



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Edificación

Optimización en procesos de preparación de superficie y
tratamientos anticorrosivos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Arquitectura Técnica

AUTOR/A: Palop Vargas, Carmen

Tutor/a: Fullana Alfonso, Màrius Josep

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio técnico y práctico de la preparación de superficies metálicas para la posterior aplicación de tratamientos anticorrosivos, abordando tanto los fundamentos teóricos como el desarrollo experimental en un entorno profesional. Se analizan los mecanismos de corrosión, los principales métodos de limpieza, los estándares normativos aplicables y los procedimientos de inspección y control de calidad. Además, se incluye una fase de optimización mediante herramientas como Solver y Wolfram Mathematica, aplicada a casos reales de obra y taller, con el fin de mejorar la eficiencia y reducir costes en los procesos de tratamiento. El trabajo ha sido desarrollado en colaboración con una empresa del sector, Enesa Continental, lo que ha permitido aplicar los conocimientos en un contexto profesional real y obtener conclusiones prácticas con impacto directo en la gestión técnica de proyectos.

This Final Degree Project focuses on the technical and practical study of the preparation of metal surfaces for the subsequent application of anticorrosive treatments, addressing both the theoretical foundations and experimental development in a professional setting. It analyzes corrosion mechanisms, the main cleaning methods, applicable regulatory standards, and inspection and quality control procedures. It also includes an optimization phase using tools such as Solver and Wolfram Mathematica, applied to real-life construction and workshop cases, with the aim of improving efficiency and reducing costs in treatment processes. The project was developed in collaboration with Enesa Continental, a company in the sector, which allowed the application of knowledge in a real-life professional context and the extraction of practical conclusions with a direct impact on technical project management.

Aquest Treball de Fi de Grau se centra en l'estudi tècnic i pràctic de la preparació de superfícies metàl·liques per a la posterior aplicació de tractaments anticorrosius, abordant tant els fonaments teòrics com el desenvolupament experimental en un entorn professional. S'analitzen els mecanismes de corrosió, els principals mètodes de neteja, els estàndards normatius aplicables i els procediments d'inspecció i control de qualitat. A més, s'inclou una fase d'optimització mitjançant eines com Solver i Wolfram Mathematica, aplicada a casos reals d'obra i taller, amb la finalitat de millorar l'eficiència i reduir costos en els processos de tractament. El treball ha sigut desenvolupat en col·laboració amb una empresa del sector, Enesa Continental, la qual cosa ha permès aplicar els coneixements en un context professional real i obtenir conclusions pràctiques amb impacte directe en la gestió tècnica de projectes.

Palabras clave: Corrosión, Inspección, Optimización Preparación de superficies, Recubrimientos.

Keywords: Coatings, Corrosion, Inspection, Optimization, Surface Preparation, Coatings.

Agradecimientos

Por el presente proyecto, me gustaría agradecer a Enesa Continental, la oportunidad de haberme permitido realizar las prácticas y continuar desarrollándome profesionalmente en la empresa, haciendo que pueda seguir desarrollando los conocimientos adquiridos y viviendo una muy buena experiencia. En especial, quiero agradecer a Santi, CEO de la empresa y a Aroa, técnica del departamento por su apoyo diario y su disposición para ayudarme en todo momento.

También dar las gracias a los compañeros con los que he compartido estos años de carrera. A todos los profesores que han formado parte de todo el proceso de aprendizaje y en especial a Màrius, mi tutor del proyecto, por su gran comprensión y su gran apoyo, ayudándome a darle forma y enfoque a este proyecto.

Por último, agradecer el apoyo a mi familia, a mis padres y hermanos, a mi pareja y a mi mejor amiga Andrea, por su apoyo incondicional y por animarme en cada etapa de mi vida.

Muchas gracias a todos.

Acrónimos utilizados

AMPP: Association for Materials Protection and Performance

CIP: Coating Inspector Program

CTE: Código Técnico de la Edificación

DFT: Dry Film Thickness (Espesor de Película Seca)

ISO: International Organization for Standardization

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

RAL: Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen-Ausschuss für

SSPC: Society for Protective Coatings

TFG: Trabajo Fin de Grado

VOC: Volatile organic Compounds (Compuestos Orgánicos Volátiles)

WTF: Wet Film Thickness (Espesor de Película Húmeda)

Índice

Resumen.....	2
Agradecimientos	3
Acrónimos utilizados	4
Índice	5
Capítulo 1. Introducción.....	7
1.1. Contexto y objetivo del proyecto.	7
1.2. Estructura del trabajo.	7
1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	8
Capítulo 2. Fundamentos teóricos y tecnológicos	10
2.1. ¿Qué es la corrosión?	10
2.2. Clasificación de la corrosión según su mecanismo y apariencia.	10
2.2.1. Serie galvánica.....	13
2.3. Mecanismos de corrosión.....	14
2.4. Factores que afectan a la corrosión.....	14
2.5. Consecuencias estructurales y económicas.....	15
Capítulo 3. Preparación de la superficie	16
3.1. Importancia de la preparación de superficies.	16
3.2. Actividades previas a la preparación.	16
3.2.1. Defectos de soldadura y preparación previa.	18
3.3. Métodos de preparación.	20
3.3.1. Métodos avanzados de limpieza: Sponge-jet , láser y limpieza robotizada.	22
3.4. Perfil de anclaje.	26
3.5. Control de contaminantes solubles.	26
3.6. Estándares de preparación de superficies metálicas: Normativa ISO y AMPP.....	27
3.7. Métodos de limpieza abrasiva seca.	28
3.8. Métodos de limpieza con agua: Waterjetting y Water Blasting.	29
3.8.1. Waterjetting.	30
3.8.2. Water Blasting.....	30
Capítulo 4. Sistemas de protección anticorrosiva.....	32

