

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:
INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA CORROSIÓN INDUSTRIAL
**ESTUDIO DIAGNÓSTICO POR ÁREAS Y RECOMENDACIÓN DE SISTEMAS DE
RECUBRIMIENTOS COMO PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE
ESTRUCTURAS DE ACERO EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE PAPEL TISÚ**

PRESENTADO POR:
NÉSTOR ULISES FIGUEROA MONTALVO
ANGEL ISAAC MEJIA CANDELARIO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO QUIMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.SC. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA INTERINA:

ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

UNIVERSIDAD DEL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN:

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA CORROSIÓN INDUSTRIAL

**ESTUDIO DIAGNÓSTICO POR ÁREAS Y RECOMENDACIÓN DE SISTEMAS DE
RECUBRIMIENTOS COMO PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DE
ESTRUCTURAS DE ACERO EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE PAPEL TISÚ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

**NÉSTOR ULISES FIGUEROA MONTALVO
ANGEL ISAAC MEJIA CANDELARIO**

DOCENTE ASESOR:

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2023

TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR

ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PEREZ

Dedicatoria

A mis abuelos, Salvador Morán y Joaquín Montalvo, que viven por siempre en mis recuerdos. Mi único deseo es que sientan orgullo en llamarme su descendencia, y mi único lamento es no poder celebrar con ustedes este pequeño logro de mi vida.

Néstor Ulises Figueroa Montalvo

A mi esposa Sara, que me apoyó desde un inicio, y por ser la mayor motivación en todo el recorrido de mi carrera profesional; y a mis padres, que me apoyaron para poder iniciar.

Angel Isaac Mejia Candelario

Agradecimientos

A mi familia, por la paciencia y soporte que me han brindado durante mi experiencia universitaria. Le extiendo mi admiración y agradecimientos a todos los docentes que me impartieron asignaturas y contribuyeron a mi desarrollo estudiantil. A los amigos que encontré en los pasillos de la Facultad, y que elevaron mi espíritu en momentos de dificultad, les reservo un afecto irremplazable y finalmente me uno a ustedes como un graduado de la Universidad de El Salvador. Bendiciones a todos.

Néstor Ulises Figueroa Montalvo

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme haber iniciado y finalizado todo lo que ha sido este largo camino. Llegado este momento, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a lo largo de todo este trayecto: A mis padres y hermanos por su ayuda y apoyo al inicio, que sin ellos no hubiera podido comenzar. A un par de compañeros de estudio que llegado este momento son profesionales, y a un profesional que me apoyo en último año. Agradezco especialmente a mi esposa Sara que ha estado presente durante toda mi carrera, acompañándome en mis desvelos desde el comienzo y hasta el final, apoyándome cuando todo se miraba difícil de continuar y con muchas dificultades, pero siempre estuvo ahí dándome ánimos para salir adelante y levantarme una y otra vez para poder culminar mis estudios. Agradezco su amor y paciencia durante todo este tiempo.

Angel Isaac Mejia Candelario

Resumen

Las instalaciones industriales dedicadas a la producción de artículos de primera necesidad se enfrentan al reto logístico de ejecutar planes de mantenimiento sobre estructuras y equipos que nunca dejan de operar. Las fábricas de papel tisú pertenecen a este grupo, con la evidencia reciente que le brindó a la humanidad la pandemia del COVID-19, en que la mayoría de supermercados se vieron en la necesidad de establecer límites de compra de las presentaciones comerciales de esta clase de papel (higiénico, toallas para cocina, entre otros), luego de que en cuestión de horas después de declarada la emergencia de salud los estantes del producto fueron vaciados.

Puesto que el acero es el metal más utilizado para la fabricación de equipos, maquinaria e instalaciones industriales, su mantenimiento es de especial interés para las fábricas de papel que procuran prevenir interrupciones a su proceso de operación continua. Es por esto que se ejecutó un recorrido visual de una fábrica de papel tisú y se identificaron áreas críticas de producción sometidas a la acción no cesante de los fenómenos de corrosión. Estas áreas fueron observadas desde un enfoque técnico a través de un protocolo para estimar la categoría de agresividad a la que las estructuras metálicas se encuentran expuestas; a partir de ello, se hizo una recomendación de los sistemas de recubrimientos genéricos adecuados para proteger dichas estructuras en base a la Norma ISO 12944:2018.

Índice

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1: Marco conceptual referencial.....	2
1.1. Objetivos	2
1.1.1. General.....	2
1.1.2. Específicos	2
1.2. Justificación	2
1.3. Planteamiento del problema	3
CAPÍTULO 2: Marco teórico	4
2.1. Generalidades del proceso de producción de papel	4
2.1.1. Preparación y manejo de materia prima	5
2.1.2. Fabricación de pulpa de madera.....	6
2.1.3. Blanqueamiento de pulpa	9
2.1.4. Fabricación del papel	12
2.2. Descripción general de la corrosión y sus clasificaciones	16
2.2.1. Corrosión uniforme.....	17
2.2.2. Corrosión galvánica	17
2.2.3. Corrosión por picaduras	18
2.2.4. Corrosión debida a esfuerzos	18
2.2.5. Corrosión intergranular	19
2.3. Estándar ISO 12944:2018	19
2.3.1. Categorías de ambientes corrosivos.....	20
2.3.2. Tipos genéricos de recubrimientos	21
2.3.3. Durabilidad	23
2.3.4. Sistema de recubrimientos.....	23
2.3.5. Preparación de superficie	24
CAPÍTULO 3: Método y resultados.....	26
3.1. Método.....	26
3.2. Criterios de evaluación de categoría de corrosividad	26

3.2.1. Temperatura	26
3.2.2. Humedad	27
3.2.3. Naturaleza química del ambiente.....	27
3.3. Resultados	27
3.3.1. Áreas de categoría C3	27
3.3.2. Áreas de categoría C4	29
Conclusiones.....	31
Recomendaciones	32
Bibliografía	33
Anexos	35
Anexo 1: Esquema de cilindros de formación de la máquina Valmet NTT 200HS Advantage	355
Anexo 2: Protocolo de observación de áreas	36
Anexo 3: Ejemplo de llenado de protocolo	38
Anexo 4: Esquemas iconográficos de áreas dentro de la planta de papel tisú.....	40

Índice de figuras

Figura 2.1: Diagrama de flujo simplificado de una planta integrada de pulpa y papel	4
Figura 2.2: Esquema de una máquina de descortezado de troncos.	5
Figura 2.3: Astilladoras de madera usadas comúnmente en la industria de pulpa y papel	6
Figura 2.4: Diagrama de flujo simplificado del 'termo-mechanical pulping (tmp)'.	7
Figura 2.5: Diagrama de flujo simplificado del pulpeo 'kraft'.....	9
Figura 2.6: Equipos componentes de etapas de blanqueamiento.....	11
Figura 2.7: Diagrama de flujo de la secuencia ECF.....	11
Figura 2.8: Esquema general de un pulper de dilución utilizado en reciclaje de fibra.....	13
Figura 2.9: Esquema general de un pulper para mezcla de pulpa blanqueada	14
Figura 2.10: Plano de máquina de papel tissue.....	14
Figura 2.11: Estructura y esquema general del cilindro Yankee	15
Figura 2.12: Celda electroquímica de $Zn/Cu^{2+} Zn^{2+}/Cu$	17

Figura 2.13: Corrosión por picaduras	18
Figura 2.14: Directrices generales para aplicar la norma ISO 12944:2018 en un proyecto.....	19
Figura 2.15: Etiluretano.....	22

Índice de tablas

Tabla 2.1: Procesos de fabricación de pulpa de madera para producción de papel.....	6
Tabla 2.2: Nomenclatura de etapas de blanqueamiento	10
Tabla 2.3 Parámetros típicos de operación para etapas de blanqueamiento libre de cloro	11
Tabla 2.4: Parámetros típicos de operación para secuencias de blanqueamiento con cloro.....	12
Tabla 2.5: Categorías de corrosividad de acuerdo al estándar ISO 12944:2018	20
Tabla 2.6: Términos y descripciones abreviadas en ISO 12944-5:2018	24
Tabla 2.7: Procedimientos para preparación de superficie.....	25
Tabla 3.1: Sistemas de recubrimientos recomendados para áreas de corrosividad C3	28
Tabla 3.2: Sistemas de recubrimientos recomendados para áreas de corrosividad C4	29

Introducción

La corrosión es un desafío constante que compromete la integridad y eficiencia de las estructuras metálicas instaladas en las plantas industriales. La diversidad de sustancias químicas utilizadas en los procesos, temperatura, y humedad son condiciones propicias para la degradación de equipos, maquinaria, e incluso edificaciones, y son los factores que en conjunta presencia constituyen un *ambiente*. Para evitar el daño provocado por la corrosión, las estructuras de acero normalmente se protegen de diferentes maneras para soportar las tensiones a las que se someterán durante su período de servicio. La Norma ISO 12944:2018 trata sobre la protección mediante sistemas de recubrimientos y abarca, en diferentes apartados, todas las características que son importantes para su aplicación estandarizada. .El presente trabajo detalla la ejecución de un estudio tipo diagnóstico, no experimental, en que se categorizaron los ambientes corrosivos presentes en diferentes áreas de producción de una planta de producción de papel tisú, con el propósito de elaborar una recomendación técnica de los sistemas de recubrimiento o pinturas adecuadas para proteger las estructuras metálicas ubicadas en dichos ambientes y prolongar su vida útil. Se espera que este documento sea un precursor del conocimiento técnico necesario para llevar a cabo una implementación similar de la normativa internacional de recubrimientos corrosivos en la industria de papel salvadoreña u otros rubros de producción similares.

CAPÍTULO 1: Marco conceptual referencial

1.1. Objetivos

1.1.1. *General*

Presentar una recomendación de los sistemas de recubrimientos adecuados para contrarrestar el efecto de la corrosión sobre estructuras de acero en diferentes áreas y equipos de una planta de fabricación de papel tisú

1.1.2. *Específicos*

- a. Identificar los ambientes corrosivos a los cuales las estructuras y equipos de acero están expuestas considerando las diferentes áreas y etapas de producción dentro de la planta de fabricación de papel tisú
- b. Establecer los sistemas de recubrimientos adecuados para proteger al acero contra el ambiente corrosivo específico al que está expuesto de acuerdo con normativas técnicas internacionales.

1.2. Justificación

Para la mayoría de las industrias, la corrosión representa un problema de mantenimiento que de ignorarse trae efectos no deseados: desde la contaminación de productos hasta la pérdida o mal funcionamiento de un equipo o estructura metálica. Con la mayoría de los esfuerzos dirigidos a mitigar el deterioro corrosivo de los fluidos del proceso en el interior de los equipos y tuberías, no debe ignorarse el deterioro ocasionado sobre éstos en la sección externa por el ambiente al que se encuentran expuestos. La aplicación de una o más películas delgadas de recubrimientos de formulación específica sobre la superficie metálica (también llamada sustrato) es una de las alternativas prácticas para controlar la corrosión y puede servir a otros propósitos, como la identificación de tuberías, equipos o áreas en base a códigos de color, resistencia a la intemperie, entre otras.

El desafío central de implementar un sistema de recubrimientos es la selección adecuada de los productos que se utilizarán para proteger la superficie, afortunadamente, organizaciones como la ISO (*International Organization for Standardization*) y la SSPC

(*Society for Protective Coatings*) han estandarizado los revestimientos genéricos necesarios para cumplir valores específicos de vida útil frente a diferentes categorías de ambientes. El principal beneficio de este trabajo de aplicación es ser una documentación académica inicial de las categorías de ambientes que existen en la industria de papel salvadoreña, que servirá para presentar una propuesta de implementación de la norma ISO 12944:2018 que contrarrestará de manera efectiva y práctica la corrosión en sus instalaciones.

1.3. Planteamiento del problema

El papel tisú, anglicismo de la palabra *tissue* (“tejido”) es aquel tipo de papel de bajo gramaje, fino, y absorbente fabricado a través de una acción mecánica conocida como crepado (Herrera S., 2019), que genera micro arrugas en la superficie a través de la ruptura controlada de fibras, y es usualmente fabricado en capas dependiendo del uso doméstico al que es dirigido (e.g., cocina, sanitario, etc.). La industria encargada de fabricar en masa este producto es uno más de los sectores industriales que se ven afectados por el problema generalizado e inevitable de la corrosión: en los Estados Unidos de América se estimó el costo anual, directo y total debido a corrosión en toda la industria de papel y pulpa de madera a 6 billones de dólares para el año 2006 (Dykastra, 2006).

