, 2014).

#### *Ventajas de uso*

Las formulaciones con alto contenido de sólidos maximizan la reducción del contenido de disolventes orgánicos sin comprometer la formación de película, la acumulación de peso molecular, los tiempos de curado y, en última instancia, el rendimiento del recubrimiento, esto debido a que comparten las mismas propiedades que destacan al utilizarse solventes orgánicos en recubrimientos convencionales (Salata et al., 2019).

Adicionalmente, al tener gran contenido de sólidos, se necesita menos cantidad de producto para lograr el mismo espesor obtenido con formulaciones convencionales

(Pélissier & Thierry, 2020). Al contener menos cantidad de solvente en la formulación, se necesita menos tiempo de secado y son menos tóxicos e inflamables en comparación con los recubrimientos convencionales a base de solventes orgánicos.

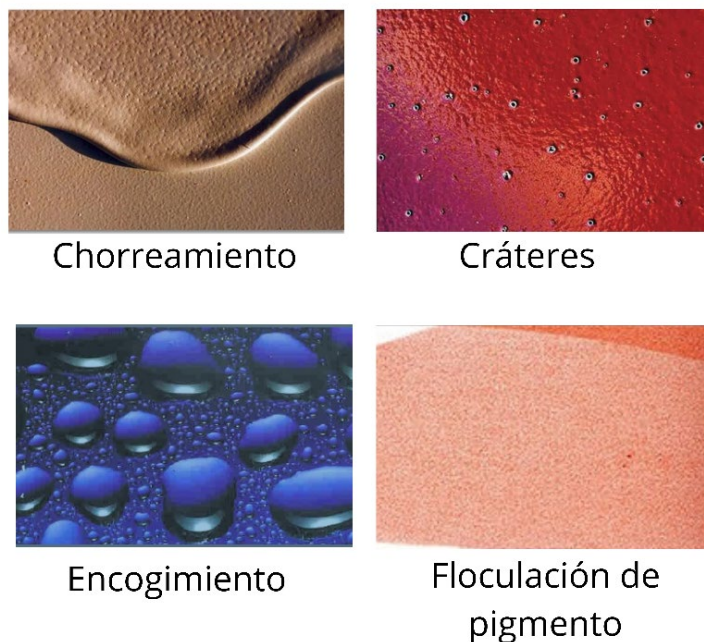
De igual forma, el costo de capital para la aplicación es en general bajo, especialmente en comparación con los recubrimientos base agua, para los cuales se necesitan equipos hechos de acero inoxidable. Además, las tasas de evaporación en solventes orgánicos no dependen de la humedad, esto elimina una variable que sí puede afectar a los recubrimientos a base de agua (Jones et al., 2017).

Además, se pueden utilizar en equipos de rociado acondicionado a temperatura (hot spray), el cual es un equipo diseñado con un intercambiador de calor para calentar el recubrimiento a temperaturas desde 38° hasta 65° Celsius. Para utilizar equipos de rociado convencionales, es necesario que los recubrimientos cumplan con una baja viscosidad, por lo que, el rociado acondicionado a temperatura permite la producción de recubrimientos con alto contenido de sólidos sin que existan problemas en la aplicación de los mismos (Higgins, 2018; Jones et al., 2017).

Se ha informado que los sólidos de una capa superior para electrodomésticos se pueden aumentar del 55% al 65% usando este equipo. La viscosidad de los recubrimientos con alto contenido de sólidos generalmente disminuye más drásticamente con el aumento de temperatura que los recubrimientos convencionales, lo cual es una característica deseable para la aplicación de rociado caliente (Jones et al., 2017).

#### *Desventajas de uso*

De forma general, los recubrimientos con altos sólidos han tenido una tendencia a tener mayores defectos en la película formada en comparación con los recubrimientos convencionales a base de solventes orgánicos, los defectos que destacan son el encogimiento, chorreamiento, formación de cráteres y floculación de pigmento, los cuales se representan en la figura 18.



**Figura 18. Distintos defectos en la película (Imágenes modificadas de Beetsma, 2014; Fitzsimons & Parry, 2018; Lankem, 2019).**

Los cráteres son pequeñas depresiones en una película que persisten después del secado, y el encogimiento se define como la formación de gotas de recubrimiento, dejan parte del sustrato sin proteger. Estos dos defectos se forman a partir de una tensión superficial alta. El encogimiento se produce cuando se aplica un revestimiento con tensión superficial relativamente alta a un sustrato de energía libre superficial relativamente baja (Pélissier & Thierry, 2020).

Los recubrimientos con alto contenido de sólidos a menudo tienen tensiones superficiales más altas que los recubrimientos convencionales, esto es debido al uso de resinas de bajo peso molecular, lo que requiere que la concentración de grupos funcionales polares tales como grupos hidroxilo sea mayor y, por lo tanto, la tensión superficial sea generalmente mayor (Jones et al., 2017).

Además, este tipo de resinas generalmente requieren el uso de solventes aceptores de enlaces de hidrógeno en lugar de solventes con hidrocarburos, lo que aumenta aún más la tensión superficial (Jones et al., 2017). Debido a todos estos factores, se requiere que el sustrato se deba limpiar a fondo y se deba preparar adecuadamente para alcanzar la mayor energía libre superficial posible (Pélissier &

Thierry, 2020). Para recubrir metales, la importancia de limpiar el sustrato a profundidad, incrementa a medida que los sólidos en el recubrimiento aumentan (Jones et al., 2017).

Asimismo, un mayor contenido de grupos funcionales reduce la vida útil del recubrimiento. La estabilidad durante el almacenamiento se ve afectada por la velocidad de reacción a la temperatura de almacenamiento, que a su vez está influenciada por la concentración de grupos funcionales (Pélissier & Thierry, 2020).

Otro defecto de película que se puede presentar es la floculación del pigmento, en otras palabras, la agrupación de partículas para formar un precipitado que puede flotar en el solvente. Las moléculas de muy bajo peso molecular en las resinas utilizadas, en ocasiones no pueden proporcionar una capa adsorbida adecuada, ya que el número de grupos funcionales por molécula disminuye y el solvente puede competir más eficientemente por los sitios de adsorción en la superficie del pigmento promoviendo la floculación (Jones et al., 2017; Pélissier & Thierry, 2020).

El “colgado” o “chorreamiento” es un defecto de película que es más difícil de controlar en recubrimientos de altos sólidos. El colgado es la tendencia de un recubrimiento húmedo a fluir hacia abajo debido a la fuerza de gravedad, lo que produce un borde inferior más grueso en el sustrato y una capa desigual (Jones et al., 2017). Puede darse por diversas razones, entre ellas, se encuentra el uso de pistolas de rociado, ya que se puede aplicar demasiado recubrimiento para lograr una apariencia “húmeda” similar a la que se obtiene con los recubrimientos normales con solventes orgánicos (Higgins, 2018).

Además, existe evidencia considerable que se pierde sustancialmente menos solvente durante el rociado, es decir, después de que las gotas de recubrimiento salen de la pistola y antes de que lleguen a la superficie del objeto a recubrir. La menor pérdida de disolvente conduce a menor aumento de la viscosidad de un recubrimiento con alto contenido de sólidos en comparación con un recubrimiento convencional, lo que resulta en una mayor probabilidad de chorreamiento (Jones et al., 2017). No obstante, el utilizar equipos de rociado acondicionado a temperatura, reducen el riesgo del colgado.

Otro problema de chorreamiento es aquel que se produce cuando se mete el sustrato recubierto a hornos de pintura, donde el recubrimiento parece estar bien hasta que se mete al horno. Esto se debe a la fuerte dependencia de la temperatura de la viscosidad de los recubrimientos con alto contenido de sólidos. Comparado con los convencionales, hay una caída mucho más pronunciada en la viscosidad a medida que el producto recubierto ingresa al horno caliente, lo que favorece chorreamiento y el recubrimiento continúa fluyendo incluso después de que el solvente desaparece (Jones et al., 2017).

Por último, otro problema asociado al alto contenido de sólidos es la ventana de curado. En los revestimientos de sólidos convencionales, la ventana de curado es relativamente grande; lo que significa que hay poca diferencia si la temperatura de horneado, el tiempo de horneado o la cantidad de catalizador se reducen en  $\pm 10\%$ . Pero en recubrimientos con alto contenido de sólidos, la ventana de curado es más estrecha. Si hay una gran cantidad de grupos hidroxilo en cada molécula de resina y el 10% no reacciona, el cambio en las propiedades puede ser pequeño. Sin embargo, si solo hay un poco más de dos grupos hidroxilo por molécula promedio y el 10% no reacciona, una fracción significativa de las moléculas se conectará a la red reticulada en un solo lugar, lo que dará como resultado un extremo colgante, con efectos perjudiciales en propiedades de la película (Wicks et al., 2017).

#### *Avances recientes en los recubrimientos con alto contenido de sólidos para metales*

La posible floculación del pigmento en recubrimientos de altos sólidos ha llevado al diseño de dispersantes especiales llamados “dispersantes poliméricos”, que son resinas (que se añaden aparte del aglutinante) con grupos de anclaje afines a los pigmentos y cadenas poliméricas solubles. Los dispersantes poliméricos se utilizan para obtener una dispersión homogénea del pigmento en la fase líquida que conduce a una viscosidad débil y permite una alta carga de pigmento y una alta fuerza de coloración (Agbo et al., 2018; Lokhande & Jagtap, 2016). Lo que presenta una ventaja para recubrimientos en metales como decoración.

Para mejorar la prevención de corrosión en metales, se han fabricado recubrimientos de polisiloxano, el cual es uno de los recubrimientos de altos sólidos

y ambientalmente amigables más usados en la actualidad para ser aplicado a estructuras metálicas que serán expuestas a ambientes altamente corrosivos, ya que brinda hidrofobicidad a la película y mejora la reacción de entrecruzamiento, dando una mayor resistencia mecánica, química, de temperatura y a los rayos UV. Usualmente son usados como capa base (Guzman Rosas & Ocampo C., 2011; Xu et al., 2019).

Por ejemplo, se ha estudiado el efecto de grupos alcoxisilanos en recubrimientos de altos sólidos a base de resinas alquídica, donde se observó un aumento de la resistencia química y la dureza, manteniendo la flexibilidad y la apariencia. Además, la resistencia a la corrosión aumentó con más del 10% en peso de alcoxisilanos y el exceso de estos grupos, permitió cierto comportamiento de “autocuración” en el recubrimiento (Salata et al., 2019).

Asimismo, los materiales híbridos orgánicos-inorgánicos se han utilizado ampliamente para proteger metales y se han fabricado con alto contenido de sólidos. Consisten en una fase de polímero orgánico y una fase inorgánica, lo que permite que la combinación de las fases unidas entre sí con una interfaz proporcione las propiedades únicas de ambas fases (Zvonkina & Soucek, 2016). Se han preparado diversos sistemas de este tipo, donde destacan los recubrimientos híbridos donde la resina es a base de epoxi de silicona o poliuretano, y la fase inorgánica la conforman siloxanos (Alrashed et al., 2019; Chen et al., 2019).

Los recubrimientos alquídicos son ampliamente ocupados para proteger metales contra la corrosión. Se ha estudiado un enfoque para aumentar la resistencia a la corrosión y el contenido de sólidos en este tipo de recubrimientos, utilizando como diluyente reactivo el metacrilato de cardanol, con el cual se presentó una resistencia superior, además de mejorar la fuerza de adherencia y reducir el tiempo de secado (Wang et al., 2020).

#### 2.4.3 Recubrimientos en polvo

El recubrimiento en polvo es un recubrimiento 100% sólido que se aplica como un polvo seco y posteriormente se forma la película con calor. Al ser 100% sólidos, no

contiene disolventes de ningún tipo (Du et al., 2016). Los aglutinantes, junto con pigmentos, agentes niveladores, modificadores de flujo y otros aditivos; son mezclados en estado fundido, para posteriormente ser enfriados y molidos hasta obtener un polvo uniforme. (Hamdy Makhlouf & Gajarla, 2020).

Para formar un recubrimiento en polvo sobre un sustrato metálico, se necesita una pistola de rociado para aplicar una carga electrostática a las partículas de polvo. Después de la aplicación, el sustrato metálico se calienta en un horno, permitiendo que el recubrimiento reaccione químicamente y forme una estructura polimérica de alta reticulación molecular (Hamdy Makhlouf & Gajarla, 2020). Se usa normalmente para producir recubrimientos duros y resistentes al desgaste, los cuales se emplean principalmente para recubrir metales como electrodomésticos, extrusiones de aluminio, herrajes para tambores y piezas de automóviles y bicicletas (Sahoo et al., 2017).