4.1.	Fundamentos y función de los recubrimientos protectores.	32
4.2.	Clasificación de los recubrimientos y mecanismos de curado.	32
4.2.1.	Recubrimientos orgánicos.....	32
4.2.2.	Recubrimientos inorgánicos.....	32
4.2.3.	Composición.....	33
4.2.4.	Clasificación según mecanismo de curado.	33
4.2.5.	Compatibilidad entre recubrimientos.....	35
4.2.6.	Criterios de selección según ambientes (ISO 12944-2).....	36
4.2.7.	Vida útil esperada y mantenimiento.....	37
4.2.8.	Consideraciones finales.....	38
Capítulo 5.	Inspección y control de calidad.....	39
5.1.	Rol de inspector.	39
5.2.	Tipos de inspección.....	39
5.3.	Herramientas e instrumentos de inspección.....	40
5.4.	Documentación técnica.	43
5.5.	Procedimientos y listas de verificación (check lists).....	43
5.6.	Fallos comunes en recubrimientos: Causas y prevención.	44
Capítulo 6.	Optimización de recursos en procesos de preparación de superficie.....	45
6.1.	Introducción del estudio de optimización.	45
6.2.	Planteamiento de los problemas.	46
6.2.1.	Ejemplo 1: Métodos en taller.....	47
6.2.2.	Ejemplo 1: Métodos en obra.....	52
Capítulo 7.	Conclusiones	57
Capítulo 8.	Bibliografía	60
Capítulo 9.	Índice de Figuras	62
Capítulo 10.	Índice de Tablas	64
Anexos		65

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Contexto y objetivo del proyecto.

La corrosión en estructuras metálicas representa uno de los principales desafíos en el ámbito de la construcción y la ingeniería industrial, ya que compromete la durabilidad, la seguridad estructural y el rendimiento de los sistemas constructivos. En este contexto, la correcta preparación de la superficie metálica, junto con la selección y aplicación adecuada de sistemas de protección anticorrosiva, constituye un factor determinante para garantizar la eficacia de las soluciones empleadas.

Este Trabajo Fin de Grado se enmarca dentro de la modalidad experimental y ha sido desarrollado en colaboración con la empresa Enesa Continental (<https://enesacontinental.com/>), especializada en tratamientos ignífugos y protección anticorrosiva. El objetivo principal del estudio es optimizar los procesos de preparación de superficies metálicas, mediante el análisis técnico de los distintos métodos empleados (limpieza con agua, abrasivos, etc.) y la implementación de herramientas de optimización matemática para mejorar el rendimiento técnico y económico de las operaciones.

1.2. Estructura del trabajo.

La primera parte del trabajo aborda los fundamentos teóricos relacionados con la corrosión metálica, sus mecanismos, factores condicionantes y consecuencias, con el fin de justificar la necesidad de aplicar tratamientos protectores adecuados. A continuación, se estudian en detalle los métodos de preparación de superficies, incluyendo los estándares internacionales de calidad (ISO y AMPP), los tipos de limpieza (manual, mecánica, abrasiva seca y húmeda) y los parámetros clave como el perfil de anclaje o la presencia de contaminantes solubles.

Posteriormente, se profundiza en el control de calidad y los procedimientos de inspección técnica, abordando el rol del inspector, las herramientas utilizadas y los registros documentales exigibles por la normativa vigente. Se incluye también un diagrama de flujo como síntesis de las fases del proceso de inspección de recubrimientos.

Finalmente, se desarrolla un estudio experimental de optimización basado en un modelo matemático que asigna recursos en función de variables como el coste, rendimiento y tipo de suciedad presente (óxido o pintura antigua). Estos problemas propuestos han sido resueltos mediante Excel Solver y Wolfram Mathematica, permiten comparar distintos escenarios de producción tanto en taller como en obra, y proponer soluciones técnicas que permiten a la empresa mejorar su eficiencia operativa.

Este trabajo ofrece una visión completa y aplicada del proceso de preparación de superficies, combinando el enfoque técnico con herramientas de optimización práctica, y aportando resultados aplicables directamente a la planificación real de obras y procesos industriales.

1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son el eje central de la Agenda 2030 impulsada por Naciones Unidas, un compromiso internacional aprobado en 2015 para erradicar la pobreza, proteger el planeta y mejorar la vida de las personas. La agenda establece 17 objetivos globales y 169 metas que abordan desafíos como el cambio climático, la salud, la educación, la igualdad de género, la energía sostenible y la innovación.

Estos objetivos requieren la implicación activa de gobiernos, empresas, universidades y profesionales. En el ámbito técnico e industrial, especialmente en la construcción, su aplicación se traduce en fomentar prácticas sostenibles, eficientes y responsables con el entorno.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). 2025. Fuente: <https://fundacioniter.org/objetivos-desarrollo-sostenible-ods/>

Este Trabajo Fin de Grado incorpora varios de los ODS establecidos por la Agenda 2030, contribuyendo desde el sector técnico e industrial a la innovación y optimización de procesos que permiten mejorar la durabilidad y la seguridad estructural, y a la vez minimizan el impacto ambiental. A continuación, se detallan los ODS vinculados con el contenido y los objetivos de dicho proyecto:

- **ODS 3: Salud y Bienestar**

La implementación de soluciones anticorrosivas óptima mejora la integridad estructural de las instalaciones, reduciendo el riesgo de accidentes que pueden comprometer la seguridad y salud de los trabajadores y usuarios.