Dentro de los métodos de control de la corrosión, los sistemas de recubrimiento son una alternativa práctica para proteger las secciones exteriores de los equipos y estructuras metálicas, sometidos primordialmente a la acción de deterioro del ambiente y en menor medida a factores como fluidos de proceso o desgaste mecánico. El problema del trabajo de aplicación consiste en establecer, de acuerdo a la norma ISO 12944:2018, uno o más sistemas de recubrimientos óptimos que protejan las estructuras metálicas externas (acero, primordialmente), equipos y maquinaria en diferentes áreas o sectores de una planta de fabricación de papel tissue como función de factores relevantes al fenómeno de corrosión (i.e., temperatura y humedad) y considerando aspectos de viabilidad global (i.e., costo relativo, facilidad de ser incorporado al programa de mantenimiento existente, entre otros).

CAPÍTULO 2: Marco teórico

2.1. Generalidades del proceso de producción de papel

La pulpa para papel y sus derivados es fabricada a partir de materias primas que contienen fibras de celulosa, generalmente madera, papel reciclado, y residuos agrícolas. En países en vías de desarrollo, aproximadamente el 60% de fibras de celulosa destinadas a producción de papel provienen de materias primas como el bagazo de caña, paja de cereales, bambú, jute, entre otros (Gullichsen, 2000). Las etapas comunes a los procesos de fabricación de papel se muestran en la Figura 2.1, y a grandes rasgos se trata de un proceso en que un material fibroso es convertido a pulpa, y luego la pulpa es convertida a papel.

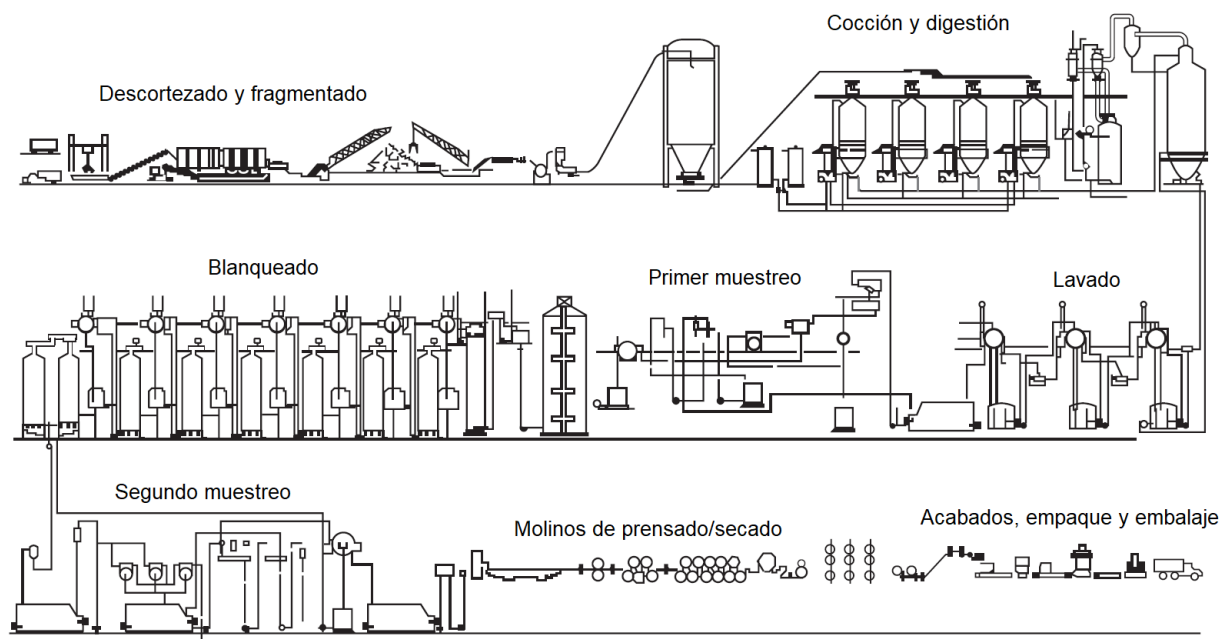


Figura 2.1: Diagrama de flujo simplificado de una planta integrada de pulpa y papel, adaptado de (Bajpai, 2010)

La elaboración de pulpa tiene como principal objetivo digerir la madera en fibras de celulosa y separarlas de la lignina, un componente de las fibras vegetales cuya presencia es indeseable en el papel. Luego de un muestreo que garantice que el contenido de lignina ha sido reducido al mínimo posible, la pulpa de madera se sigue procesando de acuerdo con el grado de papel que se intenta producir, y posteriormente es blanqueada,

secada y prensada para producir pliegos de papel. La Figura 2.1 muestra un diagrama de flujo simplificado de una planta de producción integrada, es decir, la fabricación de pulpa de madera y los molinos de prensado y secado existen en una misma instalación.

2.1.1. Preparación y manejo de materia prima

Cuando se usa madera como materia prima, el descortezado de los troncos es el paso inicial para garantizar producto libre de suciedad. El uso de un cilindro hueco rotativo con sierras y relieves interiores es el método más común de descortezado, su apariencia exterior se muestra en la Figura 2.2. La corteza es removida del tronco por acción de la fricción entre troncos y contra la estructura interna del cilindro. Se puede hacer uso de agua a la entrada del procedimiento para ablandar la corteza. La corteza residual es incinerada en hornos como combustible, y cuando ha sido humedecida en el proceso es prensada para eliminar el contenido de agua antes de ser quemada.



Figura 2.2: Esquema de una máquina de descortezado de troncos. Fuente: sitio web de [Valmet](#) (agosto de 2023)

El descortezado genera aproximadamente 4-5% de residuos de madera y aunque el equipo es relativamente económico, consume una gran cantidad de energía (Russel, 2006). Luego del descortezado, los troncos son aserrados en astillas de tamaño apropiado para ser convertidas en pulpa. En la Figura 2.3 puede observarse el diseño más común de astilladora usada en la industria de pulpa y papel, que es la de disco con una serie de cuchillas montadas radialmente a lo largo de la cara. Las astillas de tamaño

aceptable son aisladas de las demasiado grandes o pequeñas haciéndolas pasar todas por cribas vibratorias multietapa, para luego ser transportadas en bandas transportadoras a almacenamiento, en espera de ser utilizadas en la fabricación de pulpa.

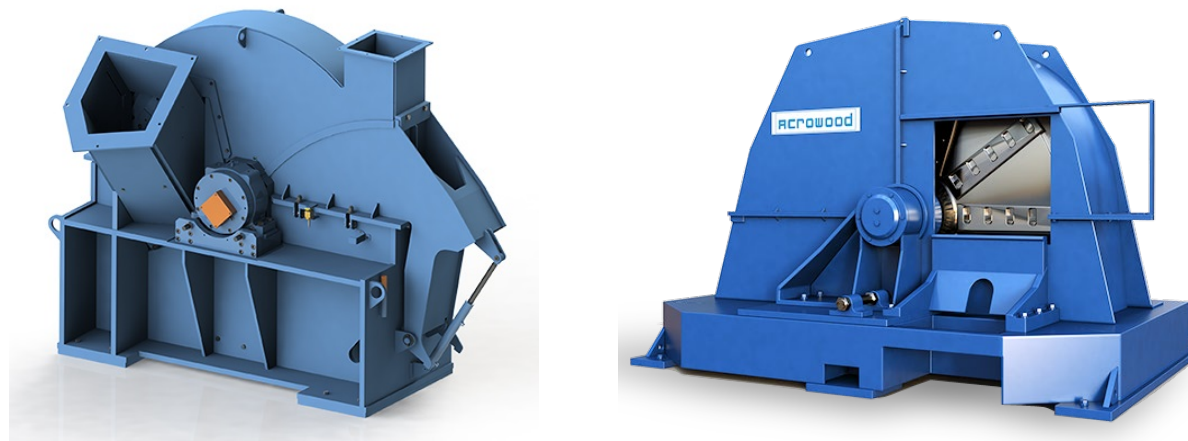


Figura 2.3: Astilladoras de madera usadas comúnmente en la industria de pulpa y papel. Izquierda: Tomada del sitio web de [Bruks Siwertell](#) (mayo de 2023). Derecha: Tomada del sitio web de [Acrowood](#) (mayo de 2023)

2.1.2. Fabricación de pulpa de madera

La Tabla 2.1 resume los métodos comúnmente utilizados para generar pulpa de madera destinada a producir papel. Los métodos se diferencian de acuerdo con la acción separadora o 'digestiva' principal, que puede ser mecánica o química. El propósito es producir fibras de celulosa largas, fuertes y estables mientras se elimina la lignina que las une dentro de la materia vegetal.

Tabla 2.1: Procesos de fabricación de pulpa de madera para producción de papel, adaptado de (Bajpai, 2010)

Proceso	Color de pulpa	Rendimiento (%)	Usos
TMP (2.1.2.1)	Café	>95	Cartón, papel prensa, bolsas de papel
CTMP (2.1.2.1)	Café claro	85-95	Papel prensa, papel de especialidad
NSSC (2.1.2.2)	Café 'beige'	60-80	Papel de prensa y bolsa
Químico (2.1.2.3)	Café claro	40-55	Papel de revista y de impresión

En el pulpeo por acción mecánica, las fibras de madera son separadas a través de rodamiento y fricción contra una superficie de diseño específico, en que la aplicación de calor y presión pueden usarse para aumentar la eficiencia del proceso. En el pulpeo por

acción química, el material lignocelulósico es digerido a través de reactivos ácidos o cáusticos amortiguados.

2.1.2.1. Pulpeo mecánico

Luego del descortezado y aserrado de los troncos, la viruta de madera es sometida a molienda fina de discos a alta temperatura para ablandar la lignina, rompiendo los enlaces entre las fibras. Cuando se tritura la madera de esta forma, la pulpa muestra propiedades favorables respecto al brillo del papel, dispersión de la luz y masa, que permite la producción de papeles de bajo gramaje y superficie de baja rugosidad (Bajpai, 2010). Históricamente se ha conseguido producto con un buen grado de refinamiento a través de un proceso conocido como *'thermo-mechanical pulping'* (TMP) que implica circular la madera aserrada y húmeda en un tubo junto con vapor de agua a alta temperatura previo a la primera molienda en disco, con el propósito de remover un mayor contenido de lignina y exponer las superficies celulósicas para la unión entre fibras; el esquema general del proceso puede visualizarse en la Figura 2.4.

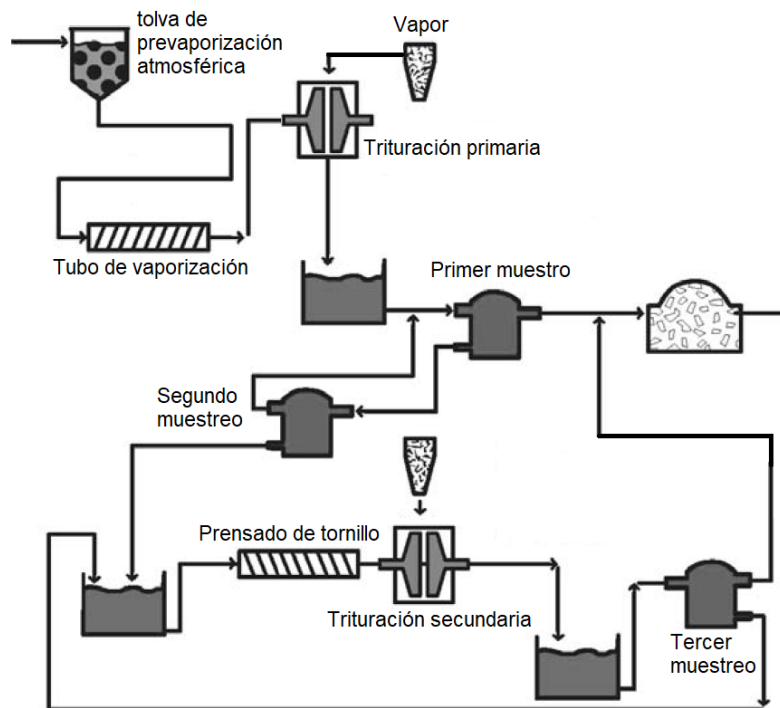


Figura 2.4: Diagrama de flujo simplificado del *'thermo-mechanical pulping (TMP)'*. Adaptado de (Dykastra, 2006)

Cuando el vapor de agua contiene una fracción de $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$ o bien cuando a la mezcla de entrada a molienda se añade $\text{Na}_2\text{S}(\text{ac})$ previo a la circulación de vapor, el proceso es llamado '*chemo-thermo-mechanical pulping*' (CTMP). La cocción al vapor y el refinado de las astillas se realizan a temperaturas superiores a $100\text{ }^\circ\text{C}$ ($212\text{ }^\circ\text{F}$) y el producto del TMP/CTMP se almacena con una fracción de vapor en un tanque presurizado (Dykastra, 2006).