Teniendo como base a la resina utilizada, existen dos sistemas de recubrimientos en polvo: termoplásticos y termoendurecibles. Los recubrimientos termoplásticos son típicamente de resinas de polietileno, poliamida, cloruro de polivinilo y fluoruro de polivinilideno. Mientras que, los recubrimientos en polvo termoendurecibles abarcan las resinas epoxi, resinas de poliéster y resinas acrílicas junto con varios endurecedores (Du et al., 2016).

El proceso de flujo para la formación de la película en recubrimientos termoplásticos se lleva a cabo físicamente mediante un calentamiento térmico, el cual es reversible, es decir, se pueden volver a fundir al calentarse, esto debido a que se utilizan aglutinantes no-convertibles (Farshchi & Gedan-Smolka, 2020).

Suelen tener un espesor de película grande, que va de los 0.08 a los 0.30 mm y se utilizan comúnmente como recubrimientos protectores, pero no como un sustituto de las películas delgadas que ofrecen los recubrimientos a base de solventes orgánicos (Sathish Kumar et al., 2016).

Algunas deficiencias como mala resistencia a los solventes, adhesión débil a superficies metálicas, bajo nivel de pigmentación, gran espesor de película y alta



temperatura de fusión; conducen al desarrollo de los sistemas termoendurecibles (Farshchi & Gedan-Smolka, 2020). Por su parte, los recubrimientos en polvo termoendurecibles contienen aglutinantes convertibles, que se polimerizan y cambian su estructura química al calentarse, por tanto, el proceso no es reversible (Sathish Kumar et al., 2016).

La principal diferencia de estos sistemas con los recubrimientos en polvo termoplásticos, además de no ser reversibles, es que exhiben una viscosidad de fusión mucho menor durante la formación de la película a temperaturas elevadas, lo que permite que las películas sean más delgadas (entre 0.025 a 0.075 mm), algo que también afecta el poder de cobertura y el precio del producto, por ejemplo, el no necesitar de una capa de imprimación en sustratos metálicos (Farshchi & Gedan-Smolka, 2020).

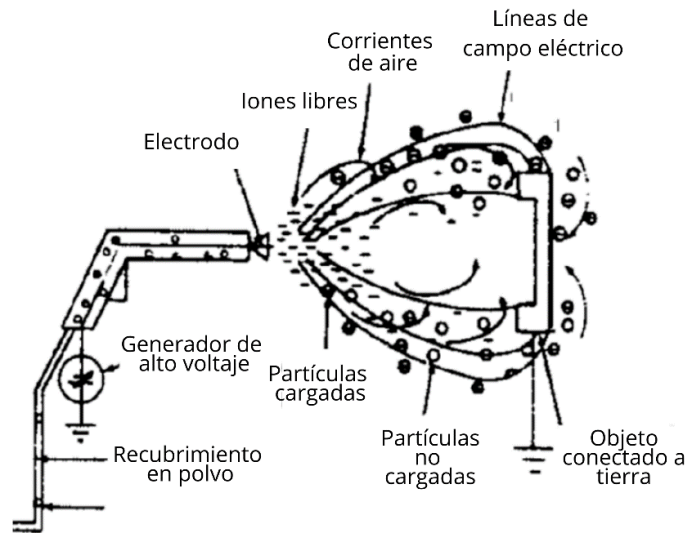
Adicionalmente, la reticulación de la película en sistemas termoestables conduce a una alta resistencia a los disolventes, que también mejora la resistencia química, esto debido a que la película reticulada no es permisiva hacia los agentes atacantes (Farshchi & Gedan-Smolka, 2020).

Otra diferencia entre los dos sistemas es el método de aplicación. Existen dos métodos de aplicación: a través de un proceso llamado deposición por rociado electrostático, el cual se utiliza para los recubrimientos en polvo termoendurecibles; y a través del proceso de inmersión en lecho fluidizado, utilizado para recubrimientos en polvo termoplásticos (Du et al., 2016).

La deposición por rociado electrostático es el método más utilizado. El proceso se describe a continuación. De forma inicial, el polvo seco se fluidifica y se utiliza en una pistola de rociado electrostático, que ayuda a separar los granos individuales de polvo y mejorar la carga electrostática, lo que provoca que el polvo fluya fácilmente a la pistola y produzca un recubrimiento más grueso (Sathish Kumar et al., 2016).

Las partículas de polvo seco son electrostáticamente cargadas e impulsadas por aire comprimido, a la vez que un transformador suministra corriente de alto voltaje

a un electrodo en la boquilla de la pistola, tal y como se muestra en la figura 19. La corriente ioniza el aire que circula, transfiriendo de esta forma una carga negativa a las partículas de polvo al pasar por la “corona” de aire ionizado. El sustrato, al estar conectado a tierra, permite que las partículas de polvo sigan las líneas del campo eléctrico y las corrientes de la pistola hacia el sustrato (Sathish Kumar et al., 2016).



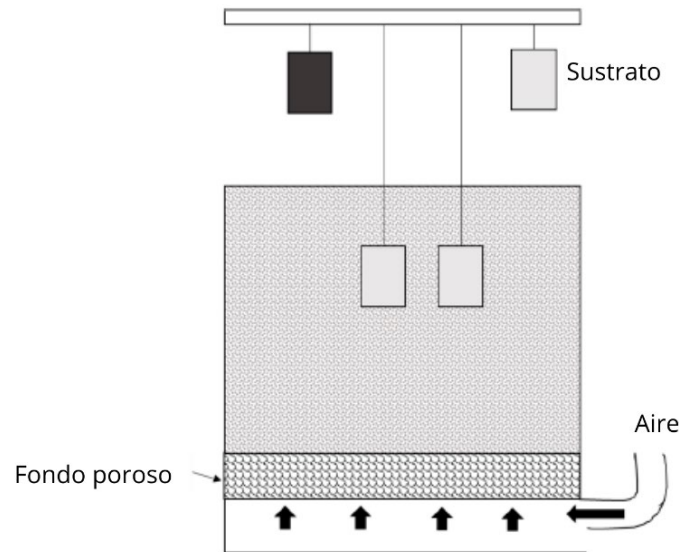
**Figura 19. Proceso de rociado electrostático (Imagen modificada de (Pélissier & Thierry, 2020)).**

Los sustratos se colocan en un horno con temperatura de 160-210° C para obtener el recubrimiento final sólido y resistente a la abrasión (Sathish Kumar et al., 2016).

El método de proceso de inmersión en lecho fluidizado es el método más antiguo de aplicación de recubrimientos en polvo, además, es muy distinto del rociado electrostático, debido a que el sustrato se sumerge en el lecho fluidizado después de ser precalentado. Una vez que el sustrato precalentado entra en contacto con el polvo, este se funde y forma la película (Pélissier & Thierry, 2020).

El lecho fluidizado suele tener un contenedor de polvo y un suministro de aire que están separados por un fondo poroso. El polvo se fluidifica por el paso del aire a través de la parte porosa, lo cual se asemeja a un líquido en ebullición. A medida que aumenta el grosor de las partículas fundidas, el recubrimiento se convierte en una capa aislante térmica, de modo que la temperatura en la superficie del recubrimiento disminuye, llegando a una fase en la que no se adhieren más

partículas a la superficie. Las últimas partículas que se adhieren a la superficie recubierta no se funden completamente, por lo que el sustrato debe trasladarse a un horno para completar la fusión (Pélissier & Thierry, 2020). A continuación, se muestra dicho proceso en la figura 20.



**Figura 20. Método de lecho fluidificado (Imagen modificada de (Pélissier & Thierry, 2020)).**

#### *Ventajas de uso*

La tecnología de uso de recubrimientos decorativos y protectores basados en recubrimientos en polvo tiene diversas ventajas en contraste con los recubrimientos de sistemas fluidos. Una de sus principales ventajas radica en que no existe pérdida de producto, ya que sólo el material que entra en contacto directo con el sustrato se retiene sobre la pieza; el exceso de polvo se recupera y reutiliza casi en su totalidad, lo que reduce gastos económicos. Sin embargo, el sistema de recuperación del polvo, al igual que todos los equipos utilizados en la aplicación se deben de limpiar, darle mantenimiento y utilizarse regularmente con filtros adecuados para evitar la contaminación cruzada al utilizar otro recubrimiento (Gioia et al., 2015).

Otra ventaja se presenta en el suministro a las plantas de construcción, ya que este tipo de recubrimiento se puede suministrar completamente preformados, es decir, que no necesitan ser preparados y mezclados, además de que la viscosidad de la mezcla no es una propiedad que necesite ser regulada. De igual forma, no se

necesitan de varias capas de recubrimiento, ya que usualmente se usa una capa única de recubrimiento en polvo, lo que hace eficiente el tiempo de producción del revestimiento (Gots et al., 2019).

Los dispositivos de rociado para los revestimientos en polvo son más caros que los utilizados para aplicar recubrimientos líquidos, sin embargo, debido al poco desperdicio de polvo, a largo plazo son rentables, lo que significa un beneficio adicional a las empresas. En términos económicos, las unidades que han cambiado sus líneas de pintura de piezas a recubrimientos en polvo, han notado un aumento significativo en la tasa de producción, además de una reducción de piezas defectuosas (Golgoon et al., 2018).

Además, al no contener disolvente alguno, los gastos de energía de la línea de producción se reducen, ya que no se requiere equipos adicionales para la purificación y el manejo de aire. Tanto el método de rociado electrostático como el de lecho fluidificado, permiten la automatización de la producción, el cual beneficia a la empresa al disminuir el personal operativo y aumentar la capacidad de producción (Gots et al., 2019).

En el método de rociado electrostático, en comparación con la pulverización aérea convencional de revestimientos húmedos (como los de alto contenido de sólidos), la pulverización electrostática consigue una mayor cobertura del sustrato porque el polvo tiende a envolver las esquinas y a recubrir las superficies que no están a la vista con la pistola. Esto da lugar a un menor exceso de pulverización y a una mayor transferencia del recubrimiento (Sathish Kumar et al., 2016).

En cualquier método utilizado para la aplicación del polvo, los tiempos de curado son cortos en comparación con los recubrimientos convencionales, ya que las temperaturas del horno que se utiliza son elevadas, esto reduce el tiempo de producción de piezas (Golgoon et al., 2018).

#### *Desventajas de uso*

La calidad del recubrimiento en polvo es influenciada por varios factores, entre ellos: la pieza a recubrir, la preparación de la superficie, el método de aplicación, el tipo

de horno, el entorno y el clima. Cada uno de estos factores puede dar lugar a dificultades que aparecen cuando el polvo se fluidifica, como pequeños agujeros, hinchamiento y manchas. A menudo, parece que los defectos sólo aparecen después de aplicar un recubrimiento, pero a veces, estas desventajas también aparecen después de un tiempo de uso. Algunos de los inconvenientes que se crean en los revestimientos en polvo son problemas de humedad y formación de cráteres (Golgoon et al., 2018).

Mientras que la ausencia de disolvente elimina el problema de inflamabilidad, las suspensiones de polvo en el aire pueden explotar. En consecuencia, las instalaciones de fabricación y aplicación deben diseñarse para evitar esto, además, una buena limpieza e ingeniería de operación, pueden mantener el proceso sin este problema (Jones et al., 2017).

Otro inconveniente del uso de recubrimientos en polvo es que no permite el uso de cualquier sustrato. Debido a que se necesitan hornos con altas temperaturas, no todos los materiales son adecuados para este tipo de tecnología, es por ello, que el mercado de los recubrimientos en polvo prácticamente se ha mantenido en metales. De igual forma, el tamaño del sustrato es limitado, ya que necesita entrar en los hornos (Jones et al., 2017).

Otro problema es la apariencia. Los efectos de apariencia que se pueden obtener con recubrimientos líquidos son difíciles de obtener con los recubrimientos en polvo. Por ejemplo, el emparejamiento de color y brillo, algo que es muy importante, por ejemplo, en la industria automotriz.

De manera más específica, el uso del método de rociado electrostático puede provocar defectos en la película, ya que los iones de aire atrapados pueden desarrollar imperfecciones en la superficie, como cráteres (Sathish Kumar et al., 2016).