- **ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico**

La optimización de procesos de preparación de superficies, mediante métodos que reducen costes y tiempos, fomenta un entorno de trabajo más seguro y productivo, impulsando el crecimiento industrial y sostenible.

- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura**

La aplicación de modelos matemáticos y técnicas innovadoras en el tratamiento de superficies metálicas refuerza la competitividad tecnológica del sector, mientras que mejora la durabilidad y seguridad de las infraestructuras.

- **ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles**

Al prolongar la vida útil de las estructuras metálicas, se contribuye al desarrollo urbano sostenible, lo que reduce la necesidad de intervenciones correctivas y mejora de la calidad del entorno construido.

- **ODS 12: Producción y Consumo Responsables**

La evaluación y optimización en el uso de recursos promueven prácticas productivas responsables y minimizan los residuos, en línea con una producción más respetuosa con el medio ambiente.

- **ODS 13: Acción por el clima**

La mejora en la eficiencia de los procesos industriales y la prolongación de la vida útil de los materiales ayudan a reducir la huella de carbono del sector, contribuyendo indirectamente a la mitigación del cambio climático.

Capítulo 2.

Fundamentos teóricos y tecnológicos

2.1. ¿Qué es la corrosión?

La corrosión es el fenómeno de transformación o destrucción de los metales producido por cualquier medio, bien sea físico (fricción, abrasión, erosión, cavitación, agrietamiento), químicos (por acción directa del oxígeno o sustancias oxidantes) o electroquímico (por defectos de pila galvánica, corrientes vagabundas, etc.).

Esta alteración deteriora las propiedades mecánicas y estructurales del material, comprometiendo su funcionalidad y vida útil. Para evitar el deterioro de los elementos metálicos y/o reparar los elementos ya afectados por la corrosión, se aplican tratamientos cuya elección depende de factores como:

- La agresividad del medio ambiente (interior, exterior, ambiente marino o industrial, etc.)
- La durabilidad de la protección requerida.
- El tipo de superficie (naturaleza del acero, tipo de galvanizado, estado de la superficie, etc.).

2.2. Clasificación de la corrosión según su mecanismo y apariencia.

La corrosión puede manifestarse de diferentes formas, dependiendo de factores como el tipo de metal, el entorno ambiental, las tensiones mecánicas presentes y la composición química del medio. A continuación, se describen los principales tipos de corrosión clasificados en función de su mecanismo y apariencia superficial:

- Corrosión uniforme: Es el tipo más común y se caracteriza por una pérdida de material homogénea a lo largo de toda la superficie expuesta. Su detección es sencilla y su progresión relativamente predecible.



Figura 2. Corrosión uniforme. 2025. Fuente: Elaboración propia.

- **Corrosión galvánica:** Se produce cuando dos metales diferentes están en contacto eléctrico en presencia de un electrolito. El metal menos noble actúa como ánodo y se corroe, mientras el otro actúa como cátodo y permanece protegido.

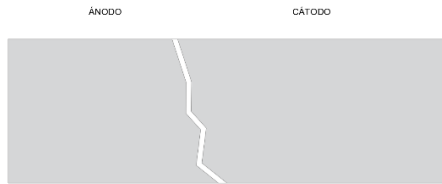


Figura 3. Corrosión galvánica. 2025. Fuente: Elaboración propia.

- **Corrosión por picaduras:** Es un tipo de corrosión localizada que genera cavidades o pequeños orificios profundos en la superficie metálica. Puede comprometer gravemente la integridad estructural del elemento.

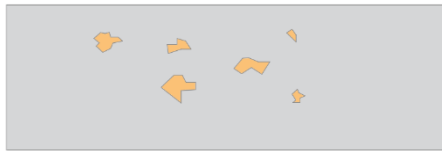


Figura 4. Corrosión por picaduras. 2025. Fuente: Elaboración propia.

- **Corrosión por grietas:** Se desarrolla en zonas con poco acceso al oxígeno, como uniones atornilladas, solapes o juntas.



Figura 5. Corrosión por grietas. 2025. Fuente: Elaboración propia.

- **Corrosión intergranular:** Afecta a los límites de grano del metal debilitando su estructura interna. Es común en aceros inoxidable mal tratados térmicamente y puede ser difícil de detectar a simple vista.

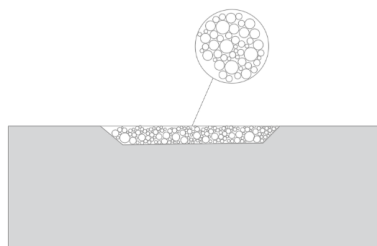


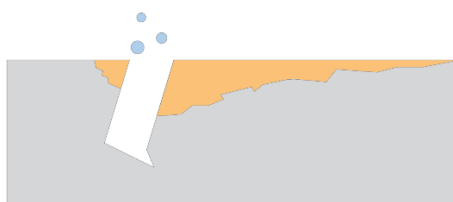
Figura 6. Corrosión intergranular. 2025. Fuente: Elaboración propia

- **Corrosión bajo tensión:** Se produce por la acción combinada de un ambiente corrosivo y tensiones mecánicas internas o externas. Genera grietas que pueden avanzar de forma rápida e impredecible, afectando gravemente la seguridad estructural.