2.1.2.2. Pulpeo semiquímico

Los procesos de pulpeo semiquímico se caracterizan por un tratamiento químico moderado precedido por una etapa de refinamiento mecánico. El más utilizado globalmente es el proceso semiquímico de sulfito neutro (NSSC, por sus siglas en inglés), en el que las virutas se someten a una digestión parcial usando una solución de sulfito de sodio amortiguada previo a la molienda de discos. La sulfonación de la lignina provoca una disolución parcial de modo que las fibras se debilitan para la posterior desfibración mecánica (Bajpai, 2010). El NSSC se usa para productos que no requieren blanqueado donde la buena resistencia y rigidez son particularmente importantes; los ejemplos incluyen papel corrugado, papeles a prueba de grasa y papel para bolsa.

2.1.2.3. Pulpeo químico

En el mundialmente conocido proceso *kraft* el aserrín de madera es 'cocinado' a presión en una solución acuosa de NaOH y Na_2S llamada 'licor blanco'. La reacción sucede dentro de tanques cilíndricos de disposición vertical, versiones mejoradas del digestor Kamyr diseñado por Johan Richter alrededor de 1940, que operan a temperaturas entre $433\text{-}508\text{ K}$ (usando vapor de agua o intercambiadores de calor), presiones de hasta 110 psi y tiempos superiores a 120 minutos (Annergren & Lundqvist, 2008). El mecanismo de reacción que tiene lugar al interior del digestor no es perfectamente conocido debido al número de especies y la complejidad de la lignina, por lo que no es posible señalar las reacciones determinantes de la velocidad global, pero se sabe que los iones Na^+ y S^{2-} contribuyen a la despolimerización de la lignina sin degradar la celulosa. Al interior del digestor, la homogeneidad de la mezcla es asistida a través de convección forzada, inducida por la reducción súbita de presión en la parte alta del digestor que ocasiona

ebullición generalizada de la mezcla. De acuerdo a Bajpai, P., 75% de la pulpa de madera producida en el mundo se obtiene a través del proceso kraft; este dominio de la industria se debe no solo a las excelentes propiedades mecánicas de los derivados de papel que se obtienen e.g., resistencia a tracción, presión y plegado, sino también a: 1) las ventajas en recuperación de reactivos, ya que el efluente residual del digestor, conocido como 'licor negro' es sometido a un proceso de separación (mostrado en la Figura 2.5) con el objetivo de recuperar el NaOH, Na₂S, vapor de agua, lignina, y una mezcla de aceites de madera conocida como 'tall-oil'; y 2) la capacidad para digerir 'madera dura', ejemplos son el roble, arce, caoba, entre otros, siendo esta característica la relacionada con el nombre *kraft*, que se refiere a 'fuerza' tanto en alemán como en sueco y se relaciona con la alta resistencia del papel elaborado con fibras de éstas maderas.

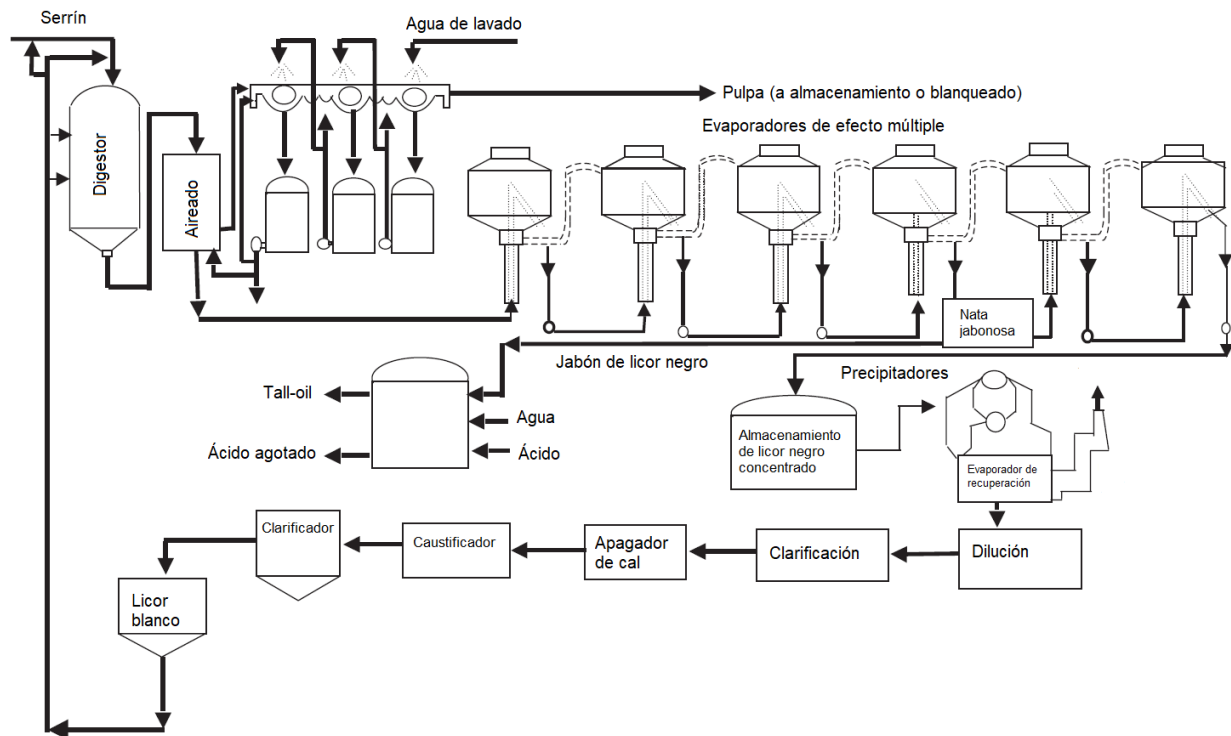


Figura 2.5: Diagrama de flujo simplificado del pulpeo 'Kraft', adaptado de (Bajpai, 2010)

2.1.3. Blanqueamiento de pulpa

La pulpa se blanquea para aumentar su brillo y remover la lignina responsable por el color café, se trata de un proceso extremadamente corrosivo con agentes oxidantes fuertes. El blanqueamiento es un proceso multietapa que alterna delignificación y

estabilización polimérica en secuencias de 3 a 5 etapas (ver Tabla 2.2). Cada etapa involucra cuatro equipos principales, como se muestra en la Figura 2.6: A) Una bomba para generar flujo de pulpa; B) Un mezclador de pulpa, reactivos y vapor; C) Una torre de blanqueo con equipo de dilución y agitación adecuado y D) Una lavadora de pulpa que usa vapor de agua.

Tabla 2.2: Nomenclatura de etapas de blanqueamiento, adaptado de (Bajpai, 2010)

Símbolo	Reactivo o reacción	Función	Ventajas	Desventajas
C	Cloro (Cl ₂)	Oxidar y clorar la lignina	Efectivo, económico	Puede debilitar la pulpa
D	Dióxido de cloro (ClO ₂)	Clorar y solubilizar la lignina	Se obtiene alto brillo sin degradar la pulpa	El ClO ₂ es costoso y debe ser producido en el instante de aplicación.
D ₀	Sustitución total de ClO ₂ por Cl ₂			
D _c	Sustitución parcial de ClO ₂ por Cl ₂			
D _n	Neutralización de ClO ₂ con NaOH			
E	Extracción cáustica (NaOH)	Hidrolizar y solubilizar la lignina	Efectivo y económico	El brillo puede verse afectado
E ₀	Extracción cáustica con oxígeno			
E _{OP}	Extracción caustica con peróxido y oxígeno			
H	Hipoclorito (NaOCl o Ca(OCl) ₂)	Solubilizar la lignina, promover brillo	Menores tiempos de reacción	Costoso
O	Oxígeno (O ₂)	Oxidar y solubilizar la lignina	Efluente libre de cloro	Equipo de alto costo
Z	Ozono (O ₃)	Remover la lignina y promover brillo	Efluente libre de cloro	Costoso
P	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	Oxidar la lignina y promover brillo	Alto rendimiento, bajo costo del equipo	Reactivo costoso
P _{HT} /P _O	H ₂ O ₂ a alta temperatura o presurizado			

Existen diferentes secuencias de etapas para producir diferentes tipos de papel (ver Tabla 2.3 y Tabla 2.4). La delignificación se logra comúnmente con etapas O, C, D, E₀ y E_{OP}, y cuando el contenido de lignina se ha reducido considerablemente, se procede a la estabilización polimérica de las fibras de celulosa con etapas D, E y D_n (Area, Felissia, & Venica, 2007). Hace 50 años, no se contemplaba la posibilidad de conseguir pulpa de

alto brillo sin el uso de cloro durante el blanqueamiento, sin embargo, regulaciones ambientales cada vez más estrictas desencadenaron el desarrollo de las secuencias ECF (del inglés *Elementary-chlorine free*,) y TCF (del inglés *Totally Chlorine Free*, Figura 2.7) en que se logra delignificación basada en oxígeno eliminando considerablemente el contenido de compuestos clorados de los efluentes.

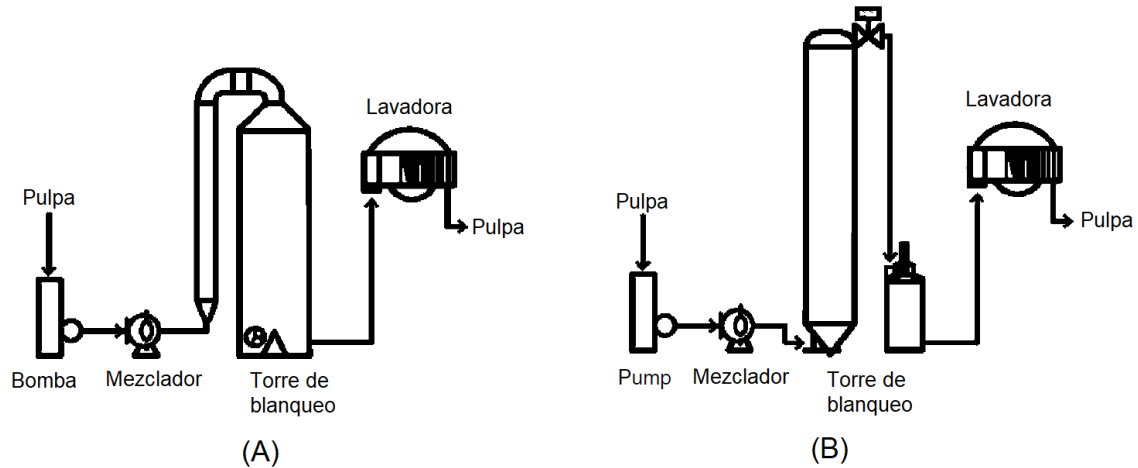


Figura 2.6: Equipos componentes de etapas de blanqueamiento. (A) Flujo convencional (ascendente/descendente) a presión atmosférica. (B) Flujo ascendente presurizado. Adaptado de (Dykastra, 2006)

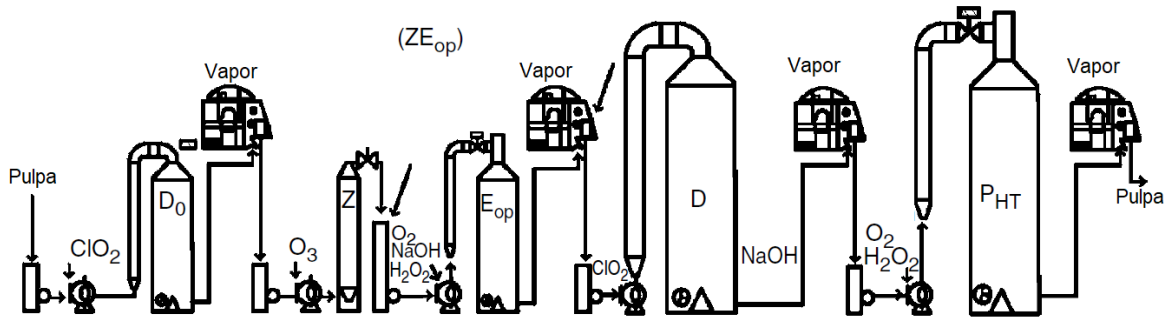


Figura 2.7: Diagrama de flujo de la secuencia ECF. La secuencia ZE_{OP} denota esas etapas sin lavado intermedio. Adaptado de (Dykastra, 2006)

Tabla 2.3 Parámetros típicos de operación para etapas de blanqueamiento libre de cloro (Dykastra, 2006)