Algunas de las limitaciones de los recubrimientos en polvo pueden superarse haciendo dispersiones acuosas (lodos) de polvos. Esto elimina el potencial de explosiones de pólvora, amplía la gama de métodos de aplicación y reduce los

problemas de estabilidad de almacenamiento (Jones et al., 2017). Sin embargo, aumenta el problema de controlar la viscosidad del producto para evitar defectos de película como los que se comentaron en las desventajas de los recubrimientos con alto contenido de sólidos.

#### *Avances recientes en los recubrimientos en polvo para metales*

Debido a que la mayoría de los aglutinantes usados en recubrimientos son preparados industrialmente a partir de materias primas derivadas de recursos no renovables, se han realizado varios estudios para incorporar la isosorbida, que es un monómero proveniente de recursos renovables para sintetizar poliésteres. Los revestimientos preparados tuvieron buena resistencia a los solventes y al agua, excelentes propiedades de impacto, estabilidad a largo plazo, alta dureza y resistencia a la intemperie similar a que se obtiene con recubrimientos en polvo convencionales (Gioia et al., 2015).

El grafeno, al igual que en la tecnología de recubrimientos a base de agua, es un material de gran interés para el desarrollo de recubrimientos anticorrosivos de alta eficiencia, por lo que también se ha introducido en los recubrimientos en polvo. Se pueden preparar mezclando bajo agitación mecánica, fundiendo y extruyendo a partir del uso de una extrusora de doble tornillo y luego triturando el material, de esta manera, se pueden obtener compuestos en polvo más pequeños. Estudios indican que la adición de una cantidad moderada de óxido de grafeno para preparar recubrimientos en polvo, pueden promover significativamente el rendimiento anticorrosivo de los metales (X. Li et al., 2019).

De igual manera, se ha introducido el uso de nanomateriales (en recubrimientos a base de agua) y de materiales híbridos (en recubrimientos con alto contenido de sólidos). Para recubrimientos en polvo, el desarrollo de nanomateriales híbridos ha permitido la fabricación de recubrimientos orgánicos con propiedades mecánicas mejoradas, resistencia al desgaste y que pueden mantener sus propiedades de barrera por más tiempo en ambientes agresivos (Maria Fernández-Álvarez et al., 2020).

Por ejemplo, se ha propuesto la adición de nanopartículas de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) a recubrimientos de poliamida en polvo, donde los resultados revelaron mejoras en las propiedades mecánicas y de desgaste al añadir 1% en peso de nanosílice (María Fernández-Álvarez et al., 2020).

De igual forma, se ha estudiado el efecto del nanosílice en recubrimientos epoxi, donde se observa que tienen un mejor rendimiento y menos grietas al añadir óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) entre 1% y 2% en peso, además de evitar el desgaste por exposición a rayos UV, esto se ha atribuido al hecho de que la nanosílice absorbe la radiación ultravioleta (María Fernández-Álvarez et al., 2021).

Para contrarrestar la desventaja de las altas temperaturas de curado, se han desarrollado recubrimientos en polvo con curado UV, los cuales se pueden utilizar principalmente en sustratos sensibles a la temperatura como lo son la madera y ciertos plásticos (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021).

#### 2.4.4 Recubrimientos de curado UV

La tecnología de curado UV es una técnica de polimerización respetuosa con el medio ambiente y que puede ejecutarse en ausencia de disolvente, por lo tanto, tiene una emisión de COV muy baja. Tiene una alta velocidad de curado y buenas propiedades mecánicas y térmicas, debido a la alta reticulación del recubrimiento. Esta tecnología abre el camino a nuevas aplicaciones potenciales, en particular, a la protección de materiales sensibles al calor (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021; Noè et al., 2021).

En general, la formulación de un recubrimiento de curado UV contiene un aglutinante convertible, el cual forma la red reticulada de polímero, un diluyente capaz de reducir la viscosidad de la resina y un sistema fotoiniciador, el cual absorberá la luz y dará paso a la reacción de polimerización.

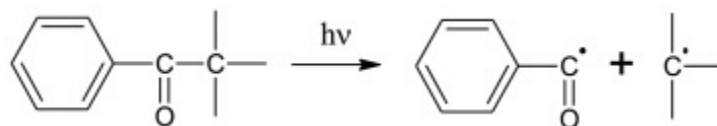
Algunos de los primeros y más importantes avances en recubrimientos curables por UV, se realizaron en la industria del acabado de maderas, a partir de entonces, la experiencia adquirida en esta área extendió la aplicación de esta tecnología a más sustratos como plásticos, metales, alambres, tuberías y pisos de vinilo. Se puede

considerar la forma más rápida y eficaz de transformar un monómero líquido sin disolventes en un polímero reticulado a temperatura ambiente (He et al., 2017).

Existen principalmente dos mecanismos de polimerización utilizados para recubrimientos de curado UV: vía radicales libres o catiónica. La polimerización se produce a partir de una reacción en cadena iniciada por especies reactivas de fotoiniciador generadas por irradiación UV. Es esencial el uso de fotoiniciadores en este proceso porque la mayoría de los monómeros no son capaces de crear de manera efectiva las partículas reactivas bajo radiación UV (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021; Noè et al., 2021).

#### *Curado UV por radicales libres*

La fotopolimerización por radicales libres se produce como un mecanismo típico de polimerización por radicales y con las mismas etapas: iniciación, propagación y terminación. Durante el proceso, el fotoiniciador bajo radiación UV forma radicales libres a través de la ruptura homolítica del enlace carbono-carbono (C-C), dando dos radicales capaces de iniciar la polimerización, esto se muestra en la figura 21. Posteriormente, esos radicales reaccionan con los dobles enlaces de los monómeros, resinas y moléculas de reticulación. Los monómeros utilizados en este tipo de polimerización son los acrilatos, metacrilatos y maleatos (Andrzejewska, 2019; Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021).



**Figura 21. Esquema de ruptura de un fotoiniciador en dos radicales libres (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021).**

Hoy en día, este tipo de fotopolimerización domina en la industria, esto debido a su bajo costo y a la gran cantidad de monómeros disponibles comercialmente y fotoiniciadores de radicales libres, lo que da diversidad al tipo de combinaciones que se pueden utilizar en la formulación (Nowak et al., 2017).



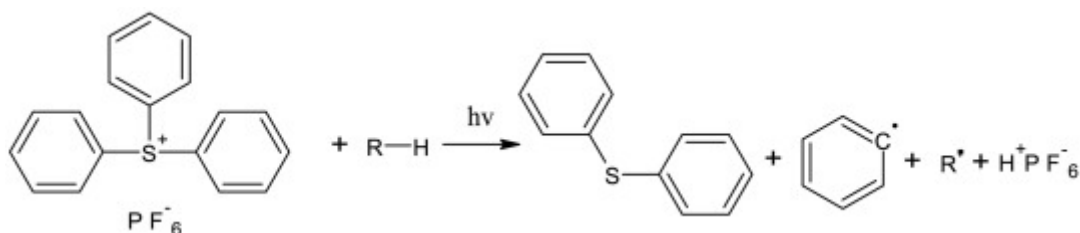
No obstante, estos sistemas presentan una desventaja que es la “inhibición por oxígeno”, un efecto que ocurre durante la reacción donde el oxígeno de la atmósfera puede reaccionar con uno de los radicales libres o con cadenas de polímero en crecimiento, lo que provoca una menor conversión y, por lo tanto, una menor reticulación y propiedades mecánicas pobres en el recubrimiento, así como menor brillo y superficies pegajosas (Andrzejewska, 2019; Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021).

Para superar los problemas asociados a la inhibición por oxígeno, existen numerosas estrategias, las cuales se basan en la modificación de las condiciones de polimerización (como inertización de gas o uso de barreras físicas), así como en la modificación de monómeros o aditivos (Hermann et al., 2020).

#### *Curado UV catiónico*

La fotopolimerización catiónica, es un método de curado alternativo que es insensible al oxígeno, es decir, no sucede la inhibición por oxígeno. No obstante, puede verse afectada por la humedad. Las moléculas de agua o alcohol reaccionan con intermediarios catiónicos y terminan la polimerización. De igual forma, en la reacción de curado UV catiónico, los cationes no reaccionan entre sí, contrariamente a lo que sucede en la reacción de radicales libres y en ausencia de aniones nucleófilos, la reticulación puede continuar después de la exposición a una fuente de radiación, lo que se conoce como efecto de curado oscuro (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021; Nowak et al., 2017).

Usualmente, los fotoiniciadores para la polimerización catiónica son sales de ácidos fuertes, tales como sales de yodonio, sulfonio, fosfonio y piridinio; que están compuestas de un lado catiónico orgánico y un lado aniónico inorgánico, tal como se muestra en la figura 22. Debido a su fotosensibilidad, se someten a una fotólisis directa tras la irradiación UV, lo que produce ácidos fuertes con los correspondientes contraaniones, así como cationes radicales y ambos inician la polimerización catiónica (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021; Nowak et al., 2017).



**Figura 22. Esquema de ruptura de un fotoiniciador tipo catiónico (Czachor-Jadacka & Pilch-Pitera, 2021).**

El lado catiónico es el componente que absorbe la luz, por lo tanto, la estructura del catión controla las características de absorción de UV y la fotosensibilidad. Por otro lado, el anión determina la fuerza del ácido formado durante la fotólisis y su correspondiente eficacia de iniciación, además, también determina el carácter del par de iones que se propaga. Esto tiene un impacto directo sobre la cinética de polimerización y la tasa de terminación (Sangermano et al., 2018).

Otra ventaja que presenta este método es que los monómeros empleados en el curado (epóxidos y éteres vinílicos) UV catiónico se caracterizan por una ausencia de características tóxicas o de irritación, a diferencia de los sistemas de acrilato y metacrilato empleados habitualmente en el método de radicales libres. De igual forma, se observa una menor contracción después del curado, lo que genera menos tensiones residuales en los materiales curados e induce mejores propiedades de adhesión en diferentes sustratos, en comparación al mecanismo de radicales libres (Sangermano et al., 2018).

### *Fuente de luz*

Además de las propiedades químicas de la resina, el diluyente y los posibles aditivos, la fuente de luz y el fotoiniciador juegan un papel clave en el paso inicial del proceso de polimerización. Las fuentes de luz utilizadas de forma convencional para el curado UV, son lámparas de vapor a presión que contienen usualmente mercurio o gases nobles, ya que emiten un amplio espectro de líneas múltiples (Dreyer & Mildner, 2016).

Desafortunadamente, este tipo de lámparas pueden presentar ciertos inconvenientes. Funcionan a temperaturas muy altas y la mayor parte de la energía

se desperdicia en forma de calor y luz visible, lo que reduce la vida útil de la bombilla debido a la degradación. Además, el calor producido puede tener efectos indeseables sobre la polimerización, como el calentamiento de la resina durante el proceso de curado, es decir, la degradación térmica del polímero (Darani et al., 2017; Dreyer & Mildner, 2016).

A partir de estas dificultades, se ha impulsado el uso de LED para el curado UV. Los sistemas que utilizan este método han mostrado tener una vida útil más larga y una intensidad de luz más estable, ya que la luz emitida por estos tiene un rango de longitud de onda relativamente estrecho que se puede adaptar para un fotoiniciador distinto, resultando en una máxima absorción. De igual forma, no puede ocurrir un sobrecalentamiento debido a la ausencia de emisión de radiación infrarroja, lo que resulta en una larga vida útil del LED (Darani et al., 2017; Dreyer & Mildner, 2016).

No obstante, es importante destacar que el fotoiniciador utilizado en la formulación necesita cumplir con los requisitos estrictos de longitud de onda de absorción, ya que, de no ser adecuado, puede afectar el curado del sistema.

Para lograr un curado exitoso de fotopolímeros, se deben tener en cuenta tres aspectos principales relacionados con la fuente de luz: la longitud de onda de la luz para alcanzar una absorción efectiva por parte del fotoiniciador, la irradiancia, es decir, la densidad de potencia de la radiación y la duración de la exposición a la luz en la muestra (Dreyer & Mildner, 2016).

### *Ventajas de uso*

La tecnología de curado UV usa la energía de los fotones de una fuente de radiación para formar especies reactivas, lo que permite iniciar de forma inmediata la polimerización en cadena, es decir, permite la rápida transformación de una mezcla de resina líquida en un material sólido a temperatura ambiente. Por lo tanto, además de ser libre de solventes orgánicos, la principal ventaja de esta tecnología es la velocidad de curado. El tiempo de curado es de un orden de magnitud de segundos o minutos, en comparación con los recubrimientos tradicionales que suelen ser de horas o días (Liu et al., 2020).