*Figura 7. Corrosión bajo tensión. 2025.
Fuente: Elaboración propia.*

- **Corrosión por erosión:** Ocurre cuando un fluido en movimiento rápido, o partículas sólidas en suspensión, desgastan la superficie metálica. Es común en tuberías, válvulas o zonas con alta turbulencia.



*Figura 8. Corrosión por erosión. 2025.
Fuente: Elaboración propia.*

- **Corrosión microbiana:** Provocada por la acción de microorganismos, como bacterias reductoras de sulfatos, que generan subproductos corrosivos (como ácidos o sulfuros). Suele encontrarse en ambientes húmedos, redes de agua o instalaciones enterradas.



*Figura 9. Corrosión microbiana. 2025.
Fuente: Elaboración propia.*

2.2.1. Serie galvánica.

La serie galvánica es una clasificación electroquímica que ordena los metales y aleaciones según su potencial de corrosión cuando están en contacto con un electrolito, como el agua del mar a 25°C. En esta lista, los materiales se disponen desde el más activo (que se corroe con mayor facilidad) situado en la parte superior, hasta el más noble o menos activo (que presenta mayor resistencia a la corrosión) en la parte inferior.



Figura 10. Serie Galvánica. 2025. Fuente: Elaboración propia

Los materiales más activos tienen potenciales de corrosión negativos, y a menudo se conocen como anódicos. Los metales menos activos a menudo se conocen como catódicos o nobles y son menos propensos a corroerse.

Cuando dos metales distintos se conectan eléctricamente en presencia de un electrolito, se produce un fenómeno de corrosión galvánica, en el que:

- El metal más activo (anódico) se corroe con rapidez.
- El metal más noble (catódico) permanece protegido.
- La diferencia de potencial entre ambos materiales determina la velocidad del ataque: cuanto mayor sea, mayor será la velocidad de corrosión galvánica.

Por ejemplo, si el zinc (muy activo), se conecta con platino (muy noble), el zinc sufrirá una corrosión acelerada.

Algunos metales como el oro o el platino tienen una resistencia extraordinaria a la corrosión y apenas se ven afectados, aunque su uso puede provocar un fuerte deterioro en los metales a los que estén unidos. Es importante señalar que las condiciones ambientales o la temperatura puedan modificar el orden de los materiales dentro de la serie galvánica.

2.3. Mecanismos de corrosión.

La corrosión puede producirse mediante distintos mecanismos, cuya comprensión es esencial para prevenirla y diseñar sistemas de protección eficaces. Entre los principales mecanismos se encuentran:

- Corrosión química directa: Ocurre por la reacción del metal con agentes oxidantes como el oxígeno atmosférico o ácidos. No requiere la presencia de un electrolito. Ejemplo: oxidación a altas temperaturas.
- Corrosión electroquímica: Es el mecanismo más común. Involucra la transferencia de electrones entre zonas del mismo metal (corrosión localizada) o entre metales distintos (corrosión galvánica), en presencia de un electrolito (agua, humedad, sales).
- Corrosión bajo película: Sucede cuando el recubrimiento no está bien adherido, permitiendo que el agua o sales se acumulen bajo él, favoreciendo reacciones electroquímicas ocultas.
- Corrosión inducida por microorganismos: Ciertos microorganismos, como bacterias reductoras de sulfato, producen sustancias agresivas (ácidos o sulfuros) que aceleran la degradación del metal.

Estos mecanismos pueden actuar por separado o combinados, lo que hace esencial una correcta preparación de la superficie y elección del sistema de protección.

2.4. Factores que afectan a la corrosión.

Diversas variables influyen en la velocidad y el tipo de corrosión que puede sufrir un elemento metálico:

- **Naturaleza del metal base:** Ciertos aceros son más susceptibles a la oxidación, especialmente aquellos con impurezas o tratamientos térmicos inadecuados.
- **Condiciones ambientales:** Factores como la temperatura, humedad relativa, presencia de sales, nieblas salinas o agentes contaminantes industriales aceleran el proceso de corrosión.
- **Diseño constructivo:** Elementos con ángulos agudos, uniones solapadas o zonas de difícil acceso dificultan el mantenimiento y favorecen la acumulación de agua o contaminantes, incrementando el riesgo de corrosión localizada.
- **Presencia de tensiones mecánicas:** Cuando una estructura está sometida a esfuerzos constantes o puntuales, y simultáneamente expuesta a un medio corrosivo, puede producirse corrosión bajo tensión.
- **Compatibilidad con recubrimientos:** Un sistema de protección mal seleccionado o aplicado puede generar fallos prematuros, despegues o incluso favorecer la corrosión bajo película.

2.5. Consecuencias estructurales y económicas.

La corrosión no solo compromete la estética superficial de los elementos constructivos, sino que puede afectar gravemente a la integridad estructural, la seguridad y la viabilidad económica de las obras. Entre las consecuencias más relevantes se encuentra la reducción de la sección resistente del material metálico, lo que disminuye su capacidad portante y puede generar deformaciones o colapsos.

En estructuras protegidas mediante sistemas de pintura o recubrimientos, una mala preparación o aplicación puede derivar en desconchados, fisuras o pérdida de adherencia, permitiendo la penetración de agentes agresivos.

A nivel económico, la corrosión supone un aumento considerable de los costes de mantenimiento, ya que conlleva la necesidad de repintados, limpiezas frecuentes o incluso la sustitución completa de elementos deteriorados. Estas operaciones pueden implicar interrupciones en el servicio o en la actividad de industrias, infraestructuras públicas o edificios en uso.