Etapa	E _{OP}	Z	P, P _{HT} , P _O
Contenido de reactivo en pulpa, %	0.5-1.0 (H ₂ O ₂) 0.5 (O ₂)	0.2-0.5 (O ₃)	1.0-3.0 (H ₂ O ₂) 0.5 (O ₂)
Temperatura, °C	85-105	50-60	85-100
pH final	10.0-10.5	2.5-3.0	10.0-10.5
Consistencia, %	12-14	12-14	12-14
Tiempo de retención, min	60	5-10	180

Tabla 2.4: Parámetros típicos de operación para secuencias de blanqueamiento con cloro.
Adaptado de (Dykastra, 2006)

Tipo de blanqueamiento	Convencional	ECF
Secuencia	D _c E _o D _n D	ODE _{OP} D
Etapa 1		O
%NaOH (en pulpa)		1.5-2.0
% O ₂		1.5-2.0
Temperatura		85-100 °C
pH final		10-12
Tiempo de retención, min		60
Etapa 2	D_c	D
% de sustitución de ClO ₂	50	100
% de Cl ₂ libre en pulpa	6.0-7.8	3.6-4.7
Temperatura	30-50 °C	60-65 °C
pH final	1.5-2.0	2.5-3.5
Consistencia, %	3-4	3-12
Tiempo de retención, min	60	45
Etapa 3	E_o	E_{OP}
% O ₂ (en pulpa)	0.5	0.5
% H ₂ O ₂ (en pulpa)	N/A	0.5
pH final	10.5-12.0	10.5-12.0
Temperatura	75-85 °C	75-90 °C
Tiempo de retención, min	45	45
Etapa 4	D_n	D
% ClO ₂ en pulpa	0.8-1.2	1.0-1.4
pH	3.5-4.5 (neutralizado a 7.0-9.0)	3.0-4.5
Consistencia, %	10-12	10-12
Temperatura	70-80 °C	70-80 °C
Tiempo de retención, min	180	240
Etapa 5	D	
% ClO ₂ en pulpa	0.1-0.3	
pH	4.5-5.0	
Temperatura	70-80 °C	
Consistencia, %	10-12	
Tiempo de retención, min	180	

2.1.4. Fabricación del papel

En la fabricación de papeles tisú se emplean materiales de reciclaje elaborados originalmente con fibras químicas blanqueadas. La fibra mecánica reciclada (periódicos, revistas, directorios telefónicos, etc.) se adquiere a menor costo, pero posee una baja blancura porque en su fabricación inicial la lignina no ha sido eliminada de su estructura (Uribe R. & Fuentes L., 2009). Sin embargo, esta fibra puede ser utilizada en la

producción de papel blanco de alta calidad, si se incluyen dentro de su procesamiento secuencias de eliminación de tinta, adhesivos, y blanqueo. Para el reciclaje, por lo general se utilizan equipos de flujo radial de dilución (Figura 2.8), diseñados para humedecer el material, desintegrarlo y recolectar residuos sólidos como clips, grapas metálicas, entre otros. La mezcla es entonces lavada y blanqueada y se utiliza en conjunto con pulpa de madera blanqueada en proporción adecuada a la consistencia del tisú que se busca (Aguilar Rivera, 2004).

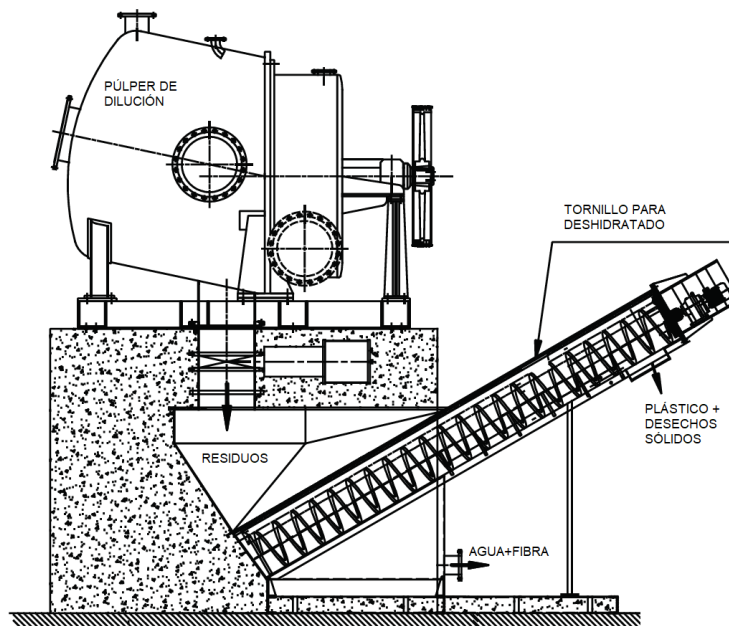


Figura 2.8: Esquema general de un pulper de dilución utilizado en reciclaje de fibra. Adaptado del sitio web de [Parason Machinery](#) (agosto de 2023)

El tren de producción de papel tisú consta de 3 secciones consecutivas:

Sección 1 - alimentación de materia prima: comprende cargar pulpa de madera y fibra de reciclaje en correas transportadoras, hacia un tanque (llamado *pulper*) en cuyo interior son mezcladas uniformemente en un flujo radial generado por una hélice en la parte inferior (Figura 2.9)

Sección 2 - extremo húmedo: engloba el tiempo de residencia de la mezcla en el *pulper*, y su salida a cajones de entrada a la máquina de papel (Figura 2.10), donde una tela delgada montada sobre una banda de alambre plana (conocida como *Mesa de Fourdrinier*) genera un flujo de aproximación hacia un fieltro que lo lleva a un cilindro inicial de prensa de succión.

Sección 3 - extremo seco: contempla el transporte de la capa de la lámina de papel desde la sección de fieltro, sobre una serie de cilindros o rodillos a alta velocidad en los cuales es drenado, prensado, plegado y secado, hasta la formación de un rollo de papel sobre un carrete de bobinado.

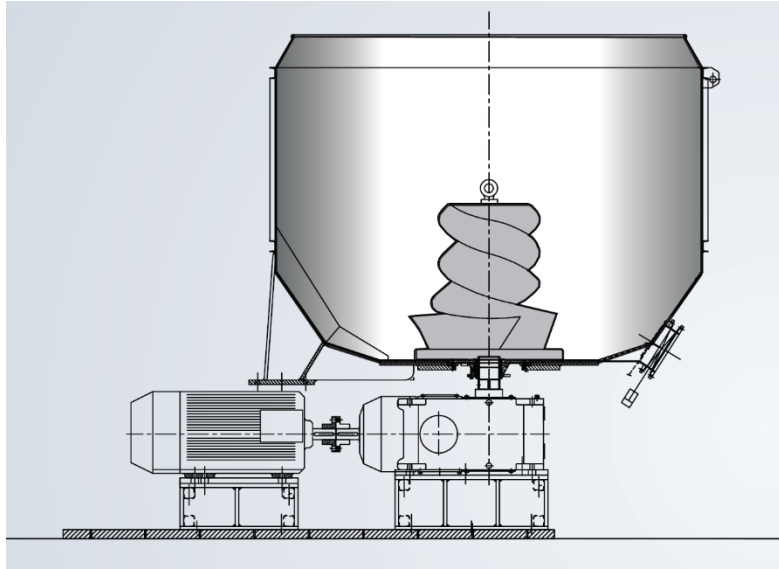


Figura 2.9: Esquema general de un pulper para mezcla de pulpa blanqueada. Adaptado del sitio web de [Parason Machinery](#) (agosto de 2023)

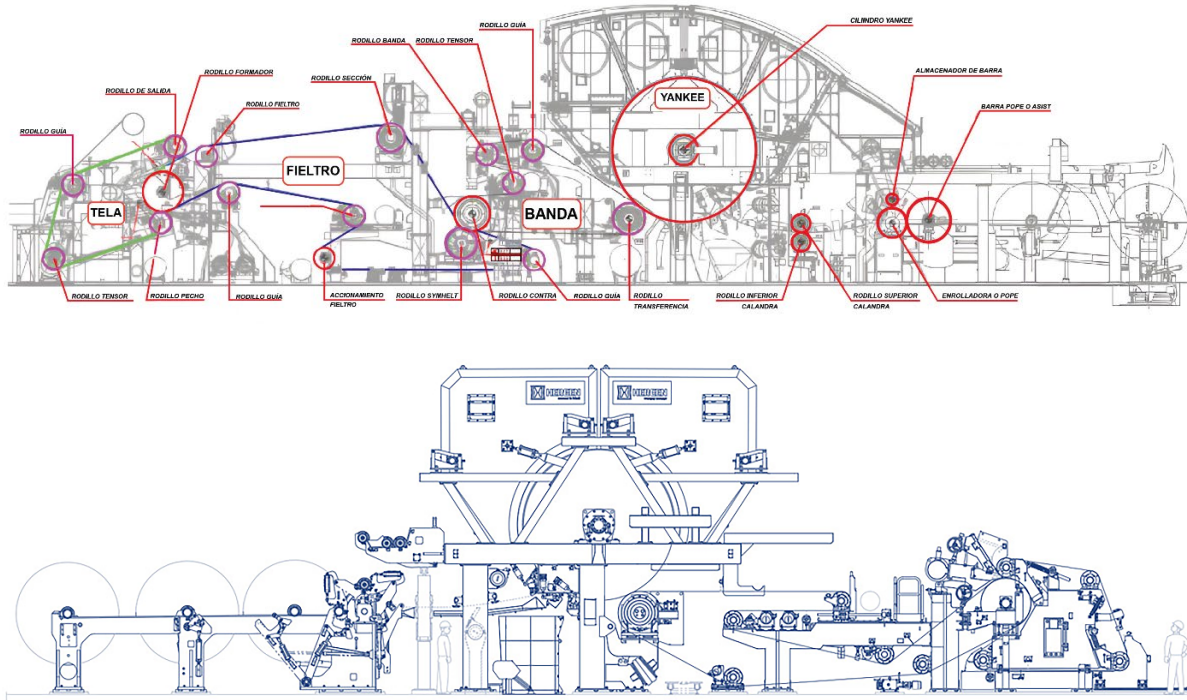


Figura 2.10: Plano de máquina de papel tissue. (Superior) NTT 200HS Advantage de [Valmet](#) (agosto de 2023). (Inferior) Montaje modular de equipos fabricados por [Hergem](#) (agosto de 2023).

La pulpa, previamente procesada y refinada, llega a los cajones de entrada de la máquina, tanto a *Cara Capota* (cara superior del papel que está en contacto con la capota de la máquina y que otorga resistencia al papel) como a *Cara Yankee* (cara inferior de papel que está en contacto con la superficie del cilindro y que otorga suavidad al papel) con consistencias del 0.1 al 0.5% (Herrera S., 2019). La lámina de pulpa es drenada en un primer circuito de cilindros y adquiere la apariencia de una hoja de papel húmedo. Se procede a eliminar otra fracción de agua con otro circuito de rodillos de prensado, tras los cuales la hoja con un remanente de humedad que circula es plegada y adopta por prensado el perfil superficial moldeado en la banda que alimenta el cilindro de secado. El Anexo 1 muestra la NTT200HS Advantage de Valmet y la secuencia de cilindros sobre los que circulan la tela, el fieltro y la banda previo a la alimentación del pliego de papel al *Yankee*.