Simultáneamente, al ser la velocidad de curado más grande que en recubrimientos convencionales, el consumo de energía es menor, lo que representa una ventaja económica.

En comparación con los recubrimientos en polvo, no necesitan altas temperaturas de curado, lo que permite el uso de distintos tipos de sustratos que sean sensibles al calor, además de disminuir el consumo de energía del proceso. De igual forma, el equipo utilizado en la aplicación disminuye, esto debido a que se requieren unidades más pequeñas comparadas con los hornos de aplicación para los recubrimientos en polvo (Su et al., 2020).

Otra ventaja que presenta es que puede complementarse con otra tecnología de recubrimientos. Como se ha mencionado con anterioridad, se han creado diversas formulaciones donde se añaden fotoiniciadores a recubrimientos base agua y en polvo, dando solución a ciertas deficiencias y combinando lo mejor de las propiedades de ambas tecnologías.

#### *Desventajas de uso*

La distancia entre el polímero y la fuente de luz UV, juega un papel importante en el curado y las propiedades finales del recubrimiento: a una mayor distancia de la fuente de luz, el grado de reticulación es menor. Por lo tanto, solamente hojas planas o formas muy simples pueden ser revestidas de manera eficiente, lo que limita el uso de piezas irregulares (Ren et al., 2020).

Otra limitación se puede presentar debido al uso de pigmentos en la formulación. La presencia de pigmentos en el interior de los recubrimientos puede limitar la penetración de la radiación UV en el polímero, debido a que los pigmentos pueden absorber la radiación, reduciendo así la eficacia del proceso de curado. Además, los pigmentos suelen aumentar la viscosidad de la pintura, lo que la hace más frágil (Somani, 2019). Esto provoca que la profundidad de curado sea limitada, lo que significa que no se pueden obtener recubrimientos con un alto grosor, algo que es importante para la manufactura en ciertas industrias (Ren et al., 2020).

Sin embargo, se ha observado que el tratamiento térmico posterior al curado UV podría eliminar tales desventajas. Para llevar esto a cabo, se necesitaría agregar un agente de curado térmico y un acelerador de curado a la mezcla. Asimismo, se ha visto que los sistemas de curado dual UV/térmico aumentan el grado de reticulación, lo que a su vez mejora la resistencia mecánica, resistencia a disolventes y la estabilidad térmica de la muestra curada, por lo tanto, son una excelente solución a las principales limitaciones del curado UV convencional (Ren et al., 2020).

Adicionalmente, la fotopolimerización que implica reacciones de reticulación da lugar a un defecto de “contracción” relativamente alto. La contracción es causada por espacios superpuestos que ocupan moléculas individuales, lo que provoca diversos problemas durante el proceso de curado como reducción de la adherencia al sustrato y superficies irregulares. Además, debido al fenómeno de contracción, el material genera una tensión interna innecesaria, por lo que a largo plazo se causan deformaciones en el sustrato. Existen varios métodos para controlar la contracción, entre ellos se encuentran el cambiar la condición de curado UV, la adición de componentes inertes y el ajuste de las estructuras de los monómeros utilizados; siendo este último el más eficiente (Park et al., 2018).

Adicionalmente, una buena adhesión al sustrato es una propiedad complicada de lograr para los recubrimientos curables por radiación UV aplicados a metales, ya que no hay solvente en el sistema que ayude a humedecer la superficie, además de que no se cuenta con una alta temperatura para aliviar las tensiones internas dentro del recubrimiento. Por ello, es importante el uso de distintos aditivos que puedan prevenir este tipo de dificultades (Jafarzadeh et al., 2011).

#### *Avances recientes en recubrimientos de curado UV en metales*

Uno de los materiales que han llamado la atención en el ámbito de la investigación es el metal prevestido o “pre-coated metal” en inglés (PCM), que son hojas de metal recubiertas por una película, el cual se fabrica en una línea de recubrimiento de láminas, donde se procesa y ensambla en fábricas de electrodomésticos, materiales de construcción entre otras. En estas fábricas, el proceso de pintura se puede eliminar usando PCM, por lo tanto, se ha visto como una alternativa para reducir la

emisión de solventes orgánicos. De igual forma, para recubrir el PCM, se utiliza la tecnología de curado UV, lo que provoca que la línea de producción tenga aún más beneficios ambientales (Choi, Lee, et al., 2019).

Generalmente, el PCM es un producto fabricado a partir de pinturas con resistencia a la corrosión, resistencia a los rayos UV, flexibilidad y resistencia química (Choi, Lee, et al., 2019). Por otro lado, la mayoría de los recubrimientos para PCM tienen aplicaciones limitadas debido a sus superficies de baja dureza, que pueden rayarse fácilmente por fricción o abrasión. No obstante, el proceso “sol-gel” se utiliza generalmente para asegurar un recubrimiento óptimo en PCM (Choi, Kim, et al., 2019).

La manufactura de recubrimientos vía sol-gel, involucra la evolución de redes inorgánicas a través de la formación de una suspensión coloidal (sol) y la gelación del sol para formar una red polimérica porosa en fase líquida, estos procesos ocurren a partir de un compuesto organometálico que se hidroliza para obtener el sol y su posterior condensación a estado gel (Bautista Ruiz, 2018). Se ha observado que el método de sol-gel basados en silanos organofuncionales, beneficia a los PCM, ya que mejora las propiedades mecánicas, dureza, estabilidad térmica y la adhesión (Choi, Kim, et al., 2019).

Por otro lado, el uso de acrilatos dendríticos para recubrir los PCM, han mostrado tener buenas propiedades mecánicas y al utilizarse la tecnología de curado UV, muestran una reducción en la contracción, uno de los principales inconvenientes de los recubrimientos curables por UV (Choi, Lee, et al., 2019).

El método sol-gel con curado UV también ha mostrado tener propiedades anticorrosivas como pretratamiento de superficies metálicas que no tengan capa de imprimación. Adicionalmente, se ha encontrado que los pretratamientos de sol-gel con UV alcanzan un grado de curado muy alto en 7 días a temperatura ambiente, lo que presenta una gran ventaja en comparación con sustratos con postratamiento térmico costoso (Asemani et al., 2020).

Otra línea de investigación para la resistencia a la corrosión de metales es el uso de polímeros conductores, principalmente la polianilina (PANI). Se ha sugerido que la protección contra la corrosión proporcionada por la polianilina es de naturaleza anódica, es decir, desplaza el potencial del sustrato metálico en la dirección positiva donde la corriente de corrosión es muy baja. En general, la protección activa de la polianilina se debe a la propiedad reversible de redox. Como resultado, puede facilitar la formación y estabilización de una capa protectora de óxido en la interfaz metal/recubrimiento por su alto poder oxidante (Jafarzadeh et al., 2016).

La polianilina reducida puede volver a oxidarse con el oxígeno presente en el sistema, por lo tanto, se generan reacciones redox continuas. Estas reacciones ayudan a bloquear posibles poros y defectos en el recubrimiento. Se ha observado que el uso del 1% en peso de polianilina dopada con ácido fosfórico (PANI-PA), en una matriz de acrilato de poliéster curable por UV aplicada sobre acero al carbono pulido; crea una red conductora conectada a través de la película, lo que permite una protección efectiva contra la corrosión en un largo plazo (Jafarzadeh et al., 2016).

Así como el uso de grafeno ha destacado en otras tecnologías sustentables, los recubrimientos curados por UV no son excepción. Se ha estudiado que el óxido de grafeno puede mejorar las propiedades anticorrosivas de recubrimientos con nanocompuestos a base de acrilato de poliuretano, ya que se une químicamente a la matriz de polímero (Y. Ma et al., 2020).

#### 2.4.5 Otras tecnologías

Además de los recubrimientos a base de agua, con alto contenido de sólidos, en polvo y de curado UV; existen otras tecnologías donde se tiene como beneficio la reducción de COV en las formulaciones. Sin embargo, en comparación con las tecnologías anteriormente mencionadas, no es su enfoque principal. A continuación, se describen.

### *Disolventes verdes*

Reemplazar los solventes convencionales por solventes verdes es un campo muy amplio de investigación y desarrollo (Häckl & Kunz, 2018). Para ello, se han propuesto 12 criterios a considerar para que un solvente sea considerado verde, entre los que se encuentran: disponibilidad a gran escala, precios no volátiles, reciclables, biodegradables, con buen rendimiento, estables, preparados mediante un proceso de ahorro de energía y con toxicidad e inflamabilidad insignificantes (Gu & Jérôme, 2013).

Lo anterior no significa que un solvente tenga que cumplir con todos los criterios, ya que en realidad no existe un solvente absolutamente verde. Siempre dependerá del contexto de aplicación y es un término relativo.

Los solventes amigables con el medio ambiente o bio-solventes, se derivan principalmente del procesamiento de cultivos agrícolas y son considerados una fuente alternativa a los sintetizados vía petroquímica. Por ejemplo, los solventes derivados del ácido láctico ( $C_3H_6O_3$ ), se utilizan ampliamente como disolventes en la industria de pintura y recubrimientos, ya que poseen varias ventajas como ser 100% biodegradables, no corrosivos, fáciles de reciclar, no cancerígenos y no causan daños en la capa de ozono (Nanda et al., 2021).

Tienen atractivas ventajas para la aplicación en la industria de recubrimientos debido a su baja tensión superficial, alto punto de ebullición, baja presión de vapor y alto poder de solvencia. En particular, el lactato de etilo es un recubrimiento popular para metales, madera y poliestireno; ya que se ha podido reemplazar a solventes comunes como el xileno y tolueno, lo que resulta en un lugar de trabajo más seguro (Nanda et al., 2021).

Actualmente, los productos químicos como líquidos iónicos, polietilenglicol, lactato de etilo, agua, metanol, acetona, nitrometano, etanol, dimetilformamida (DMF), dimetilsulfóxido (DMSO), amoniaco, acetonitrilo, hexametilfosforamida (HMPA), piridina etc., son los disolventes verdes más importantes (Nanda et al., 2021). En la tabla 6 se muestran los principales disolventes categorizados como verdes.



**Tabla 6. Principales solventes verdes sintetizados (Calvo-Flores et al., 2018).**

Solvente	Estructura molecular	Solvente	Estructura molecular
Agua		Butanol (obtenido de biomasa)	
Metanol		2-Octanol (obtenido de biomasa)	
1-Propanol		1,3-propanodiol (obtenido de biomasa)	
2-propanol		1,3-butanodiol (obtenido de biomasa)	
Acetona		Glicerol	
Nitrometano		Carbonato de glicerol	
Etanol		Solcetal, (2,2-dimetil-1,3 dioxolano-4-metanol)	
Dimetilformamida (DMF)		Ácido láctico	
Dimetilsulfóxido (DMSO)		Lactato de etilo	
Amoniaco	$\text{NH}_3$	Acetato de etilo	
Acetonitrilo		2-metiltetrahidrofurano	
Hexametilfosforamida (HMPA)		$\gamma$ -Valerolactona	
Piridina		Dimetil isosorbida	
Polietilenglicol		Dihidroleovoglucosenona (Cirene)	
Polipropilenglicol		d-Limoneno (solvente industrial biodegradable)	
Polidimetilsiloxano (PDMS)		p-Cimeno (solvente industrial biodegradable)	
Dióxido de carbono supercrítico	$\text{CO}_2$	Metilsoyato (solvente industrial biodegradable)	No aplica
Etanol (obtenido de biomasa)			

Nota. (Imágenes obtenidas de ChemEssen, 2019; Royal Society of Chemistry, 2021).

Los líquidos iónicos son fluidos compuestos de iones a temperatura ambiente y son aplicados frecuentemente dentro de la química verde debido a que poseen bajo punto de fusión, insignificante presión de vapor y buena estabilidad térmica. Además, tienen baja combustibilidad, alta biodegradabilidad y propiedades de solvatación favorables para una variedad de compuestos no polares y polares (Nanda et al., 2021).

Sin embargo, es importante destacar que no todos los líquidos iónicos tienen una síntesis verde y que pueden llegar a tener una toxicidad alta. De forma general, existen dos clases de líquidos iónicos que pueden ser usados como solventes verdes. El primero comprende aquellos líquidos que consisten en cationes que se encuentran en el metabolismo de los seres vivos o que derivan de ello como la colina, betaína, carnitina o aminoácidos. La segunda clase incluye los líquidos que contienen grupos de óxido de etileno (Häckl & Kunz, 2018).