Además, en estructuras portantes, pasarelas o soportes expuestos, la progresión de la corrosión puede constituir un riesgo directo para la seguridad de los usuarios, motivo por el cual su prevención y control son fundamentales.

Capítulo 3.

Preparación de la superficie

3.1. Importancia de la preparación de superficies.

La preparación de superficies metálicas constituye una fase crítica en el proceso de aplicación de sistemas de protección anticorrosiva e intumescente. Su correcta ejecución garantiza la adherencia, durabilidad y efectividad del sistema de recubrimiento, incidiendo de forma directa en la vida útil de estructuras como cerchas, pasarelas, pilares, forjados colaborantes o elementos de fachada expuestos a entornos industriales, marítimos o urbanos.

El objetivo principal de esta fase es la eliminación de contaminantes visibles e invisibles (óxidos, grasas, sales solubles, polvo, humedad) y la creación de un perfil de anclaje compatible con el sistema protector. Este perfil permite la adecuada adhesión mecánica del recubrimiento, previniendo defectos prematuros.

Diversos estudios —como el publicado por la AMPP (2023)— indican que más del 70 % de los fallos en los sistemas de recubrimiento tienen su origen en una preparación de superficie deficiente. Entre los defectos más frecuentes se encuentran la pérdida de adherencia, la formación de ampollas y burbujas, la corrosión bajo película o el desprendimiento precoz del recubrimiento. Estos fallos no solo comprometen la durabilidad estética, sino que también afectan a la integridad estructural y generan costes adicionales de mantenimiento o sustitución.

Por tanto, la preparación de la superficie no debe considerarse como una operación secundaria, sino como una inversión técnica esencial en la sostenibilidad y eficiencia del proyecto constructivo. Su correcta ejecución constituye la base sobre la que se construye la eficacia del sistema de protección aplicado.

La elección del método adecuado dependerá del tipo de sustrato (acero al carbono, acero galvanizado o inoxidable), del estado inicial de la superficie, del entorno de exposición y de los requerimientos técnicos del sistema de recubrimiento especificado.

3.2. Actividades previas a la preparación.

Antes de proceder con la preparación superficial, es fundamental llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las condiciones del soporte, ya que cualquier defecto o contaminante puede comprometer la adherencia del sistema de recubrimiento y reducir su eficacia.

Las actividades previas recomendadas:

- Inspección de defectos de fabricación: rebordes afilados, cordones de soldadura irregulares, laminaciones, restos de calamina u otras imperfecciones que puedan interferir con la adherencia del recubrimiento.
- Eliminación de depósitos superficiales gruesos: incluyendo restos de grasa, aceite, tierra, polvo, salpicaduras de cemento o cualquier material extraño que pueda actuar como contaminante.
- Verificación de la compatibilidad de recubrimientos antiguos: cuando no se retira completamente la pintura previa, asegurando que el nuevo sistema sea compatible con la base existente.
- Control de la humedad superficial y condensaciones: especialmente en ambientes húmedos o en elementos con baja temperatura superficial, para evitar fenómenos de corrosión bajo película.
- Control de sales solubles.

Estas inspecciones deben realizarse en tres fases clave:

1. Antes del tratamiento, para garantizar que las condiciones iniciales del soporte sean adecuadas.
2. Tras la preparación, comprobando que el grado de limpieza y el perfil de anclaje cumplen con las especificaciones requeridas.
3. Entre capas del sistema multicapa, asegurando que no se introducen contaminantes entre una capa y otra, y que el intervalo de repintado no ha sido excedido.



Figura 11. Contaminación superficial. 2025. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Defectos de soldadura y preparación previa.

La presencia de soldaduras defectuosas o sin preparar adecuadamente puede comprometer de forma crítica la efectividad del sistema de protección anticorrosiva. Según el manual, los cordones de soldadura deben inspeccionarse visualmente antes de iniciar la limpieza, ya que constituyen puntos singulares propensos a acumulación de contaminantes, discontinuidades del recubrimiento o fallos de adherencia.

Los defectos más frecuentes son:

- Salpicaduras de soldadura no eliminadas.
- Socavados en la unión con el metal base.
- Cordones con perfil demasiado afilado.
- Porosidades, grietas o cráteres de contracción.

Estas imperfecciones deben corregirse mediante esmerilado, limado o tratamiento mecánico adecuado para garantizar una superficie uniforme y continua, con transición suave entre metal base y soldadura. Un perfil mal preparado puede generar tensiones en el recubrimiento, bolsas de aire o fisuras prematuras.

La normativa recomienda que la superficie tratada tras la corrección de soldaduras cumpla con el grado de limpieza especificado (por ejemplo, Sa 2½) y un perfil de anclaje compatible con el sistema de recubrimiento a aplicar.

En la figura 12, situada a la izquierda se detallan defectos internos y en la del lateral derecho se detallan los defectos superficiales.