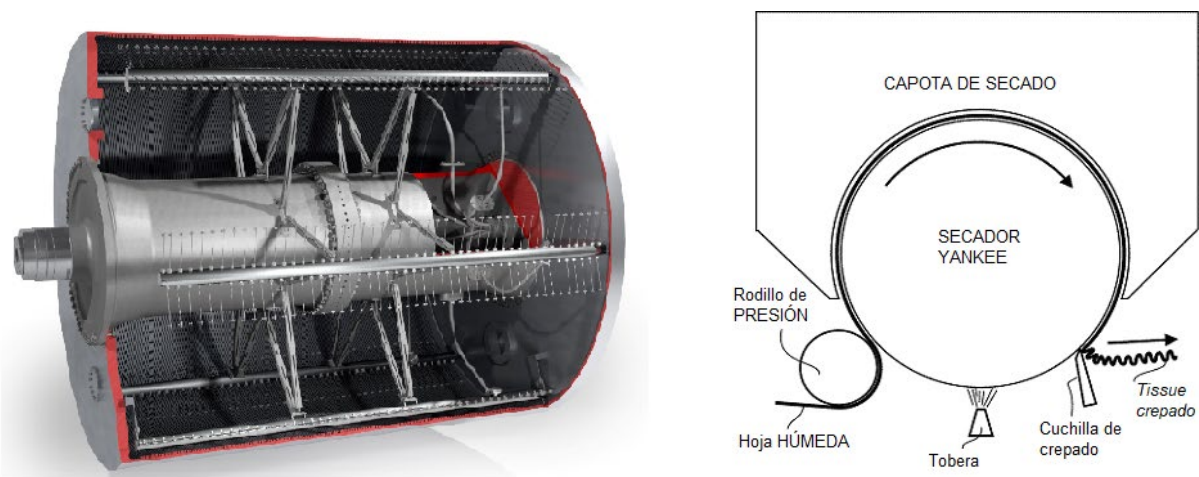


Figura 2.11: (Izq.) Estructura del cilindro Yankee fabricado por [Valmet](#) (agosto de 2023). (Der.) Esquema general de funcionamiento del cilindro Yankee, adaptado de (Widmaier, Kuosmanen, & Juhanko, 2011)

Después del prensado, el agua restante debe eliminarse utilizando energía térmica para evaporarla. Esto se logra con mayor frecuencia en un solo cilindro de metal grande, el secador *Yankee*, que puede tener hasta 6.7 metros de diámetro y está parcialmente encerrado por una campana o capota de impacto de alta velocidad y, en las máquinas de papel tisú convencionales modernas, al menos del 50 al 60% del efecto de secado normalmente proviene del lado del cilindro, mientras que del 40 al 50% proviene del lado de la capota (Herrera S., 2019). El cilindro es recubierto con una película de polímeros que generan la adhesión de la hoja al mismo, usando toberas de atomización previo al

ingreso del pliego, y una vez en operación mientras la hoja es transportada sobre la superficie del *Yankee* es sometida a *crepado*, una acción mecánica generada por un conjunto de cuchillas que rasgan el papel y que es responsable de la suavidad, adsorción y espesor del papel tisú. A medida el pliego seco de tisú deja la superficie del *Yankee*, es recolectado por otro set de cilindros en un único rollo de papel en un carrete de bobinado, del cual es desmontado y se considera listo para empaque y embalaje o para ser cortado y aromatizado en rollos más pequeños para presentaciones comerciales comunes, como el papel higiénico, el papel toalla, entre otros.

El papel tisú se caracteriza del resto de papeles por sus propiedades físicas medibles, que determinan su calidad final. Las propiedades y calidad de este tipo de papel son:

1. *Gramaje*: Se define como la masa por unidad de área, además incluye la cantidad de agua en el papel en las condiciones climáticas existentes, en el sistema internacional corresponde a la masa en gramos por metro cuadrado (g/m^2). La norma utilizada para determinar el gramaje en el papel tissue es la Norma TAPPI (*Technical Association of the Pulp and Paper Industry*) T410 om-08
2. *Espesor*: El espesor es una propiedad fundamental del papel, ya que tiene un impacto importante en la rigidez a la flexión y, por otro lado, se debe considerar un perfil de grosor uniforme para que el rollo de papel tenga un perfil transversal uniforme, puesto que influye en el funcionamiento del papel y en otras situaciones de conversión secundarias. La metodología de medición de espesor para papel tissue se basa en lo establecido en la norma ISO 12625-3.
3. *Resistencia a la tracción en seco*: La resistencia a la tracción es la fuerza máxima relacionada con el ancho de la pieza de prueba. La norma ISO 12625-4 detalla el método de prueba para la determinación de la resistencia a la tracción, el estiramiento a la rotura y la absorción de la energía de tracción del papel tissue y sus productos.

2.2. Descripción general de la corrosión y sus clasificaciones

La corrosión es un proceso electroquímico natural que afecta a diversos materiales, como metales y aleaciones, que puede ocasionar daños significativos en infraestructuras, maquinarias y equipos industriales debido la destrucción o deterioro del

material debido a la reacción con su entorno . En el transcurso del tiempo, los materiales alcanzan su estado natural, en busca de un estado de menor potencial energético que les permita estabilizarse termodinámicamente, lo que deriva de un proceso de reacciones electroquímicas que engloba tres componentes: electrodos (un ánodo y un cátodo), un electrólito como medio conductor y una conexión eléctrica entre los electrodos, generándose espontáneamente reacciones de oxidación-reducción que destruyen al metal que actúa como ánodo (Ahmad, 2006).

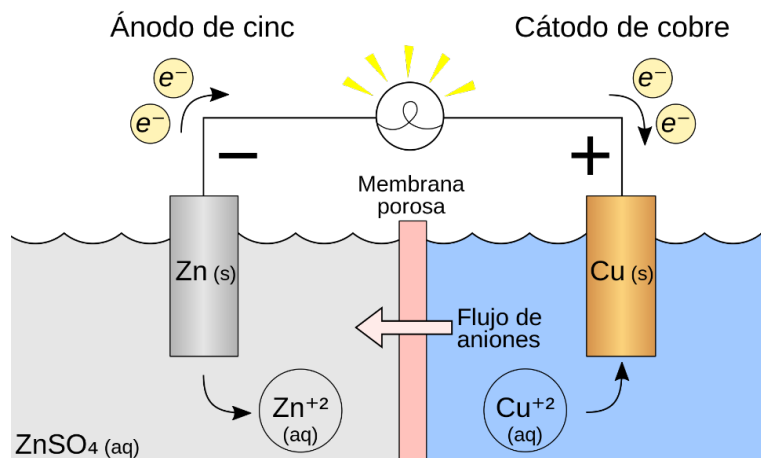


Figura 2.12: Celda electroquímica de Zn/Cu²⁺|Zn²⁺/Cu.

Nombrada celda galvánica en honor a Luigi Galvani, es la base teórica de la corrosión como una reacción de oxidación-reducción en que el ánodo se corroe. Tomada de Wikipedia (noviembre de 2023)

2.2.1. Corrosión uniforme

Es conocida por ser un ataque corrosivo que se genera de manera uniforme en toda la superficie o en una gran fracción del área total, produciendo un adelgazamiento en el material hasta provocar una falla y ocasionado por la oxidación espontánea del metal. Algunos metales pueden ser más resistentes a la corrosión uniforme debido a su capacidad para formar una capa de óxido (llamada pasivación) que actúa como barrera frente al ambiente que les rodea.

2.2.2. Corrosión galvánica

Ocurre cuando dos metales diferentes quedan en contacto en presencia de un electrólito. Debido a las diferencias en los potenciales de electrodo de los diferentes materiales, se genera corriente eléctrica, el material con el potencial de corrosión más alto se convierte

en el cátodo, mientras que el material con menor potencial se consume por disolución anódica. Si la relación de área de superficie de ánodo a cátodo es pequeña, la corriente galvánica puede concentrarse en una pequeña área anódica y localizar el desgaste.

2.2.3. Corrosión por picaduras

Es un tipo de corrosión que se caracteriza por la formación de pequeñas perforaciones o cavidades en la superficie del material. A diferencia de la corrosión uniforme, que afecta de manera generalizada a toda la superficie, la corrosión por picadura se concentra en áreas pequeñas y localizadas. Se presenta en materiales pasivados, ya que, gracias a las características geométricas del sistema, se da un incremento del pH del medio y una acumulación de agentes oxidantes, lo que contribuye al deterioro de la capa protectora, permitiendo que la corrosión se desarrolle en estas zonas puntuales (Ahmad, 2006)



Figura 2.13: Corrosión por picaduras. Fuente: [Blog A-Marine](#) (diciembre de 2023)

2.2.4. Corrosión debida a esfuerzos

La corrosión por tensión o *stress cracking corrosion* es un fenómeno en el cual la combinación de tensiones mecánicas y un medio corrosivo lleva a la falla prematura de los materiales. Este tipo de corrosión se produce cuando un material está sometido a esfuerzos de tracción, compresión o torsión, al mismo tiempo que está expuesto a un ambiente corrosivo. Puede afectar a una amplia gama de materiales metálicos, como aleaciones de acero inoxidable, aluminio, cobre y titanio.

2.2.5. Corrosión intergranular

Este fenómeno se produce cuando hay una diferencia en la composición química entre los límites de grano y la matriz de la estructura cristalina (Craig, Lane, & Rose, 2006). La corrosión intergranular puede debilitar significativamente la estructura del metal y afectar su resistencia y durabilidad. Comúnmente en aleaciones metálicas, como aceros inoxidables y aleaciones de aluminio, que contienen elementos de aleación adicionales, como carbono o cromo que pueden segregarse en los límites de grano debido a las altas temperaturas a las que son sometidos durante el proceso de fabricación o durante soldaduras.

2.3. Estándar ISO 12944:2018

ISO 12944:2018 es un estándar internacional que establece recomendaciones para la selección y aplicación de sistemas de pintura en estructuras metálicas expuestas a diferentes ambientes corrosivos. La Figura 2.14 muestra el esquema general de su aplicación en un proyecto de renovación total o parcial del sistema de revestimientos.

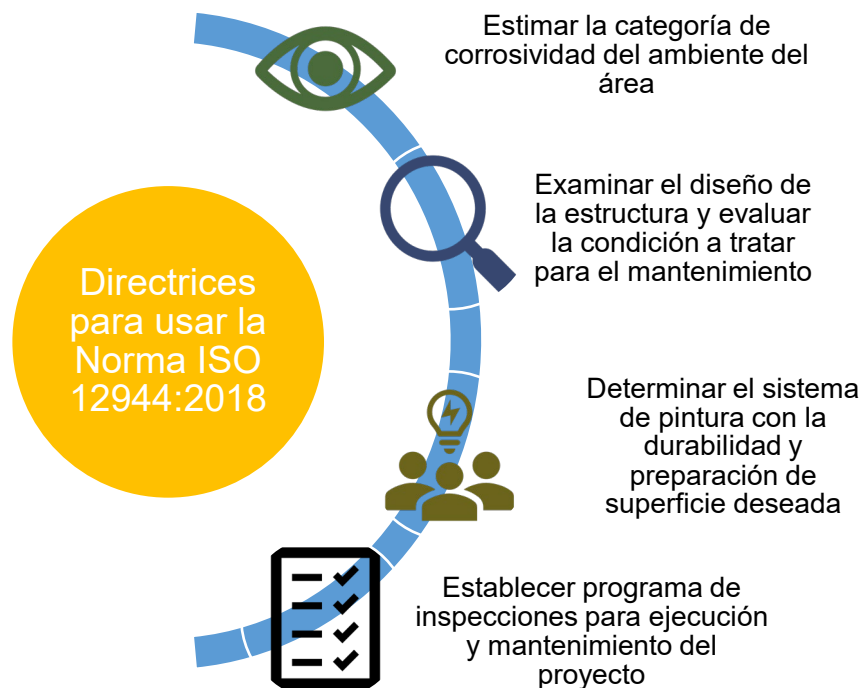


Figura 2.14: Directrices generales para aplicar la Norma ISO 12944:2018 en un proyecto

2.3.1. Categorías de ambientes corrosivos

La Tabla 2.5 muestra la clasificación de ambientes de acuerdo al segundo apartado del estándar, que adicionalmente brinda categorías de inmersión en agua y suelo (Im1-Im4) que por lo general implican la necesidad del uso de protección catódica aunado al sistema de pinturas para defender la estructura metálica.

Tabla 2.5: Categorías de corrosividad y ejemplos de ambientes típicos de acuerdo al estándar ISO 12944:2018

Categoría de corrosividad	Pérdida de material tras un año de exposición				Ejemplos típicos de ambientes	
	Acero al carbono		Zinc		Exterior	Interior
	Masa (g/m ²)	Espesor (μm)	Masa (g/m ²)	Espesor (μm)		
C1 Muy baja	≤10	≤1.3	≤0.7	≤0.1		Edificios con calefacción, oficinas, tiendas, escuelas, hoteles urbanos.
C2 Baja	> 10-200	> 1.3 - 25	> 0.7-5	> 0.1-0.7	Atmósfera con bajo nivel de contaminación: zonas mayoritariamente rurales.	Edificios sin calefacción donde puede producirse condensación, e.g., depósitos, gimnasios
C3 Media	>200-400	>25-50	>5-15	>0.7-2.1	Atmósferas urbanas e industriales, contaminación moderada por dióxido de azufre; zonas costeras con baja salinidad.	Salas de producción con mucha humedad y cierta contaminación del aire (lavanderías, comedores).
C4 Alta	>400-650	> 50-80	>15-30	>2.1-4.2	Zonas industriales y zonas costeras con alta salinidad.	Plantas químicas, piscinas, buques costeros y astilleros.
C5 Muy alta	>650-1500	>80-200	>30-60	>4.2-8.4	Zonas industriales con alta humedad y zonas costeras con alta salinidad.	Edificios o zonas con condensación casi permanente y con alta contaminación.
CX Extrema	>1500-5500	>200-700	>60-180	>8.4-25	Zonas marinas con alta salinidad y zonas industriales con humedad extrema y atmósfera agresiva, atmósferas tropicales.	Zonas industriales con humedad extrema y químicos agresivos.