Además de los líquidos iónicos, existe una nueva generación de solventes verdes con el cual se han hecho investigaciones de recubrimientos, estos solventes son llamados eutécticos profundos, que pueden describirse como mezclas de aceptores de enlaces de hidrógeno (HBA) y donantes de enlaces de hidrógeno (HBD). Al mezclarse, forman líquidos con puntos de fusión muy por debajo de los componentes individuales debido a las interacciones de los enlaces hidrógeno. Poseen características similares a las de los líquidos iónicos, como volatilidad baja, amplia gama de compuestos, biodegradabilidad, biocompatibilidad entre otros (T. Li et al., 2019).

La principal diferencia entre los líquidos iónicos y los solventes eutécticos profundos, radica en que la fabricación de estos últimos siempre está asociada con costos significativamente más bajos y una operación simple: se puede producir un solvente eutéctico profundo al mezclar HBD y HBA a temperatura ambiente (T. Li et al., 2019).

Otra rama de solventes verdes son los aceites vegetales (VEGO), los cuales consisten principalmente en triglicéridos como componentes principales (entre el 93 y 98% en peso) y diglicéridos, monoglicéridos y fosfoglicéridos como componentes

menores. Los VEGO y derivados tienen aplicaciones como recubrimientos debido a sus atributos estructurales únicos y su tendencia a formar películas. Los derivados de VEGO generalmente sirven como solventes o diluyentes reactivos en recubrimientos, a menudo en combinación con resinas comerciales, donde también participan en las reacciones químicas que ocurren durante el curado de la película, por lo que forman parte inherente del material final (Sharmin et al., 2015).

Adicionalmente, en los últimos años varios proyectos de asociaciones público-privadas se han centrado en el descubrimiento y la ampliación de nuevos solventes verdes. Para la industria de pinturas y recubrimientos, destaca el proyecto ECOBIOFOR del año 2014, el cual recibió 2,3 millones de euros de financiación de la Unión Europea para desarrollar disolventes de base biológica específicamente para esta industria, lo que dio como resultado versiones de base biológica de solventes petroquímicos, así como un nuevo diluyente reactivo y posibles nuevos candidatos a solventes (Zhenova, 2020).

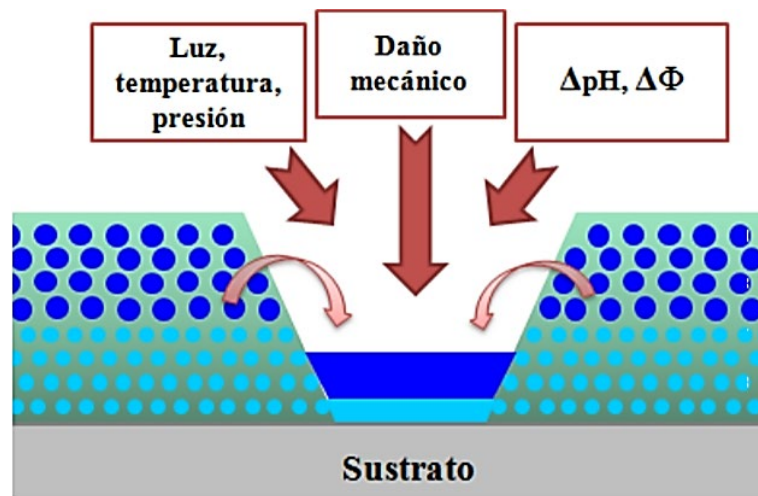
### *Recubrimientos funcionales inteligentes*

Los recubrimientos funcionales inteligentes son aquellos que han sido diseñados para ofrecer una funcionalidad adicional a las propiamente intrínsecas de los recubrimientos (como protección y decoración). Tienen como principal propósito el integrar agentes de autocuración dentro de la formulación, lo que conduce a la recuperación parcial o total del recubrimiento ante cualquier deterioro (Nazeer & Madkour, 2018; Tomero, 2018).

La funcionalidad de los recubrimientos inteligentes no está constantemente activa, sino que únicamente se desencadena bajo un estímulo. Por lo tanto, para que un recubrimiento pueda considerarse inteligente, además de ser funcional y proteger al sustrato, debe ser capaz de detectar el estímulo y responder de una manera perceptible (Nazeer & Madkour, 2018; Tomero, 2018).

De manera general, los estímulos externos pueden ser la humedad, presión, pH, concentración de ion  $Cl^-$ , un daño mecánico, la temperatura o luz; en la figura 23 se muestra de manera esquemática el proceso. Ejemplos de recubrimientos

inteligentes incluyen sistemas antimicrobianos, conductores, antiincrustantes, autocurativos, autolimpiadores, entre otros (Tomero, 2018; Ulaeto et al., 2017).



**Figura 23. Estímulos externos en recubrimientos inteligentes (Tomero, 2018).**

Para la industria de metales, el recubrimiento inteligente de mayor interés es el anticorrosivo, ya que puede recuperar o incluso mejorar la capacidad anticorrosiva del recubrimiento con poca intervención manual. Los recubrimientos anticorrosivos inteligentes implican principalmente la incorporación de inhibidores de corrosión, así como otros pigmentos y aditivos inhibidores en las matrices de polímero para proporcionar los efectos innovadores de detección de corrosión, autocuración, autolimpieza y características antiincrustantes; mejorando así las propiedades generales de barrera. Las características anteriores en las matrices de polímero retienen las reacciones de corrosión en gran medida, dentro de la vida útil de la formulación de revestimiento (Cui et al., 2020; Ulaeto et al., 2017).

El recubrimiento inteligente se activa inmediatamente con el comienzo de la corrosión en el sistema, y el inhibidor de corrosión o agente curativo transportado en la matriz del revestimiento llena de manera activa el defecto. Por lo anterior, previene las reacciones catódicas y anódicas de corrosión y reducen la velocidad en la que se forma (Ulaeto et al., 2017).

Otra gran ventaja que presentan los recubrimientos anticorrosivos inteligentes es el reducir tanto el uso de otros recubrimientos, así como los costos de mantenimiento

de los sustratos metálicos, lo que causa que de manera indirecta se reduzcan las emisiones de COV. Además, es compatible con tecnologías sustentables como alto contenido de sólidos, uso de agua como solvente, curado UV y en polvo (Faccini et al., 2021; Palumbo, 2019).

En este ámbito, se han preparado diversos recubrimientos entre los que destacan:

- Recubrimientos de inhibición de corrosión con alto contenido de sólidos, con una modificación del aglutinante junto con inhibidores de corrosión autocurativos como la lignina o aceite de cártamo (Devadasu et al., 2021).
- Recubrimientos compuestos de polímero y láminas de grafeno autorregenerables (Cui et al., 2021),
- Recubrimientos activados por fluorescencia o cambio de color que permiten visualizar las áreas con corrosión, así como el uso de nanoencapsulación de los indicadores para aislarlos de la matriz del recubrimiento y no sean liberados por otros estímulos (L. Ma et al., 2021).

El futuro de estos recubrimientos tiene como objetivo contribuir enormemente a la eficiencia energética, la reducción de la contaminación, la sostenibilidad y la rentabilidad en la protección contra la corrosión (Ulaeto et al., 2017).

### 3. Discusión

La investigación bibliográfica detallada del presente trabajo monográfico de actualización indica lo siguiente:

En el capítulo 2.1 se abordaron los aspectos generales de las pinturas y recubrimientos, los componentes en su formulación y la gran importancia que tienen dentro de la sociedad; donde se destaca la compleja relación que se necesita entre el aglutinante, pigmento, solvente y aditivos para obtener buenas propiedades mecánicas. Asimismo, esta compleja relación siempre dependerá del tipo de sustrato que se requiera recubrir, así como del tipo de ambiente al cuál estará expuesto y el sector al que estará dirigido (industrial, decorativo, arquitectónico, aeroespacial, marítimo etc.).

Igualmente, se examinó la importancia de los recubrimientos para metales debido a la corrosión a la que están expuestos, donde se acentúan tanto las pérdidas económicas como los desastres y accidentes en la industria debido a este fenómeno. En cuestión de funcionalidad, los recubrimientos son la solución adecuada para evitar estas situaciones.

En el capítulo 2.2 se expuso la grave situación actual de emisiones de compuestos orgánicos volátiles por solventes, donde se enfatizan los efectos que tienen en la atmósfera como la formación de ozono troposférico y de smog fotoquímico, lo que provoca efectos graves en la salud de los seres humanos y en el medio ambiente. Entre los efectos en la salud más significativos, se encuentra la interacción sinérgica del ozono con infecciones virales, ya que ha tomado una relevancia importante por la situación actual de pandemia por COVID-19. Por lo anterior, es indudable que se necesitan acciones para disminuir los COV que producen ozono troposférico, y de esta forma evitar que los efectos que provocan escalen.

De forma complementaria, otro de los efectos considerables del ozono troposférico es el efecto mutagénico y genotóxico, ya que conduce a enfermedades mortales y a la posible transferencia a generaciones futuras. Además de que solamente la

exposición de COV, puede provocar diversas patologías que van desde síntomas leves hasta problemas crónicos.

De igual forma, se observa la escasa información que existe sobre la emisión de COV a nivel nacional en México. Esto debido a que, como se observa en la figura 14, el último reporte sobre contaminación ambiental es del año 2014 con actualizaciones en 2018, lo que significa que en tres años no se ha tenido información reciente sobre las emisiones de contaminantes por parte de una institución del gobierno como lo es la SEMARNAT.

Debido a la problemática de emisiones de COV al medio ambiente, se han realizado diversas regulaciones en todo el mundo para reducir el contenido de estos compuestos en recubrimientos. En México, la única regulación que existe en este aspecto es la Norma Oficial Mexicana NOM-123-SEMARNAT-1998, que establece el contenido máximo permisible de COV que producen ozono para únicamente 4 tipos de pintura. Comparando la tabla 2, la tabla 3 y la tabla 4; se puede observar que la regulación mexicana parece bastante ineficiente e inadecuada, ya que, en comparación con Estados Unidos y la Unión Europea, en las regulaciones de estos países se observa que consideran más categorías de pintura, lo que permite que las empresas puedan ubicar de mejor manera los productos que manufacturan ante estas regulaciones.

Además, en la regulación de la Unión Europea se puede notar que se tienen más restricciones en cuando al contenido de COV permisible. De igual manera, es importante destacar que Estados Unidos tiene una gran diversidad de regulaciones para todo tipo de recubrimientos, y la tabla 3 únicamente muestra algunos límites del contenido de COV para recubrimientos arquitectónicos.

A pesar de que existen proyectos para la modificación de la NOM-123-SEMARNAT-1998 y la creación de una nueva norma para establecer límites de COV en pinturas arquitectónicas, no se tiene una fecha de publicación y de ejecución de estas, algo que es de gran preocupación teniendo en cuenta el gran mercado de pinturas y recubrimientos en México, valorado en 3.2 billones de dólares en 2019.

En el capítulo 2.3 se aborda el tema de tecnología sustentable, concepto primordial para el desarrollo de soluciones a distintas problemáticas mundiales, entre los que se encuentran la contaminación ambiental. Mientras que, en el capítulo 4 se desarrollan a detalle las cuatro principales tecnologías sustentables en torno a la reducción de COV en formulaciones de recubrimientos: base agua, con alto contenido de sólidos, en polvo y curado UV.

Con base en la investigación realizada, se puede analizar que todas las tecnologías mostradas dentro del presente trabajo son eficientes para recubrir superficies metálicas; esto debido a que, aunque cada tecnología sustentable tiene desventajas, son áreas de oportunidad donde se siguen teniendo avances para evitar las diversas problemáticas y defectos de película que presenta cada una. Entre los avances recientes, la adición de nanopartículas, así como de grafeno y de materiales híbridos orgánicos-inorgánicos, se han destacado en su implementación en formulaciones de recubrimientos con bajo o nulo contenido de COV.

Sin embargo, la tecnología que es menos adecuada para este tipo de sustratos es la base acuosa, ya que con este tipo de recubrimiento los metales están más propensos a la oxidación instantánea, lo que significa un riesgo considerable en ciertas empresas, sobre todo en aquellas que manufacturan equipos que están expuestos en ambientes agresivos.

De manera general, la tecnología de recubrimientos con alto contenido de sólidos es la que presenta mayores desventajas en todos los sustratos, ya que se pueden tener un mayor número de defectos de película. Por lo tanto, esta tecnología será la segunda menos adecuada para recubrir metales, sin embargo, la mayoría de los defectos de película por utilizar la tecnología de altos sólidos está directamente relacionada con la viscosidad de la mezcla, por lo que solamente es necesario controlar esa propiedad para prevenir la formación de los defectos.