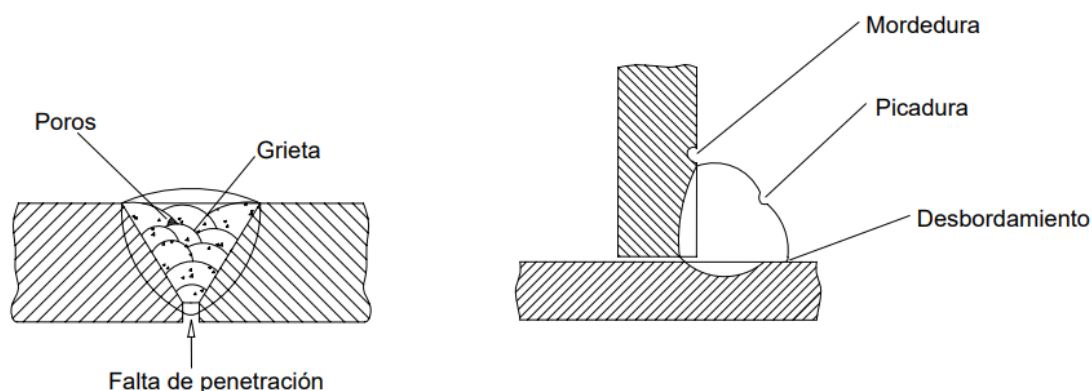


Figura 12. Defectos internos y defectos superficiales en cordones de soldadura. 2025. Fuente: Urbán Brotóns, P. (2010). Construcción de estructuras metálicas. 4.ª ed. ECU.

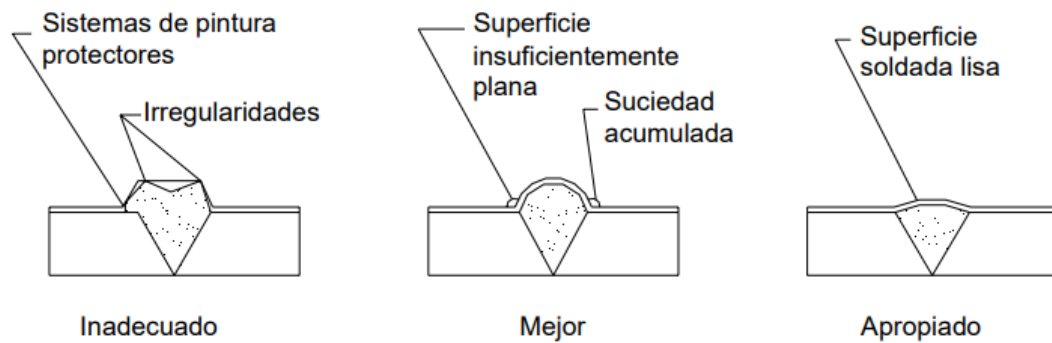


Figura 13. Comparativa de perfiles de soldadura. 2025. Fuente: Urbán Brotóns, P. (2010). Construcción de estructuras metálicas. 4.ª ed. ECU.

En la figura 14 se aprecia un cordón de soldadura sin preparación previa, donde se observan rebordes afilados y restos de salpicaduras. Estas imperfecciones deben de eliminarse antes del tratamiento para evitar defectos de adherencia del recubrimiento. Y en la figura 15 el cordón de soldadura ya está preparado, por tanto se puede visualizar que se ha eliminado el reborde, esmerilado la unión y limpiado el área afectada, generando una transición suave y uniforme entre el metal base y el cordón. La superficie ya está lista para la aplicación del recubrimiento.



Figura 14. Cordón de soldadura sin preparar. 2025. Fuente: Elaboración propia.

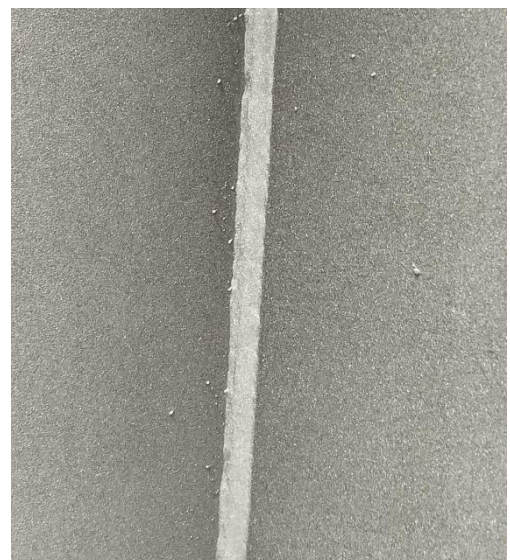


Figura 15. Cordón de soldadura preparado. 2025. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Métodos de preparación.

La elección del método de preparación depende de diversos factores: el tipo de sustrato, el estado inicial de la superficie, el entorno de exposición y los requisitos del sistema de protección. A continuación, se describen los métodos más utilizados:

- Limpieza con disolventes: Este método se emplea para eliminar contaminantes solubles como grasas o aceites. No modifica el perfil superficial ni elimina óxidos adheridos, por lo que se considera una técnica previa o complementaria.

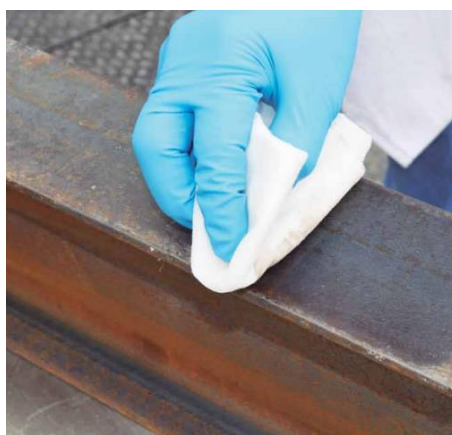


Figura 16. Limpieza manual con disolventes. 2025. Fuente: www.sikaguia.com

- Preparación manual y mecánica: Consiste en el uso de herramientas manuales (cepillos de alambre, espátulas) o mecánicas (esmeriles, agujas percutoras) para eliminar corrosión suelta, pintura deteriorada y escamas.