2.3.2. Tipos genéricos de recubrimientos

El estándar ISO 12944:2018 define a una pintura como un material de recubrimiento pigmentado que, cuando se aplica a un sustrato, forma una película seca opaca que presenta propiedades protectoras y decorativas. Los tipos genéricos de resinas que la norma define son:

2.3.2.1. Alquídicos (AK)

Se trata de pinturas monocomponentes cuyas materias primas son poliéster, alcoholes polihídricos y ácidos grasos (Sander et al., 2010). La película se endurece por evaporación del disolvente y por reacción del aglutinante con el oxígeno atmosférico.

2.3.2.2. Acrílicos (AY)

Son materiales de recubrimiento de secado rápido y de un solo componente en la que los pigmentos y aditivos están contenidos en una emulsión de polímero de ácido acrílico (Sander et al., 2010). Pueden ser base agua o base solvente.

2.3.2.3. Etil-silicato (ESI)

Las imprimaciones de zinc de silicato de etilo son materiales de recubrimiento de dos componentes: un líquido que contiene aglutinante y un componente en polvo que contiene zinc. Las capas de ESI se forman y secan por evaporación del solvente y se curan al reaccionar con la humedad del aire.

2.3.2.4. Resinas epoxi (EP)

Los polímeros epoxi presentan propiedades de barrera eficientes y excelente adhesión al sustrato. Producidos por medio de la reacción de eterificación de Williamson (Sander et al., 2010), contienen estructuras aromáticas, alifáticas o cíclicas que le brindan propiedades mecánicas sobresalientes. El recubrimiento es de dos componentes y la mezcla de base y agente de curado tiene una vida útil limitada; por lo general, si se requiere retención de color o brillo, será necesario aplicar una capa de acabado compatible.

2.3.2.5. Poliaspárticos (PAS)

Caracterizados por una buena velocidad de curado, gruesos espesores de película y resistencia a químicos e intemperie, son recubrimientos de dos componentes y curan irreversiblemente por reacción entre compuestos de isocianato y ésteres aspárticos (Sander et al., 2010). La mezcla de base y agente de curado tiene una vida útil limitada y el tiempo de secado es función de la humedad del aire.

2.3.2.6. Poliuretanos (PUR)

Son resinas sintéticas formadas por la repetición lineal del monómero *uretano* que enlaza dos cadenas alifáticas (Figura 2.15). Poseen buena resistencia a la abrasión, químicos y solventes y excelentes propiedades de formación de película. Las pinturas son de un solo componente y secan irreversiblemente por evaporación del solvente en presencia de humedad. Un tipo especial de PUR son los fluoropolímeros de vinil éter (FEVE), recubrimientos de dos componentes base agua o solvente curables a temperatura ambiente y termo-endurecibles que brindan muy buena protección al sustrato

2.3.2.7. Polisiloxanos (PS)

Son polímeros basados en híbridos orgánicos e inorgánicos de siloxano (Si-O-Si). Los recubrimientos son muy inertes en comparación a otras resinas y son resistentes a temperatura, radiación ultravioleta, oxidación y ciertos ácidos y solventes.

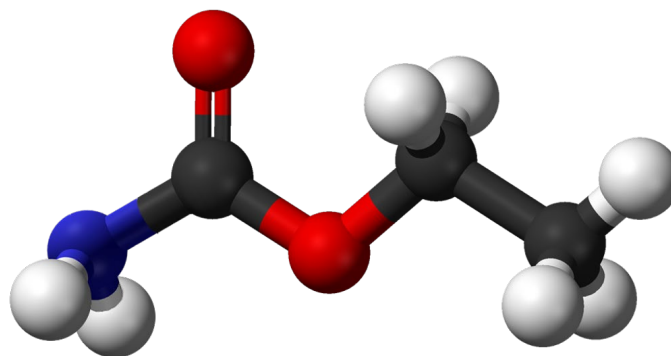


Figura 2.15: Etiluretano $C_3H_7NO_2$. Tomado de [Wikipedia](#) (diciembre de 2023)

2.3.3. Durabilidad

El Comité Técnico ISO/TC 35 para Pinturas y Barnices ha definido la durabilidad como *“la vida prevista de un sistema de recubrimientos protector hasta el primer trabajo de mantenimiento importante, y habitualmente se asume que es más corta que el período de servicio esperado de la estructura”*.

El primer trabajo de mantenimiento importante puede ser una de tres opciones:

1. *Retoque*: una preparación superficial y reparación localizada de un área de la estructura deteriorada por la corrosión.
2. *Renovación parcial*: retoque de defectos del recubrimiento seguido de una preparación superficial y la aplicación de como mínimo una capa de acabado sobre el total del área.
3. *Renovación total*: eliminación total del sistema de pinturas y aplicación de uno nuevo.

ISO 12944:2018 establece la durabilidad como *“una consideración técnica o parámetro de planificación que puede ayudar a establecer un programa de mantenimiento”* y propone cuatro rangos para la misma:

1. Bajo (B): <7 años
2. Medio (M): 7-15 años
3. Alto (A): 15-25 años
4. Muy alto (MA): >25 años

2.3.4. Sistema de recubrimientos

Es la suma de total de las capas de materiales metálicos, pinturas y productos afines que se aplican a un sustrato para frenar el deterioro por la corrosión. Los revestimientos se aplican directamente sobre una superficie metálica preparada como método de protección contra la corrosión. ISO 12944-5:2018 establece los recubrimientos genéricos necesarios para contrarrestar el efecto perjudicial de un ambiente de corrosividad definida sobre una estructura de acero, la Tabla 2.6 corresponde a las abreviaciones que se usan para describir los sistemas de pintura.

Tabla 2.6: Términos y descripciones abreviadas en ISO 12944-5:2018

Abreviación		Descripción			
Zn (R)		Imprimación rica en zinc. El espesor varía desde 40 µm hasta 80 µm.			
Misc.		Todas las demás categorías de imprimaciones.			
Base aglutinante para imprimaciones y recubrimientos subsecuentes		Principal aglutinante	Tipo	Base de agua	Comentario(s)
	AK (2.3.2.1)	Alquídico	Simple	✓	
	AY (2.3.2.2)	Acrílico	Simple	✓	Generalmente a base de agua
	EP (2.3.2.4)	Epoxi	Doble	✓	Poca resistencia a los rayos UV
	PUR (2.3.2.6)	Poliuretano	Simple o doble	✓	Sólo tipos alifáticos para capas superiores
	ESI (2.3.2.3)	Etil-silicato	Simple o doble		Se recomienda usar una capa intermedia compatible con la capa de acabado
C2 a C5		Categorías de corrosividad (2.3.1)			
EPSN		Espesor de película seca nominal.			

La limitación más notable de los sistemas recomendados consiste en el hecho que solo describen los tipos genéricos de resinas que deben ser aplicadas, sin hacer ninguna referencia a los pigmentos y aditivos que deben acompañarla. Dependiendo de la composición de cada una de las capas del sistema, el rendimiento del mismo puede variar mucho dentro de una tecnología de resina determinada.

2.3.5. Preparación de superficie

El objetivo primario de preparar el sustrato es asegurar que se elimina toda la materia que afecta de manera negativa a la protección anticorrosiva y obtener una superficie que permite una adherencia satisfactoria del recubrimiento a la superficie. Algunos de los factores que influyen en la selección de un procedimiento de preparación superficial son:

1. La edad de la estructura y su localización
2. El comportamiento del sistema de recubrimiento existente
3. La extensión de la degradación
4. El tipo y la severidad de ambientes de corrosión previos y futuros
5. Características del nuevo sistema de recubrimiento

Los requerimientos mínimos de la ISO 12944-5:2018 establecen que, para proyectos de renovación total de sustratos de acero al carbono, previo a los procedimientos establecidos en las fichas técnicas de los fabricantes del recubrimiento, es necesaria una limpieza usando proyección de abrasivo por chorreado con alta energía cinética sobre la superficie a recubrir. Cuando se trata de retoques o renovación parcial del sistema, la Tabla 2.7 muestra los métodos que la norma recomienda en función del contaminante o material que debe ser removido del sustrato.

Tabla 2.7: Procedimientos para la eliminación de capas deterioradas de recubrimiento y contaminantes. Adaptado de ISO 12944-4:2018.

Materia a eliminar	Procedimiento	Comentario
Grasas, aceites, contaminantes solubles en agua.	Limpieza con agua o vapor	Agua fresca con adición de detergentes. Se puede utilizar presión (< 70 MPa).
	Limpieza alcalina	Aluminio, zinc y otros recubrimientos metálicos son susceptibles de corrosión si se utilizan disoluciones fuertemente alcalinas
	Limpieza con disolventes orgánicos	El desengrasado con trapos impregnados con disolvente orgánico se restringe habitualmente a áreas pequeñas
Pinturas	Decapado	Los residuos se han de eliminar mediante aclarado con disolventes. Usar pastas alcalinas para recubrimientos saponificables. Aclarar de manera enérgica con agua fresca. El decapado se restringe a áreas pequeñas.
	Limpieza por chorreado abrasivo	Los residuos de polvo y depósitos poco adheridos se deben eliminar mediante el soplado con aire comprimido seco y exento de aceite o por limpieza al vacío
	Chorro a presión de agua	Para la eliminación de las pinturas pobremente adheridas. Se puede utilizar limpieza con presión ultra-alta (>170 MPa) para los recubrimientos firmemente adheridos.
	Limpieza por chorreado de barrido	Para recubrimientos rugosos o eliminación de la última capa de pintura.
Calamina	Limpieza por chorreado abrasivo	Los residuos de polvo y depósitos poco adheridos se deben eliminar mediante el soplado con aire comprimido seco y exento de aceite o por limpieza al vacío.
	Limpieza por medios automáticos	Se puede utilizar el cepillado mecánico en áreas con herrumbre desprendida. Se puede amolar para eliminar la herrumbre firmemente adherida. Se deben eliminar los residuos de polvo y depósitos poco adheridos.
	Chorro a presión de agua	Para la eliminación de la herrumbre pobremente adherida. El perfil superficial del acero es afectado
Productos de corrosión de zinc	Limpieza alcalina	Se puede utilizar una disolución amoniacal al 5% en peso en combinación con una almohadilla de tejido sintético con abrasivos incrustados para puntos de corrosión de zinc localizados. Los limpiadores alcalinos se pueden utilizar para superficies mayores. A elevados pH, el zinc es susceptible a la corrosión.
	Limpieza por chorreado de barrido	Limpieza por chorreado de barrido sobre zinc, se puede realizar con abrasivos no metálicos de limpieza por chorreado.

CAPÍTULO 3: Método y resultados

3.1. Método

Se realizó un recorrido general de la línea de producción de papel tisú y se identificaron áreas de relevancia para el proceso y el trabajo de aplicación. Las áreas seleccionadas fueron sujetas a observación, de éstas se recolectó información de carácter cualitativo sobre los criterios de evaluación de la categoría de corrosividad del ambiente a través de un protocolo previamente diseñado que se muestra en el Anexo 2. De la misma manera, el Anexo 3 muestra un ejemplo del llenado del mismo para una de las áreas y el Anexo 4 presenta esquemas iconográficos de las áreas y los factores de desgaste a los que se encuentran expuestas.

3.2. Criterios de evaluación de categoría de corrosividad

El estándar ISO 12944:2018 establece, tal como se muestra en la Tabla 2.5, valores numéricos de pérdida de espesor/masa del material en un año calendario para establecer la categoría de corrosividad del ambiente. Una posibilidad para conocer estos datos es someter un testigo de acero o zinc al ambiente por un tiempo menor al año calendario y extrapolar linealmente la pérdida de masa, algo que la norma advierte puede afectar la exactitud. Debido a la limitación que representa en la realidad industrial ejecutar un estudio *in situ* de un año calendario con el único propósito de elegir un sistema de recubrimientos para proteger una estructura, se establecieron criterios prácticos de naturaleza cualitativa y de relevancia al fenómeno de corrosión que pueden ser recolectados rápidamente de manera visual o en cortos períodos de tiempo y que pueden orientar a una selección apropiada de la categoría de corrosividad del ambiente. Son los siguientes criterios y las directrices generales de aplicación de la Norma (Figura 2.15) la base de la construcción del protocolo mostrado en el Anexo 2.