Por otra parte, los recubrimientos en polvo y por curado UV resultan ser las tecnologías más adecuadas para la reducción de solventes orgánicos en las formulaciones, así como para recubrir metales, ya que son las que menos desventajas presentan y con las cuales existe menor riesgo de corrosión.



Con respecto a los disolventes verdes y recubrimientos inteligentes, son una excelente opción innovadora para poder disminuir de manera indirecta los COV en formulaciones, pero se necesita más investigación a largo plazo, ya que se necesitan los componentes adecuados para ser idóneos.

Entonces, si las tecnologías sustentables mostradas son eficientes en sustratos metálicos, surge la crucial duda del por qué siguen existiendo de manera predominante los recubrimientos a base de solvente orgánico convencionales en el sector industrial. Con base en la investigación realizada, se pueden observar dos posibles causas:

1) *Falta de regulaciones competentes para el mercado actual de recubrimientos.*

Puesto que no se tiene una diversa clasificación de recubrimientos y pinturas, así como de restricciones más fuertes en el contenido de COV en la NOM-123-SEMARNAT-1998; las empresas mexicanas manufactureras no tienen una necesidad urgente de usar tecnologías sustentables en la formulación de la mayoría de sus productos. Además, el tener únicamente cuatro tipos de categorías de recubrimientos en la regulación, puede causar confusión en las empresas para poder identificar en qué categoría se encuentran sus productos, y de esta forma deslindarse de esta regulación.

2) *La demanda actual de los productos no ha permitido la introducción en una mayor escala de las tecnologías sustentables.*

Los consumidores de este mercado probablemente no tengan la conciencia ambiental debida para conocer a detalle lo que puede provocar la emisión de componentes orgánicos volátiles a la atmósfera. Un estudio reciente, informa que los dos factores principales que influyen en la adquisición de productos sustentables, es la actitud hacia la marca verde (conocimiento previo del consumidor sobre la sustentabilidad) y el eco-etiquetado (certificación ecológica con la cual se identifican características sustentables en un producto) (Estrada Domínguez et al., 2020).

Actualmente, casi todas las empresas dedicadas a la producción de recubrimientos tienen un posicionamiento verde y cuentan con productos

amigables con el medio ambiente a un precio accesible. Sin embargo, en el estudio anteriormente mencionado, se informa que estos dos factores no aportan a la intención del comprador por adquirir productos sustentables (Estrada Domínguez et al., 2020).

#### 4. Conclusiones

Se presentó una visión actual acerca de las tecnologías sustentables, desarrolladas en torno a la reducción de COV en formulaciones de recubrimientos para superficies metálicas.

La primera hipótesis que plantea que los recubrimientos sustentables para sustratos metálicos, fabricados a partir de nuevas tecnologías para disminuir el COV en su formulación, son igual de efectivas que las pinturas a base de solvente orgánico, es aceptada. Esto debido a que, comparando las ventajas y desventajas de cada tecnología sustentable, se determinó que todas las tecnologías presentadas son eficientes para proteger superficies metálicas. Las desventajas que se pueden presentar tienen áreas de oportunidad, las cuales la comunidad científica ha investigado y desarrollado soluciones eficaces.

Mientras que, la segunda hipótesis que sugiere que la mala concepción de sustentabilidad entre los consumidores del mercado de pinturas y recubrimientos causa el bajo desarrollo de nuevas tecnologías sustentables para la reducción de COV, es rechazada. Ya que, en realidad, la mala concepción de sustentabilidad entre los consumidores provoca que en las empresas no ocurra una implementación a gran escala de estas tecnologías.

Hoy en día, existe la suficiente información con respecto a las consecuencias de los COV en la salud y en el medio ambiente, así como de una gran variedad de soluciones para formular recubrimientos innovadores, que permitan un menor daño a nuestro entorno. Por lo tanto, para lograr que las tecnologías sustentables abarquen una mayor parte del sector industrial y de manera general en los sustratos metálicos, se necesita una mayor concientización de la población mexicana y la participación efectiva del gobierno para agilizar los procesos de regulaciones para esta industria.

## Referencias:

- 1) Abbasi, S. A., & Abbasi, T. (2017). Ozone in the Atmosphere. En *Ozone Hole* (pp. 1–12). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6710-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6710-0_1)
- 2) Agbo, C., Jakpa, W., Sarkodie, B., Boakye, A., & Fu, S. (2018). A Review on the Mechanism of Pigment Dispersion. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(6), 874–889. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1406367>
- 3) Alrashed, M. M., Jana, S., & Soucek, M. D. (2019). Corrosion performance of polyurethane hybrid coatings with encapsulated inhibitor. *Progress in Organic Coatings*, 130, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.02.005>
- 4) American Coatings Association. (2020). *The Paint and Coatings Industry: Making Essential Products, Supporting Critical Infrastructure*.
- 5) Anand, S. S., Philip, B. K., & Mehendale, H. M. (2014). Volatile Organic Compounds. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*, 4, 967–970. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00358-4>
- 6) Andrzejewska, E. (2019). Free-radical photopolymerization of multifunctional monomers. En *Three-Dimensional Microfabrication Using Two-Photon Polymerization* (2a ed., pp. 77–99). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817827-0.00002-3>
- 7) Asemani, H. R., Luo, L., & Mannari, V. (2020). Corrosion-resistant organic-inorganic hybrid pretreatments obtained by UV-initiated process suitable for primer-less coating systems. *Progress in Organic Coatings*, 147, 105878. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105878>
- 8) Ayala-Carcedo, F. J. (2004). La rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar (España) de 1998 y el desastre ecológico consecuente del río Guadiamar: causas, efectos y lecciones. *Boletín Geológico y Minero*, 115, 711–738.
- 9) Bafana, A., Krishnamurthi, K., Sivanesan, S., & Naoghare, P. K. (2018). Mutagenicity and genotoxicity testing in environmental pollution control. En *Mutagenicity: Assays and Applications* (pp. 113–132). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809252-1.00006-7>

- 10) Batakliiev, T., Georgiev, V., Anachkov, M., Rakovsky, S., & Zaikov, G. E. (2014). Ozone decomposition. *Interdisciplinary Toxicology*, 7, 47–59. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0008>
- 11) Bautista Ruiz, J. (2018). Caracterización Anticorrosiva y de Biocompatibilidad en Recubrimientos Silicio-Titanio-Zirconio Sintetizados Vía Sol-gel y Depositados sobre Sustratos 316L. *Información tecnológica*, 29, 201–210. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000100201>
- 12) Beetsma, J. (2014). *Coating Film Defects | Prospector*. <https://knowledge.ulprospector.com/451/pc-coating-film-defects/>
- 13) Bustillo Revuelta, M. (2021). Construction materials. En *Construction Materials Geology, Production and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1201/b12573-17>
- 14) California Air Resources Board. (2019). *Current Regulations*. [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-12/cp\\_all\\_regs\\_5-2019.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-12/cp_all_regs_5-2019.pdf)
- 15) Calvo-Flores, F. G., Monteagudo-Arrebola, M. J., Dobado, J. A., & Isac-García, J. (2018). Green and Bio-Based Solvents. *Topics in Current Chemistry*, 376. <https://doi.org/10.1007/s41061-018-0191-6>
- 16) CENAPRED. (2020). *Efeméride: A 28 años de las explosiones en Guadalajara*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/efemeride-a-28-anos-de-las-explosiones-en-guadalajara>
- 17) Challener, C. (2017). Waterborne Industrial Coatings: Regulatory Changes Slowly Driving Shift to Waterborne. *CoatingsTech*, 14, 36–41.
- 18) Challener, C. (2020). Waterborne Coating Technologies Steadily Advance Despite Challenges. *CoatingsTech*, 17, 34–41.
- 19) ChemEssen. (2019). *Mol-Instincts | Chemical Property Database*. <https://www.molinstincts.com/>
- 20) Chen, X., Wen, S. F., Feng, T., & Yuan, X. (2019). High solids organic-inorganic hybrid coatings based on silicone-epoxy-silica coating with improved anticorrosion performance for AA2024 protection. *Progress in Organic Coatings*, 139, 105374.

<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105374>

- 21) Choi, W. C., Kim, S. H., Lee, W. K., Nagappan, S., & Ha, C. S. (2019). UV-curable organic–inorganic hybrid hard coatings for metal sheets. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16(3), 771–780. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-00154-6>
- 22) Choi, W. C., Lee, W. K., & Ha, C. S. (2019). Low-viscosity UV-curable polyurethane acrylates containing dendritic acrylates for coating metal sheets. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16, 377–385. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0117-9>
- 23) Cortés Mura, H. G., & Peña Reyes, J. I. (2015). De la sostenibilidad a la sustentabilidad. Modelo de desarrollo sustentable para su implementación en políticas y proyectos. *Revista EAN*, 78, 40–54. <https://doi.org/10.21158/01208160.n78.2015.1189>
- 24) Cui, G., Bi, Z., Wang, S., Liu, J., Xing, X., Li, Z., & Wang, B. (2020). A comprehensive review on smart anti-corrosive coatings. *Progress in Organic Coatings*, 148(66), 105821. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105821>
- 25) Cui, G., Zhang, C., Wang, A., Zhou, X., Xing, X., Liu, J., Li, Z., Chen, Q., & Lu, Q. (2021). Research progress on self-healing polymer/graphene anticorrosion coatings. *Progress in Organic Coatings*, 155, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106231>
- 26) Cunningham, M. F., Campbell, J. D., Fu, Z., Bohling, J., Leroux, J. G., Mabee, W., & Robert, T. (2019). Future green chemistry and sustainability needs in polymeric coatings. *Green Chemistry*, 21, 4919–4926. <https://doi.org/10.1039/c9gc02462j>
- 27) Czachor-Jadacka, D., & Pilch-Pitera, B. (2021). Progress in development of UV curable powder coatings. *Progress in Organic Coatings*, 158, 106355. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106355>
- 28) Darani, M. K., Bastani, S., Ghahari, M., Kardar, P., & Mohajerani, E. (2017). NIR induced photopolymerization of acrylate-based composite containing upconversion particles as an internal miniaturized UV sources. *Progress in Organic Coatings*, 104, 97–103.

- <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.11.005>
- 29) de Jong, M. D. T., Huluba, G., & Beldad, A. D. (2020). Different Shades of Greenwashing: Consumers' Reactions to Environmental Lies, Half-Lies, and Organizations Taking Credit for Following Legal Obligations. *Journal of Business and Technical Communication*, 34, 38–76.  
<https://doi.org/10.1177/1050651919874105>
- 30) De la Cruz Pérez, A. (2019). El valor de la gestión de corrosión en la gestión de activos Un diagnóstico para el desarrollo competitivo de la Industria de Control de Corrosión. *Ciencia & Desarrollo*, 18, 85–91.  
<https://doi.org/10.33326/26176033.2019.24.789>
- 31) De With, G. (2018). *Polymer Coatings: A Guide to Chemistry, Characterization, and Selected Applications*. John Wiley & Sons.
- 32) Devadasu, S., Bagale, U., Sonawane, S. H., & Suranani, S. (2021). Development of ultra-high build self-healing coatings using amino silanized lignin nanocapsules. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5745–5751.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.576>
- 33) Diario Oficial de la Federación. (1999). *NORMA Oficial Mexicana NOM-123-ECOL-1998, Que establece el contenido máximo permisible de compuestos orgánicos volátiles (COVs), en la fabricación de pinturas de secado al aire base disolvente para uso doméstico y los procedimientos para la determinación*.  
[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4949693&fecha=14/06/1999](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4949693&fecha=14/06/1999)
- 34) Diario Oficial de la Federación. (2020). *PROGRAMA Nacional de Normalización 2020*.  
[https://www.snice.gob.mx/~oracle/SNICE\\_DOCS/17022020-noms\\_20200218-20200218.pdf](https://www.snice.gob.mx/~oracle/SNICE_DOCS/17022020-noms_20200218-20200218.pdf)
- 35) Diario Oficial de la Federación. (2021). *PROGRAMA Nacional de Infraestructura de la Calidad 2021*.  
[https://www.dof.gob.mx/2021/SEECO/ECONOMIA\\_250221.pdf](https://www.dof.gob.mx/2021/SEECO/ECONOMIA_250221.pdf)
- 36) Domingo, J. L., & Rovira, J. (2020). Effects of air pollutants on the transmission and severity of respiratory viral infections. *Environmental*