Figura 17. Limpieza mecánica con cepillo de alambre rotativo. 2025. Fuente: www.wikipedia.org/wiki/Bristle_blasting#/media/File:BristleBlasting.JPG

- Chorro abrasivo (Blasting): Es el método más eficaz para lograr un alto grado de limpieza y generar un perfil de anclaje óptimo. Utiliza partículas abrasivas proyectadas a alta velocidad (en seco o húmedo), eliminando óxidos, pinturas y contaminantes.



Figura 18. Limpieza con chorro abrasivo en cabina semiautomática (blasting). 2025. Fuente: Enesa Continental.

- Waterjetting (chorro de agua a presión alta): Utiliza agua a presiones superiores a 1700 bar, para eliminar recubrimientos deteriorados y contaminantes, minimizando el daño al perfil de anclaje existente.



Figura 19. Chorro de agua a presión alta (Waterjetting). 2025. Fuente: Enesa Continental.

Cada método tiene ventajas y limitaciones y puede aplicarse individualmente o en combinación, según el nivel de limpieza y rugosidad requerida.

El objetivo de todos estos procesos es obtener una superficie limpia, sin contaminantes visibles o solubles y con un perfil de anclaje adecuado para garantizar una óptima adherencia del sistema protector, minimizando el riesgo de fallo prematuro por desprendimiento o corrosión bajo película.

3.3.1. Métodos avanzados de limpieza: Sponge-jet , láser y limpieza robotizada.

En los últimos años han surgido nuevas tecnologías de limpieza superficial, que presentan ventajas en términos de sostenibilidad, seguridad y precisión y complementan o sustituyen a los métodos tradicionales. Entre ellas destacan los sistemas de Sponge-Jet y limpieza con láser. Estas tecnologías aportan beneficios tanto técnicos como medioambientales, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

- **Sistema Sponge-Jet:**

Es un sistema de limpieza abrasiva en seco que emplea esponjas de poliuretano impregnadas con partículas abrasivas proyectadas mediante aire comprimido. Al impactar, las esponjas se deforman y posteriormente recuperan su forma, lo que permite reducir la dispersión de partículas y el polvo en suspensión.

Características principales:

- Proporciona perfil de anclaje.
- Las partículas abrasivas pueden ser óxido de aluminio, escoria o corindón, encapsuladas en la esponja, y su elección varía en función del material base y del estado inicial de la superficie.
- Las esponjas se pueden recuperar, reciclar y reutilizar, lo que reduce el consumo de abrasivo y la generación de residuos.

Ventajas:

- Reducción del 90-95% del polvo generado, lo que mejora la visibilidad, seguridad y limpieza en obra.
- Ideal para trabajos en entornos sensibles a la contaminación.
- Mejora la ergonomía y seguridad del operario, al reducir la exposición a partículas en suspensión.

Limitaciones:

- Coste superior al chorro convencional.
- Menores rendimientos en superficies de gran tamaño o óxidos adheridos.



Figura 21. Limpieza con Sponge-jet. 2025. Fuente: www.soltgn.com

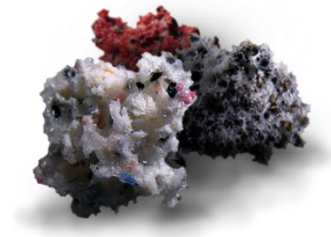


Figura 20. Esponja abrasiva utilizada en Sponge-jet. 2025. Fuente: www.spongejet.com

- **Sistema láser:**

La limpieza con láser es un método no abrasivo que utiliza un láser de alta energía para eliminar capas de contaminantes (óxidos, pinturas, grasas) mediante un proceso de ablación térmica. El material contaminante se vaporiza o sublima sin dañar la superficie metálica adyacente.

Características principales:

- Técnica con precisión, adecuada para zonas con geometrías complejas, soldaduras o elementos delicados.
- No genera residuos sólidos ni líquidos. Solo produce vapores que pueden ser captados por sistemas de aspiración.
- No altera las propiedades metalúrgicas del sustrato si se usa correctamente.

Ventajas:

- No genera polvo, ideal para entornos con altos requerimientos de limpieza.
- No requiere agua, disolventes ni medios abrasivos, reduciendo el impacto ambiental.

Limitaciones:

- Elevado coste de adquisición y mantenimiento del equipo.
- Baja productividad en grandes superficies oxidadas.
- No genera perfil de anclaje.

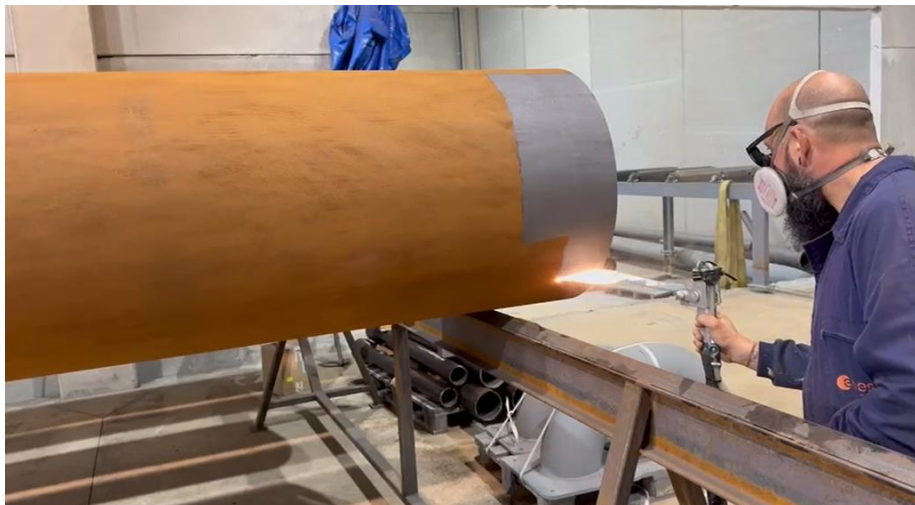


Figura 22. Limpieza con Láser. 2025. Fuente: Enesa Continental.