3.2.1. *Temperatura*

La temperatura es un factor determinante en la velocidad de corrosión del material metálico, ya que influye en la actividad de las especies iónicas involucradas en las

reacciones electroquímicas, y así, altas temperaturas aceleran el desgaste de la superficie.

3.2.2. *Humedad*

La presencia de agua incrementa las velocidades de corrosión al ser un electrólito de alta conductividad y reaccionar con la mayoría de especies iónicas. Se considera a un área industrial como húmeda cuando muchas de sus superficies están expuestas a vapor o aire con alta humedad relativa durante períodos largos de tiempo.

3.2.3. *Naturaleza química del ambiente*

Las especies iónicas presentes influyen no únicamente en la velocidad de corrosión, sino también en el tipo de desgaste que sufre el material (e.g., la presencia de cloro favorece la corrosión por picaduras). Por lo general, la existencia de iones de alta electronegatividad en el ambiente eleva la categoría de corrosividad del mismo a las clases C4 y C5 de la norma ISO 12944:2018.

3.3. Resultados

Una vez ejecutada la observación técnica de las áreas y la recolección de la información sobre los criterios de evaluación usando el protocolo del Anexo 1, se procedió al llenado de las siguientes fichas, que establecen los sistemas recomendados por la Norma ISO 12944-5:2018 para cada área dentro de la planta de papel tisú.

3.3.1. *Áreas de categoría C3*

Los sistemas de recubrimiento adecuados para recubrir las estructuras metálicas localizadas en estas áreas por un período de durabilidad media se muestran en la Tabla 3.1. Las áreas de la planta sometidas a este tipo de ambiente son las siguientes:

3.3.1.1. Exterior de tanques de almacenamiento de agua tratada y agua de proceso

Se trata de los tanques que almacenan el efluente de la zona de tratamiento de agua residual en espera de ser utilizado en el pulper de dilución de material de reciclaje o en

la sección húmeda del área de conversión, o bien de aquellos que almacenan agua pura de la red de distribución. En las instalaciones de la planta, estos tanques están ubicados al aire libre, y por tanto están expuestos a la intemperie y luz solar.

3.3.1.2. Estructura metálica de bodegas de almacenamiento

Por lo general, las plantas no integradas de papel tisú adquieren la pulpa de madera blanqueada y seca en fardos de embalaje que son almacenados previo a su fluidización en pulpers. De igual manera, los rollos recién recolectados del carrete de bobina al finalizar el proceso son almacenados en bodega.

Tabla 3.1: Sistemas de recubrimientos de durabilidad media recomendados para áreas de categoría de corrosividad C3 dentro de la planta de producción de papel tisú.

Información general:	Ambiente: <input type="checkbox"/> C1 <input type="checkbox"/> C2 <input checked="" type="checkbox"/> C3 <input type="checkbox"/> C4 <input type="checkbox"/> C5 <input type="checkbox"/> CX		Superficies expuestas a: <input checked="" type="checkbox"/> Abrasión <input checked="" type="checkbox"/> Calor <input checked="" type="checkbox"/> Intemperie <input type="checkbox"/> Ácido/base fuerte <input type="checkbox"/> Esfuerzo mecánico <input type="checkbox"/> Humedad	
	Materiales: <input checked="" type="checkbox"/> Acero <input checked="" type="checkbox"/> Hierro	Mantenimiento: <input checked="" type="checkbox"/> Retoque <input checked="" type="checkbox"/> Renovación parcial <input type="checkbox"/> Renovación total	Temperatura de las superficies: Ambiente y menores a 50 °C, a excepción de capotas y c. Yankee en los cuales es mayor a 97 °C	
Preparación de superficie recomendada	Limpieza por lijado manual y mecánico de acuerdo a la guía de preparación del estándar ISO 8504-3:2018.			
Sistemas de recubrimientos recomendados:		ISO 12944-5/C3.02	ISO 12944-5/C3.05	ISO 12944-5/C3.08
	<i>Imprimación anticorrosiva</i>	AK, PUR	EP, PUR, ESI	Zn (R)
	<i>EPS (µm)</i>	60-160	80-120	40-60
	<i>Capa intermedia</i>	—	—	—
	<i>Acabado</i>	AK, PUR	EP, PUR	EP, PUR, ESI
	<i>EPSN (µm)</i>	160	120	60

3.3.1.1. Sección de secado del equipo de conversión

Comprende las estructuras metálicas localizadas en el extremo seco de la máquina de papel, como el andamiaje que rodea la máquina, las capotas o campanas que cubren el cilindro Yankee, el montaje de los sistemas de enhebrado y estabilización de la hoja, la enrolladora y el extractor de mandriles y bobina.

3.3.2. Áreas de categoría C4

Los sistemas de recubrimientos adecuados para recubrir las estructuras localizadas en estas áreas por un período de durabilidad media se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Sistemas de recubrimientos de durabilidad media recomendados para áreas de categoría de corrosividad C4 dentro de la planta de producción de papel tisú.

Información general:	Ambiente: <input type="checkbox"/> C1 <input type="checkbox"/> C2 <input type="checkbox"/> C3 <input checked="" type="checkbox"/> C4 <input type="checkbox"/> C5 <input type="checkbox"/> CX		Superficies expuestas a: <input checked="" type="checkbox"/> Abrasión <input checked="" type="checkbox"/> Calor <input checked="" type="checkbox"/> Intemperie <input type="checkbox"/> Ácido/base fuerte <input checked="" type="checkbox"/> Esfuerzo mecánico <input checked="" type="checkbox"/> Humedad	
	Materiales: <input checked="" type="checkbox"/> Acero <input checked="" type="checkbox"/> Hierro	Mantenimiento: <input checked="" type="checkbox"/> Retoque <input checked="" type="checkbox"/> Renovación parcial <input type="checkbox"/> Renovación total	Temperatura de las superficies: Ambiente y menores a 50 °C	
Preparación de superficie recomendada	Limpieza por lijado manual y mecánico de acuerdo a la guía de preparación del estándar ISO 8504-3:2018.			
Sistemas de recubrimientos recomendados:		ISO 12944-5/C4.02	ISO 12944-5/C4.05	ISO 12944-5/C4.09
	<i>Imprimación anticorrosiva</i>	AK, PUR	EP, PUR, ESI	Zn (R)
	<i>EPS (μm)</i>	60-80	80-160	60-80
	<i>Capa intermedia</i>	AK, PUR	EP, PUR	EP, PUR, ESI
	<i>EPS (μm)</i>	60-80	0-50	40-50
	<i>Acabado</i>	AK, PUR	EP, PUR	EP, PUR
	<i>EPS (μm)</i>	40-80	20-50	40-50
	<i>EPSN (μm)</i>	200	180	160

3.3.2.1. Interior de tanques de almacenamiento de agua tratada y agua de proceso

La superficie interior de los tanques permanece en contacto permanente con el agua, aunado a esto, ambos tipos de agua poseen concentraciones de bajas a moderadas de iones salinos.

3.3.2.2. Sección húmeda del equipo de conversión

Comprende las estructuras metálicas cercanas a los pulper de dilución, incluyendo los cajones de entrada, la mesa plana de Fourdrinier o un equipo equivalente de flujo de aproximación, los cilindros formadores y el rodillo presa aspirante en que inicia la sección del fieltro.

Conclusiones

1. Se presentaron tres sistemas de recubrimientos genéricos para lograr una durabilidad media de protección de las estructuras metálicas en diferentes áreas de la planta: i) imprimación anticorrosiva de base alquídica o poliuretano seguida de un acabado de la misma resina; ii) primario anticorrosivo epoxi, poliuretano o etil-silicato y recubrimiento de acabado epoxi o poliuretano; y iii) anticorrosivo base rico en zinc y acabado epoxi, poliuretano o etil-silicato. Los tres sistemas pueden ser utilizados en todas las áreas descritas en el trabajo de aplicación teniendo en cuenta que, de incrementar la categoría de corrosividad del ambiente, se debe aumentar el espesor nominal de película seca del sistema.
2. Se determino que áreas como el exterior de tanques de almacenamiento de agua tratada y agua de proceso, la estructura metálica de bodegas de almacenamiento de materia prima y producto terminado y la sección seca del equipo de conversión de pulpa a papel cumplían requerimientos cualitativos para ser clasificadas como ambientes de categoría de corrosividad C3; de la misma manera áreas como el interior de tanques de almacenamiento de agua tratada y de proceso y la sección húmeda del equipo de conversión fueron clasificadas como ambientes de categoría C4.
3. Los recubrimientos genéricos recomendados son los que respalda la norma ISO 12944:2018 como protección anticorrosiva para los ambientes de categorías C3 y C4. Siendo los sistemas presentados en este trabajo identificables globalmente de acuerdo a sus designaciones estándar: ISO 12944-5/C3.02, /C3.05, /C3.08, /C4.02, /C4.05, y /C4.08.

Recomendaciones

1. Ya que la durabilidad de un sistema protector habitualmente se asume que es más corta que el período de servicio esperado de la estructura, se deben suministrar consideraciones adicionales en la fase de planificación y diseño sobre la posibilidad de su mantenimiento o renovación.
2. Los elementos estructurales que se exponen a las tensiones de corrosión y que ya no son accesibles para las medidas de protección anticorrosiva después del montaje, deben proporcionarse con protección anticorrosiva que permanecerá efectiva, y por tanto verifica la estabilidad de la estructura para la duración del periodo deservicio de la estructura. Si esto no se puede alcanzar mediante sistemas de recubrimiento protectores, se deben tomar otras medidas (por ejemplo, los componentes fabricados a base de materiales resistentes a la corrosión, en el diseño de los elementos de tal manera que son reemplazables o mediante especificación de una tolerancia corrosiva).
3. No debe minimizarse la importancia de un método de preparación de superficie adecuado, en proyectos de renovación total debe seguirse el establecido por la norma (en la mayoría de casos, limpieza por chorro abrasivo) mientras que en los proyectos de renovación parcial una evaluación holística (i.e., que tome en cuenta aspectos como el tratamiento de hendiduras, imperfecciones superficiales, conexiones atornilladas tuercas, arandelas, ranuras, etc.) del área puede ayudar a seleccionar un método adecuado para la superficie.

Bibliografía

Sitios web

- Acrowood. (s.f.). *Acrowood debarking, chippers and chip screening machines*. Recuperado el 1 de mayo de 2023 de <https://acrowood.com/>
- Amarine. (s.f.). *What is Pitting Mechanism and Prevention?* Recuperado el 8 de diciembre de 2023 de <https://amarineblog.com/2020/11/02/what-is-pitting-mechanism-and-prevention/>
- Bruks-Siwertell. (s.f.). *Stationary and Mobile Industrial Wood Chippers*. Recuperado el 1 de mayo de 2023 de <https://bruks-siwertell.com/chipping>. Sede de organización: Estocolmo, Suecia.
- Hergen. (s.f.). *Hergen Products for Tissue Paper*. Recuperado el 15 de agosto de 2023 de <https://www.hergen.com.br/en/products/tissue-paper/>. Sede de organización: Santa Catarina, Brasil
- Parason Machinery. (s.f.). *Parason Machinery Pulping Products*. Recuperado el 15 de agosto de 2023 de <https://www.parason.com/products/pulping>. Sede de organización: São Paulo, Brasil.
- Valmet Forward. (s.f.). *Valmet Board and Paper Machines*. Recuperado el 20 de agosto de 2023 de <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/> Sede de organización: Espoo, Finlandia
- Wikipedia. (s.f.). *Celda galvánica*. Recuperado el 15 de noviembre de 2023 de https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_galv%C3%A1nica#. Sede de organización: California, USA.
- Wikipedia. (s.f.). *Uretano*. Recuperado el 8 de diciembre de 2023 de <https://es.wikipedia.org/wiki/Uretano>. Sede de organización: California, USA.

Artículos científicos

- Aguilar Rivera, N. (marzo-mayo de 2004). El reciclado de papel y cartón. *Elementos: ciencia y cultura*, 11(53), 54-56. ISSN: 0187-9073
- Area, M. C., Felissia, F., & Venica, A. (2007). Blanqueo de papeles reciclados. Adición de quelantes: Ventajas y resultados prácticos. *Celulosa y Papel*, 1 (2), 1-9.
- Uribe R., G. H., & Fuentes L., J. (julio-diciembre de 2009). Aplicación de blanqueo TCF en mezclas de fibras químicas y mecánicas recicladas: Alternativa para la Industria Papelera. *Energética*(42), 9-19. ISSN 0120-9833.

Libros de texto

- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. 1ª Ed. Elsevier Ltd. Burlington, Massachussets, USA. ISBN 9780080480336
- Annergren, G., & Lundqvist, F. (2008). *Continuous Kraft Cooking: Research & Applications*. 1ª Ed. STFI-Packforsk. Stockholm, Sweden.