- Research*, 187, 109650. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109650>
- 37) Dreyer, C., & Mildner, F. (2016). Application of LEDs for UV-Curing. En *III-Nitride Ultraviolet Emitters* (pp. 415–434). <http://files/63/Kneissl - III-Nitride Ultraviolet emitters.pdf>
  - 38) Du, Z., Wen, S., Wang, J., Yin, C., Yu, D., & Luo, J. (2016). The Review of Powder Coatings. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 04, 54–59. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.43007>
  - 39) Ebrahim, T. Y. (2020). Clean and sustainable technology innovation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 45, 113–117. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.11.004>
  - 40) Ecco, L. G., Fedel, M., Deflorian, F., Becker, J., Iversen, B. B., & Mamakhel, A. (2016). Waterborne acrylic paint system based on nanoceria for corrosion protection of steel. *Progress in Organic Coatings*, 96, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.02.010>
  - 41) EPA. (2007). The Plain English Guide to the Clean Air Act. En *U.S. Environmental Protection Agency*.
  - 42) EPA. (2017). *Technical Overview of Volatile Organic Compounds*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
  - 43) EPA. (2020). *Method 24. Determination of volatile matter content, water content, density, volume solids, and weight solids of surface coatings*. U.S. Environmental Protection Agency.
  - 44) Estrada Domínguez, J. E., Cantú Mata, J. L., Torres Castillo, F., & Barajas Ávila, E. (2020). Factores que influyen en el consumidor para la adquisición de productos sustentables. *Interciencia*, 45, 36–41.
  - 45) Excelsior. (2015). *Oleoducto ocasiona derrame frente a la costa de California*. <https://www.excelsior.com.mx/global/2015/05/19/1025031>
  - 46) Faccini, M., Bautista, L., Soldi, L., Escobar, A. M., Altavilla, M., Calvet, M., Domènech, A., & Domínguez, E. (2021). Environmentally friendly anticorrosive polymeric coatings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/app11083446>



- 47) Farshchi, N., & Gedan-Smolka, M. (2020). Polyurethane Powder Coatings: A Review of Composition and Characterization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59, 15121–15132.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c02320>
- 48) Feal Veira, Á. (2020). Generación fotoquímica del ozono troposférico. *Industria Química*, 81, 34–42.
- 49) Fernández-Álvarez, María, Velasco, F., & Bautista, A. (2021). Performance of ultraviolet exposed epoxy powder coatings functionalized with silica by hot mixing. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1042–1057.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.094>
- 50) Fernández-Álvarez, Maria, Velasco, F., Bautista, A., Lobo, F. C. M., Fernandes, E. M., & Reis, R. L. (2020). Manufacturing and characterization of coatings from polyamide powders functionalized with nanosilica. *Polymers*, 12, 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym12102298>
- 51) Fitzsimons, B., & Parry, T. (2018). Coating Failures and Defects - A Comprehensive Field Guide. En *Corrosionpedia*.
- 52) Fraga López, F., Martínez Ageitos, J. ., & Castiñeiras Proupín, J. (2006). *Nuevas Tendencias y Tecnologías para un Desarrollo Sostenible*. Facultad de Ciencias de Lugo. <https://doi.org/10.13140/2.1.1604.6406>
- 53) Gioia, C., Minesso, A., Cavalieri, R., Marchese, P., Celli, A., & Colonna, M. (2015). Powder coatings for indoor applications from renewable resources and recycled polymers. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12, 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9655-6>
- 54) Giudice, C. A. (2014). Pinturas de altos sólidos I: Influencia de las propiedades de las resinas y de los solventes. *REC Recubrimientos*, 31, 10–19.
- 55) Goldschmidt, A., & Streitberger, H.-J. (2018). *BASF Handbook: Basics of Coating Technology* (3ª ed). Vincentz Network.  
<https://doi.org/10.1515/9783748600251>
- 56) Golgoon, A., Aliofkhazrae, M., & Toorani, M. (2018). Nanocomposite Protective Coatings Fabricated by Electrostatic Spray Method. *Protection of*

- Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 54, 192–221.  
<https://doi.org/10.1134/S207020511802017X>
- 57) Gots, V., Lastivka, O., Tomin, O., & Kovalchuk, O. (2019). Influence of film-forming components on the corrosion resistance of powder coating. *Materials Science Forum*, 968, 143–152.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.143>
- 58) Grulke, N. E., & Heath, R. L. (2020). Ozone effects on plants in natural ecosystems. *Plant Biology*, 22, 12–37. <https://doi.org/10.1111/plb.12971>
- 59) Gu, Y., & Jérôme, F. (2013). Bio-based solvents: An emerging generation of fluids for the design of eco-efficient processes in catalysis and organic chemistry. *Chemical Society Reviews*, 42, 9550–9570.  
<https://doi.org/10.1039/c3cs60241a>
- 60) Guo, M., Nowakowska-Grunt, J., Gorbanyov, V., & Egorova, M. (2020). Green technology and sustainable development: Assessment and green growth frameworks. *Sustainability*, 12. <https://doi.org/10.3390/su12166571>
- 61) Gupta, O. P. (2018). *Chemical Process Technology*. Khanna Books Publishing.
- 62) Gürses, A., Açıkyıldız, M., Güneş, K., & Gürses, M. S. (2016). *Classification of Dye and Pigments*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33892-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33892-7_3)
- 63) Guzman Rosas, A. A., & Ocampo C., L. M. (2011). Evaluación de la resistencia a la corrosión del sistema primer epoxico rico en zinc/acabado polisiloxano por medio de espectroscopia de impedancia electroquímica. *DYNA (Colombia)*, 78(167), 87–95.
- 64) Häckl, K., & Kunz, W. (2018). Some aspects of green solvents. *Comptes Rendus Chimie*, 21, 572–580. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.03.010>
- 65) Hamdy Makhoulouf, A. S., & Gajarla, Y. (2020). Advances in smart coatings for magnesium alloys and their applications in industry. En *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications* (pp. 245–261). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849870-5.00016-1>

- 66) Harris, D. R., & Casey, P. (2016). Formulating surface coatings. En A. E Hughes, J. M. C. Mol, M. L. Zheludkevich, & R. G. Buchheit (Eds.), *Active Protective Coatings: New-Generation Coatings for Metals* (Vol. 233, pp. 85–104). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7540-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7540-3_5)
- 67) He, Y., Yao, M., & Nie, J. (2017). Shrinkage in UV-Curable Coatings. En *Protective Coatings: Film Formation and Properties* (pp. 195–218). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51627-1>
- 68) Hermann, A., Burr, D., & Landry, V. (2020). Comparative study of the impact of additives against oxygen inhibition additives pendulum hardness and abrasion resistance for UV-curable wood finishes. *Progress in Organic Coatings*, 148, 105879. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105879>
- 69) Higgins, T. E. (2018). Hazardous waste minimization handbook. En *Hazardous Waste Minimization Handbook*. <https://doi.org/10.1201/9781351072854>
- 70) Höfer, R. (2012). Processing and Performance Additives for Coatings. En *Polymer Science: A Comprehensive Reference, 10 Volume Set* (Vol. 10). Ecosiris. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00273-9>
- 71) IARC. (2021). *List of Classifications – IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans*. International Agency for Research on Cancer. <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- 72) Jafarzadeh, S., Adhikari, A., Sundall, P. E., & Pan, J. (2011). Study of PANI-MeSA conducting polymer dispersed in UV-curing polyester acrylate on galvanized steel as corrosion protection coating. *Progress in Organic Coatings*, 70, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.10.011>
- 73) Jafarzadeh, S., Claesson, P. M., Sundell, P. E., Tyrode, E., & Pan, J. (2016). Active corrosion protection by conductive composites of polyaniline in a UV-cured polyester acrylate coating. *Progress in Organic Coatings*, 90, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.10.008>
- 74) Javadi, A., Cobaj, A., & Soucek, M. D. (2020). Commercial waterborne coatings. En *Handbook of Waterborne Coatings*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814201-1.00012-3>

- 75) Jones, F. N., Pappas, S. P., & Wicks, D. A. (2017). Organic Coatings: Science and Technology. En *Organic Coatings: Science and Technology*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470079072>
- 76) Kopeliovich, D. (2014). *Classification of paints*. Substances & Technologies: Knowledge source on Materials Engineering.
- 77) Koppmann, R. (2020). Chemistry of Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. En *Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate* (pp. 811–821). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3_24)
- 78) Lankem. (2019). *Floculación*. <https://www.lankem.com/post/floculación?lang=es>
- 79) Li, L., & Yang, Q. (2019). *Advanced Coating Materials*. Scrivener Publishing LLC. <https://doi.org/10.1002/9781119407652>
- 80) Li, T., Song, Y., Xu, J., & Fan, J. (2019). A hydrophobic deep eutectic solvent mediated sol-gel coating of solid phase microextraction fiber for determination of toluene, ethylbenzene and o-xylene in water coupled with GC-FID. *Talanta*, *195*, 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.11.085>
- 81) Li, X., Wang, F., & Mao, J. (2019). Preparation and properties of thermosetting powder/graphene oxide coatings for anticorrosion application. *Journal of Applied Polymer Science*, *136*, 1–8. <https://doi.org/10.1002/app.48264>
- 82) Lin, X., Zhang, S., & Qian, J. (2014). Synthesis and properties of a novel UV-curable waterborne hyperbranched polyurethane. *Journal of Coatings Technology and Research*, *11*, 319–328. <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9520-4>
- 83) Liu, F., Liu, A., Tao, W., & Yang, Y. (2020). Preparation of UV curable organic/inorganic hybrid coatings-a review. *Progress in Organic Coatings*, *145*, 105685. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105685>
- 84) Lokhande, G. P., & Jagtap, R. N. (2016). Design and synthesis of polymeric dispersant for water-borne paint by atom transfer radical polymerization. *Designed Monomers and Polymers*, *19*, 256–270.

<https://doi.org/10.1080/15685551.2015.1136534>

- 85) Lu, X., Zhang, L., & Shen, L. (2019). Meteorology and Climate Influences on Tropospheric Ozone: a Review of Natural Sources, Chemistry, and Transport Patterns. *Current Pollution Reports*, 5, 238–260.  
<https://doi.org/10.1007/s40726-019-00118-3>
- 86) Ma, L., Ren, C., Wang, J., Liu, T., Yang, H., Wang, Y., Huang, Y., & Zhang, D. (2021). Self-reporting coatings for autonomous detection of coating damage and metal corrosion: A review. *Chemical Engineering Journal*, 421, 127854. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127854>
- 87) Ma, Y., Ye, Y., Wan, H., Chen, L., Zhou, H., & Chen, J. (2020). Chemical modification of graphene oxide to reinforce the corrosion protection performance of UV-curable polyurethane acrylate coating. *Progress in Organic Coatings*, 141, 105547.  
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105547>
- 88) Madronich, S., Shao, M., Wilson, S. R., Solomon, K. R., Longstreth, J. D., & Tang, X. Y. (2015). Changes in air quality and tropospheric composition due to depletion of stratospheric ozone and interactions with changing climate: Implications for human and environmental health. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 14, 149–169. <https://doi.org/10.1039/c4pp90037e>
- 89) Mallard Creek Polymers. (2020). *Agglutinantes de látex serie Latex 101: Una descripción general*. <https://www.mcpolymers.com/es/library/latex-binders-101-an-overview>
- 90) Mania, D. J., Bruck, M. L., Fezzey, S., & Floyd, F. L. (2001). Sources of error in VOC determination via EPA method 24. *Journal of Coatings Technology*, 73(919), 111–117. <https://doi.org/10.1007/bf02698392>
- 91) McKeen, L. W. (2012). Environmentally Friendly Polymers. En *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* (pp. 287–304).  
<https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-3469-0.10013-x>
- 92) McKeen, L. W. (2016). The Components of Paint. En *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-37126-1.00003-5>

- 93) Montero Montoya, R., López Vargas, R., & Arellano Aguilar, O. (2018). Volatile Organic Compounds in Air: Sources, Distribution, Exposure and Associated Illnesses in Children. *Annals of Global Health*, 84, 225–238. <https://doi.org/10.29024/aogh.910>
- 94) Morillo, I. (2018). *Aznalcóllar, el desastre que pudo evitarse: ecologistas y un técnico alertaron del peligro*. El Confidencial. [https://www.elconfidencial.com/espana/andalucia/2018-04-25/aznalcollar-desastre-pudo-evitarse-ecologistas-alerta\\_1554645/](https://www.elconfidencial.com/espana/andalucia/2018-04-25/aznalcollar-desastre-pudo-evitarse-ecologistas-alerta_1554645/)
- 95) Nanda, B., Sailaja, M., Mohapatra, P., Pradhan, R. K., & Nanda, B. B. (2021). Green solvents: A suitable alternative for sustainable chemistry. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.458>
- 96) Nazeer, A. A., & Madkour, M. (2018). Potential use of smart coatings for corrosion protection of metals and alloys: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 253, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.027>
- 97) Noè, C., Iannucci, L., Malburet, S., Graillot, A., Sangermano, M., & Grassini, S. (2021). New UV-Curable Anticorrosion Coatings from Vegetable Oils. *Macromolecular Materials and Engineering*, 306, 1–11. <https://doi.org/10.1002/mame.202100029>
- 98) Nowak, D., Ortyl, J., Kamińska-Borek, I., Kukuła, K., Topa, M., & Popielarz, R. (2017). Photopolymerization of hybrid monomers: Part I: Comparison of the performance of selected photoinitiators in cationic and free-radical polymerization of hybrid monomers. *Polymer Testing*, 64, 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.10.020>
- 99) Orr & Boss Consulting Incorporated. (2020). The global coatings market in 2020. *Polymers Paint Colour Journal*, 210, 32–33.
- 100) Palomo Briones, R., Ríos del Toro, E., Calderón Soto, L. F., Bravo Vidales, Á. P., Gómez Muñoz, C. N., & Ocegüera Contreras, E. (2016). Compuestos contaminantes de la atmósfera: ¿cuáles son sus efectos? y, sobre todo, ¿cómo podemos eliminarlos? *Ciencia*, 67, 68–74.
- 101) Palumbo, G. (2019). Smart coatings for corrosion protection by adopting microcapsules. *Physical Sciences Reviews*, 1, 1–32.

- <https://doi.org/10.1515/psr-2015-0006>
- 102) Park, J. W., Shim, G. S., Lee, J. G., Jang, S. W., Kim, H. J., & Choi, J. N. (2018). Evaluation of UV curing properties of mixture systems with differently sized monomers. *Materials*, *11*, 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma11040509>
- 103) Parlamento Europeo, & Consejo de la Unión Europea. (2004). DIRECTIVA 2004/42/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de abril de 2004. En *Diario Oficial de la Unión Europea*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0042&from=EN>
- 104) Péliissier, K., & Thierry, D. (2020). Powder and High-Solid Coatings as Anticorrosive Solutions for Marine and Offshore Applications? A Review. *Coatings*, *10*. <https://doi.org/10.3390/COATINGS10100916>
- 105) Peralta, O., Ortínez Alvarez, A., Torres Jardón, R., Suárez Lastra, M., Castro, T., & Ruíz Suárez, L. G. (2021). Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, *761*, 143183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183>
- 106) Perez Seleni, J. (2019). *Protocolo para control en la corrosión interna en oleogasoductos de México*. [https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/83/Estacion total aplicada.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/83/Estacion%20total%20aplicada.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- 107) Petrovic, Z. (2016). Catastrophes caused by corrosion. *Military Technical Courier*, *64*(4), 1048–1064. <https://doi.org/10.5937/vojtehg64-10388>
- 108) Poma, A., Colafarina, S., Aruffo, E., Zarivi, O., Bonfigli, A., Di Bucchianico, S., & Di Carlo, P. (2017). Effects of ozone exposure on human epithelial adenocarcinoma and normal fibroblasts cells. *PLoS ONE*, *12*, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184519>
- 109) Pourhashem, G. (2020). Coating a Sustainable Future. *Coatings*, *10*. <https://doi.org/10.3390/COATINGS10080713>
- 110) Rajkumar, S. (2017). Safety Security and Risk Management - Aftermath Bhopal Disaster. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, *2*(6), 180–183. <https://doi.org/10.15406/ijbsbe.2017.02.00044>

- 111) Ren, Y., Dong, Y., Yang, R., & Yao, Y. (2020). Preparation and properties of ultraviolet/thermal dual-curable polyurethane acrylate. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 99, 102580.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102580>
- 112) Restrepo, V. (2021). *Aún no desaparecen los solventes*. INPRA Latina.  
<https://www.zonadepinturas.com/201009151977/articulos/pinturas-y-recubrimientos/aun-no-desaparecen-los-solventes.html>
- 113) Rodríguez, S. (2020). Sector automotriz impulsará las ventas de la industria de pinturas y tintas, estima gremio. *Milenio*.  
<https://www.milenio.com/negocios/sector-automotriz-impulsara-ventas-industria-pinturas>
- 114) Rodríguez Santos, E. G. (2017). *Recubrimientos compósitos: Alternativa para reducir el impacto ambiental ocasionado por corrosión húmeda*. Instituto Politécnico Nacional.
- 115) Rojas, J. T. (2018). ¿Base agua o base solvente? *INPRA LATINA*, 23, 18–21. <https://issuu.com/latinpressinc/docs/inpra23-4todaweb>
- 116) Royal Society of Chemistry. (2021). *ChemSpider | Search and share chemistry*. <http://www.chemspider.com/>
- 117) Sahoo, P., Das, S. K., & Paulo Davim, J. (2017). Surface Finish Coatings. *Comprehensive Materials Finishing*, 3–3, 38–55.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09167-0>
- 118) Salata, R. R., Pellegrine, B., & Soucek, M. D. (2019). Synthesis and properties of a high solids triethoxysilane-modified alkyd coatings. *Progress in Organic Coatings*, 133, 340–349.  
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.037>
- 119) Salimifard, P., & Reynoso, J. (2019). Volatile Organic Compounds and Air Fresheners. *Building Evidence For Health: Harvard University*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20849.10084>
- 120) Sangermano, M., Roppolo, I., & Chiappone, A. (2018). New horizons in cationic photopolymerization. *Polymers*, 10.  
<https://doi.org/10.3390/polym10020136>



- 121) Sarkar, A., & Jayaram, R. V. (2018). A Comparative Study of Properties of Acrylic Based Water-Borne Polymers Using Various Surfactants for Adhesive Applications. *Polymer Science - Series B*, 60, 629–637.  
<https://doi.org/10.1134/S1560090418050147>
- 122) Sathish Kumar, P., Rajasekar, R., Pal, S. K., Nayak, G. C., & Syed Ismail, S. M. R. (2016). Paints and coating of multicomponent product. En *Springer Series in Materials Science* (Vol. 223, pp. 157–226).  
[https://doi.org/10.1007/978-94-017-7324-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7324-9_7)
- 123) SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC.  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>
- 124) Sharmin, E., Zafar, F., Akram, D., Alam, M., & Ahmad, S. (2015). Recent advances in vegetable oils based environment friendly coatings: A review. *Industrial Crops and Products*, 76, 215–229.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.022>
- 125) Shikha, D. (2018). Waterborne Coatings: An Alternative of Conventional Coatings. *IJSRSET*, 4, 962–966.
- 126) Shrivastava, A. (2018). Polymerization. En *Introduction to Plastics Engineering* (pp. 17–48). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1201/9781315140322-1>
- 127) Simões, A. (2015). Organic Coatings. En M. C. Gonçalves & F. Margarido (Eds.), *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design* (pp. 780–800). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_2)
- 128) Soleimani, M., Bagheri, E., Mosaddegh, P., Rabiee, T., Fakhar, A., & Sadeghi, M. (2021). Stable waterborne epoxy emulsions and the effect of silica nanoparticles on their coatings properties. *Progress in Organic Coatings*, 156(October 2020), 106250.  
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106250>
- 129) Somani, S. (2019). Renewable materials and green processes for future coating technologies. *ardar Vallabhbai National Institute of Technology*.

- [https://www.academia.edu/37942381/Renewable\\_materials\\_and\\_green\\_processes\\_for\\_future\\_coating\\_technologies](https://www.academia.edu/37942381/Renewable_materials_and_green_processes_for_future_coating_technologies)
- 130) Soucek, M. D., & Salata, R. R. (2015). Alkyd Resin Synthesis. En S. Kobayashi & K. Müllen (Eds.), *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* (pp. 12–17). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29648-2>
- 131) Stenke, A. (2020). Natural control on ozone pollution. *Nature Climate Change*, *10*, 101–105. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0686-3>
- 132) Su, Y., Lin, H., Zhang, S., Yang, Z., & Yuan, T. (2020). One-Step synthesis of novel renewable vegetable oil-based acrylate prepolymers and their application in UV-curable coatings. *Polymers*, *12*. <https://doi.org/10.3390/POLYM12051165>
- 133) Talbert, R. (2008). *Paint Technology Handbook*. CRC Press.
- 134) Tennebroek, R., van der Hoeven-van Casteren, I., Swaans, R., van der Slot, S., Stals, P. J. M., Tuijtelaars, B., & Koning, C. (2018). Water-based polyurethane dispersions. *Polymer International*, *68*, 832–842. <https://doi.org/10.1002/pi.5627>
- 135) Toledo, A. (2020). Señaló ANAFAPYT, panorama de la industria de pinturas, tintas y recubrimientos | *Revista Auto Motores Informa*. Auto Motores Informa. <http://www.automotores-rev.com/senalo-anafapyt-panorama-de-la-industria-de-pinturas-tintas-y-recubrimientos/>
- 136) Tomero, C. Z. (2018). *Recubrimientos anticorrosivos inteligentes y medioambientales aceptables basados en nanopartículas de sílice*.
- 137) U.S. Government Information. (2016). *40 CFR 59 National Volatile Organic Compound Emission Standards For Consumer And Commercial Products*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2019-title40-vol6/xml/CFR-2019-title40-vol6-part59.xml>
- 138) Ulaeto, S. B., Rajan, R., Pancrecius, J. K., Rajan, T. P. D., & Pai, B. C. (2017). Developments in smart anticorrosive coatings with multifunctional characteristics. *Progress in Organic Coatings*, *111*, 294–314. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.06.013>
- 139) Valavanidis, A. (2016). Green Chemistry and New Technological

Developments: New Avenues for the Green Economy and Sustainable Future of Science and Technology. *Department of Chemistry: University of Athens*, 1–33. [www.chem.uoa.gr](http://www.chem.uoa.gr)

- 140) Visser, P., Terryn, H., & Mol, J. M. C. (2016). Aerospace Coatings. En Anthony E. Hughes, J. M. C. Mol, M. L. Zheludkevich, & R. G. Buchheit (Eds.), *Active Protective Coatings* (Vol. 233, pp. 59–84). [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7540-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7540-3_4)
- 141) Wang, H., Zhang, C., Zhou, Y., & Zhou, Q. (2020). Improvement of Corrosion Resistance and Solid Content of Zinc Phosphate Pigmented Alkyd Coating by Methacrylated Cardanol. *Materials Today Communications*, 24, 101139. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101139>
- 142) Webster, D. C., & Ryntz, R. A. (2017). Pigments, Paints, Polymer Coatings, Lacquers, and Printing Inks. En J. A. Kent, T. Bommaraju, & S. D. Barnicki (Eds.), *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology* (pp. 805–822). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52287-6>
- 143) World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.
- 144) Wu, Y., Wen, S., Chen, K., Wang, J., Wang, G., & Sun, K. (2019). Enhanced corrosion resistance of waterborne polyurethane containing sulfonated graphene/zinc phosphate composites. *Progress in Organic Coatings*, 132, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.013>
- 145) Xu, Y., Li, M., & Liu, M. (2019). Corrosion and fouling behaviors of phosphatized Q235 carbon steel coated with fluorinated polysiloxane coating. *Progress in Organic Coatings*, 134, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.079>
- 146) Zhang, J. J., Wei, Y., & Fang, Z. (2019). Ozone Pollution: A Major health Hazard Worldwide. *Frontiers in Immunology*, 10, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>
- 147) Zhenova, A. (2020). Challenges in the development of new green solvents for polymer dissolution. *Polymer International*, 69, 895–901. <https://doi.org/10.1002/pi.6072>

- 148) Zhou, S., Wu, Y., Zhao, W., Yu, J., Jiang, F., & Ma, L. (2018). Comparative corrosion resistance of graphene sheets with different structures in waterborne epoxy coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 556, 273–283.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.08.045>
- 149) Zvonkina, I., & Soucek, M. (2016). Inorganic-organic hybrid coatings: Common and new approaches. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 11, 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.01.008>