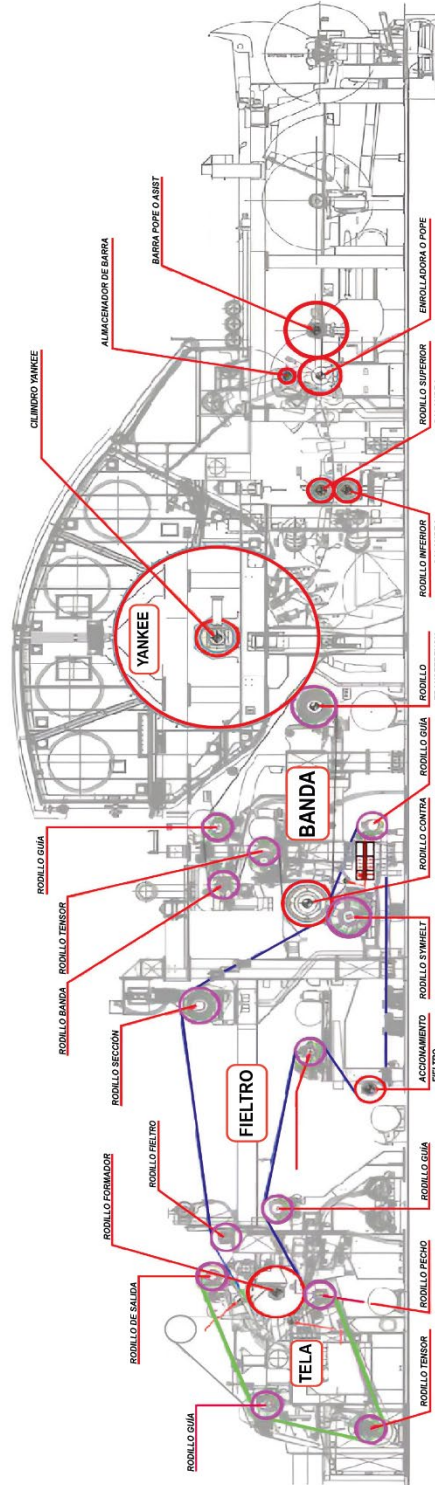
- Bajpai, P. (2010). *Environmentally-friendly production of pulp and paper* (1ª Ed.). John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA. DOI:10.1002/9780470649657
- Craig, B. D., Lane, R. A., & Rose, D. H. (2006). *Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials* (1ª Ed.). Advanced Materials, Manufacturing and Testing Information Analysis Center. New York, USA.
- Dykastra, H. (2006). Corrosion in the pulp and paper industry. En S. D. Cramer, & B. S. Covino (Edits.), *ASM Handbook Volume 13C - Corrosion: Environments and Industries* (1ª. Ed., págs. 762-802). United States of America: ASM International. DOI: 10.31399/97816270881849
- Gullichsen, J. (2000). Fiber line operations en Gullichsen, Johan & Fogelholm, Carl-Johan (Edits.) *Chemical Pulping* (1ª Ed. Vol. A. pp. 19-25). *Papermaking Science & Technology*. Finnish Paper Engineers' Association. Finland.
- Russel, J. B. (2006). *Wood yard operations*. 1ª Ed. (S. H, Ed.) Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. Germany.
- Sander, J., Kirmaier, L., Manea, M., Shchukin, D., & Skorb, E. (2010). *Anticorrosive Coatings: Fundamentals and New Concepts*. 1ª. Ed. Vincentz Network. Hanover, Germany.

Otros

- Herrera S., J. A. (2019). *Impacto del coating y crepado en la calidad del papel elaborado en FPC Tissue*. Concepción, Chile: Universidad del Bío-Bío. Recuperado de <http://repobib.ubiobio.cl>
- Widmaier, T., Kuosmanen, P., & Juhanko, J. (2011). Measurement of guideway alignment of an on-site grinding machine. *56th International Scientific Colloquium* (págs. 1-4). Ilmenau: Ilmenau University of Technology. Germany.

Anexos

Anexo 1: Esquema general de cilindros de formación del papel en la máquina Valmet NTT 200HS Advantage



Anexo 2: Protocolo de observación de áreas



Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos
Introducción al Control de la Corrosión Industrial

Estudio diagnóstico por áreas y recomendación de sistemas de recubrimientos como protección contra corrosión de estructuras de acero en una planta de fabricación de papel tisú.

PROTOCOLO PARA OBSERVACIÓN TÉCNICA DE ÁREAS

FECHA: _____

Nombre del área: _____

Descripción del área: _____

Presencia visual de óxido sobre las superficies metálicas:

No

Sí

De acuerdo a Norma ASTM D610:

Tipo de óxido:

Generalizado

Puntual

Híbrido

Grado de oxidación de la superficie (0-10): _____

Temperatura dentro del área: _____

Tipo de área:

Húmeda

Seca

Presencia de polvo o sólidos acumulados sobre las superficies:

No

Sí

Exposición de superficies metálicas a luz solar:

No

Sí

¿Existe vibración dentro del área?

No

Sí

¿Existen superficies metálicas sumergidas en agua?

No

Sí

¿Existen superficies metálicas enterradas?

No

Sí

¿Existen superficies metálicas sometidas a rozamiento/fricción?

No

Sí

Presencia de iones inorgánicos sobre las superficies metálicas: No Sí

Na⁺ NH₄⁺ H⁺ Cl⁻, ClO₂⁻, ClO₃⁻
S₂⁻, SO₃²⁻, SO₄²⁻ O²⁻, OH⁻ CO₃²⁻
NO₂⁻, NO₃⁻ PO₃³⁻, PO₄³⁻ Otro: _____

¿Existen superficies metálicas recubiertas dentro del área? No Sí

Estado del recubrimiento:
 > 1 año < 1 año

Tipo de mantenimiento recomendable para el recubrimiento:
 Retoque Renovación parcial
 Renovación total

Tipo de recubrimiento:
 Conocido

Nº de capas:
1 2 3 o más

Capa anticorrosiva:
 No
 Sí

Desconocido
AK AY ESI
PUR PAS PS
ZnR EP

Capa de acabado:
 No
 Sí

Desconocido
AK AY ESI
PUR PAS PS
ZnR EP

Desconocido

Espesor de película seca nominal: _____

Categoría de corrosividad del ambiente: C1 C2 C3 C4 C5 CX

Durabilidad requerida: Baja Media Alta Muy alta

Anexo 3: Ejemplo de llenado de protocolo



Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos
Introducción al Control de la Corrosión Industrial

Estudio diagnóstico por áreas y recomendación de sistemas de recubrimientos como protección contra corrosión de estructuras de acero en una planta de fabricación de papel tisú.

PROTOCOLO PARA OBSERVACIÓN TÉCNICA DE ÁREAS

FECHA: *lunes 2 de octubre de 2023*

Nombre del área: *Exterior de tanques de agua de proceso y agua tratada*

Descripción del área: *Se refiere a la superficie exterior de todos los tanques que almacenan agua que proviene de la red de distribución y el agua residual cuyo tratamiento ha sido ejecutado.*

Presencia visual de No *Sí*

óxido sobre las superficies metálicas: De acuerdo a Norma ASTM D610:
Tipo de óxido:

Generalizado

Puntual

Híbrido

Grado de oxidación de la superficie (0-10): 3

Temperatura dentro del área: *Ambiente*

Tipo de área: Húmeda *Seca*

Presencia de polvo o sólidos acumulados sobre las superficies: *No* Sí

Exposición de superficies metálicas a luz solar: No *Sí*

¿Existe vibración dentro del área? *No* Sí

¿Existen superficies metálicas sumergidas en agua? *No* Sí

¿Existen superficies metálicas enterradas? *No* Sí

¿Existen superficies metálicas sometidas a rozamiento/fricción? *No* Sí

Presencia de iones **No** Sí
 inorgánicos sobre las superficies metálicas:

Na⁺ NH₄⁺ H⁺ Cl⁻, ClO₂⁻, ClO₃⁻
S₂⁻, SO₃²⁻, SO₄²⁻ O²⁻, OH⁻ CO₃²⁻
NO₂⁻, NO₃⁻ PO₃³⁻, PO₄³⁻ Otro: _____

¿Existen superficies metálicas recubiertas dentro del área? No **Sí**

Estado del recubrimiento:
 > 1 año < 1 año

Tipo de mantenimiento recomendable para el recubrimiento:
 Retoque **Renovación parcial**
 Renovación total

Tipo de recubrimiento:
 Conocido

Nº de capas:
1 2 3 o más

Capa anticorrosiva:
 No
 Sí

Desconocido
AK AY ESI
PUR PAS PS
ZnR EP

Capa de acabado:
 No
 Sí

Desconocido
AK AY ESI
PUR PAS PS
ZnR EP

Desconocido

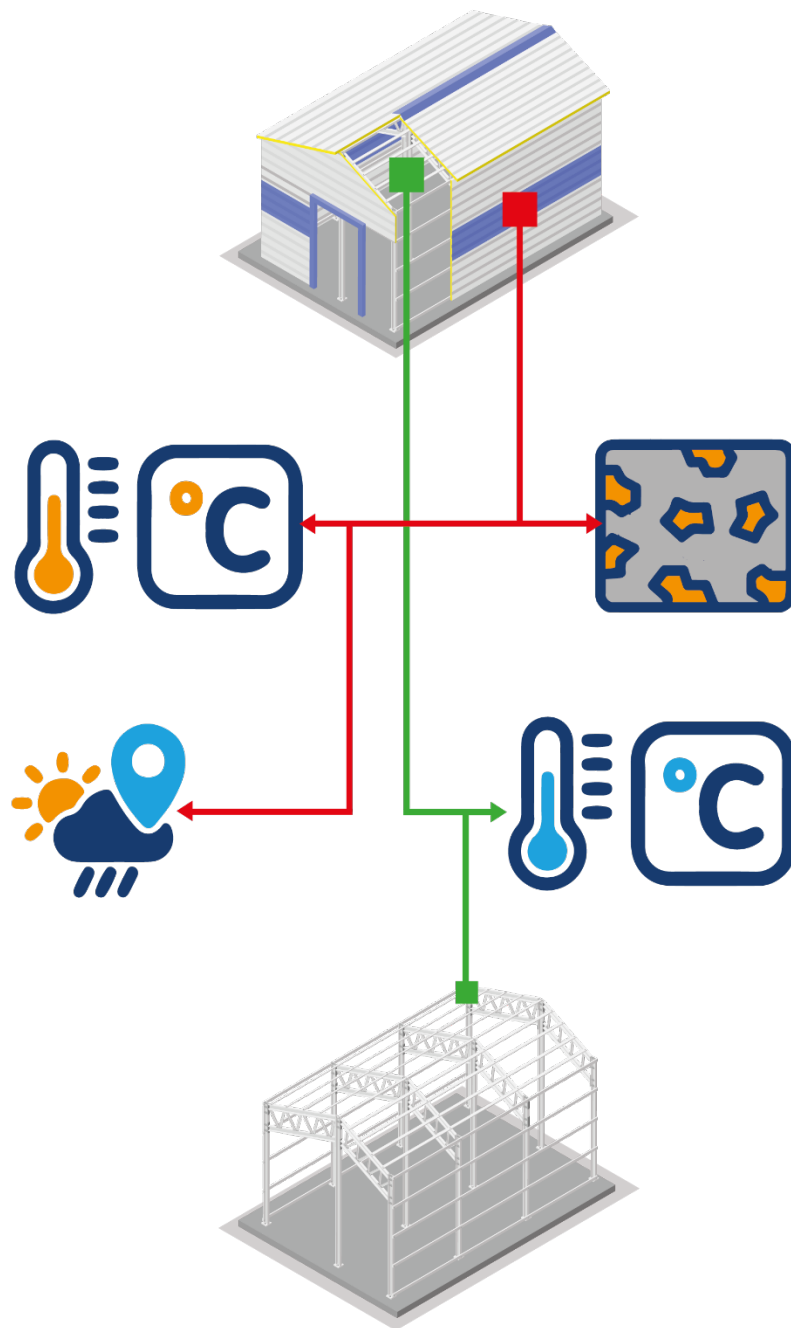
Espesor de película seca nominal: **6-7 mils**

Categoría de corrosividad del ambiente: C1 C2 **C3** C4 C5 CX

Durabilidad requerida: Baja **Media** Alta Muy alta

Anexo 4: Esquemas iconográficos de áreas dentro de la planta de papel tisú

EXTERIOR E INTERIOR DE BODEGAS DE ALMACENAMIENTO



EXTERIOR E INTERIOR DE TANQUES