- **Sistemas de limpieza robotizada:**

El desarrollo de tecnologías automatizadas ha permitido implementar soluciones de limpieza y preparación de superficies robotizadas, como por ejemplo equipos de granallado y chorreado automático para pavimentos, superficies metálicas y estructuras industriales. Estos sistemas mejoran significativamente la eficiencia, la repetibilidad y la seguridad del proceso de preparación.

Tipos de sistemas:

- Robots horizontales: Diseñados para limpiar interiores o exteriores de tuberías, suelos metálicos o plataformas.
- Robots verticales: También conocidos como magnetic climbers, capaces de desplazarse en superficies metálicas verticales (tanques, cascos de barco, depósitos), fijados mediante imanes permanentes o vacío.

Ventajas:

- Generan perfil de anclaje uniforme y controlado.
- Permiten recolectar y reciclar el abrasivo, reduciendo residuos y emisiones de polvo.
- Incrementan la productividad y reducen la exposición del operario a entornos agresivos.

Limitaciones:

- Elevado coste de inversión y mantenimiento.
- Requieren superficies relativamente regulares y acceso adecuado.
- Pueden no ser eficientes en zonas con geometrías complejas, ángulos cerrados o zonas con obstrucciones.



Figura 23. Equipo robotizado (Blastrac), granallado horizontal. 2025. Fuente: Enesa Continental.



Figura 24. Equipo robotizado (Blastrac), granallado vertical. 2025. Fuente: Enesa Continental.

3.4. Perfil de anclaje.

El perfil de anclaje es la rugosidad superficial generada mediante métodos de preparación mecánicos o abrasivos, y constituye un parámetro crítico para asegurar la adherencia del sistema de recubrimiento aplicado. Este perfil debe encontrarse en rangos recomendados por el fabricante del recubrimiento, que suelen oscilar entre 38 y 89 micras, dependiendo del tipo de sistema y las condiciones ambientales en las que estará expuesta la estructura.

Un perfil de anclaje inadecuado, ya sea demasiado liso, lo que impide la adherencia, o excesivamente rugoso, lo que favorece la formación de bolsas de aire o acumulación de contaminantes, puede comprometer gravemente la durabilidad del recubrimiento; favoreciendo procesos de corrosión localizada o desprendimiento prematuro. Por ello, el inspector debe verificar que el perfil se encuentra dentro de los valores especificados antes de aplicar cualquier producto.

Existen diversos métodos para la medición y verificación del perfil de anclaje, entre los que destacan:

- Cinta réplica (Replica Tape): permite obtener una impresión de la superficie para su posterior lectura con micrómetro.
- Perfilómetro de aguja o mecánico: mide directamente las variaciones de altura del perfil.
- Comparadores visuales y cupones de referencia: que permiten una estimación cualitativa frente a superficies patrón normalizadas.

El cumplimiento de las especificaciones del perfil de anclaje es obligatorio en entornos donde se exige alta durabilidad del sistema protector, especialmente en estructuras metálicas expuestas a ambientes industriales o marítimos.

3.5. Control de contaminantes solubles.

Además de eliminar contaminantes visibles como polvo, grasas o aceites, resulta fundamental garantizar la ausencia de contaminantes solubles, como cloruros, sulfatos y nitratos, los cuales pueden depositarse sobre la superficie metálica debido a exposición atmosféricas, salpicaduras de agua de mar o procesos industriales previos.

Estos contaminantes, si no se eliminan adecuadamente, pueden generar corrosión bajo película, afectando la integridad del sistema protector y provocando fallos prematuros por delaminación o formación de óxidos ocultos.

La detección de esas sales solubles se realiza mediante métodos estandarizados, entre los que destaca el ensayo Bresle, que permite cuantificar la concentración de contaminantes extraídos mediante una célula de extracción adherida a la superficie. Otros sistemas incluyen tiras reactivas para cloruros.

Para su eliminación, se emplean enjuagues con agua dulce a presión, soluciones específicas o inhibidores químicos, en función del nivel de contaminación y el tipo de superficie tratada.

Las normas ISO 8/502-6 y ISO 8502-9, recogen los procedimientos para la medición y control de estos contaminantes, estableciendo los límites máximos aceptables según el tipo de recubrimiento a aplicar y el entorno de exposición previsto.

3.6. Estándares de preparación de superficies metálicas: Normativa ISO y AMPP.

Una vez definidos los métodos y aspectos críticos de la preparación de superficies, resulta imprescindible disponer de criterios técnicos normalizados que permiten verificar si se ha alcanzado el nivel de limpieza requerido. Para ello, existen normas internacionales ampliamente aceptadas, que establecen los grados de limpieza, rugosidad superficial y procedimientos de inspección.

Normativa ISO

La serie ISO 8501 define los grados de limpieza superficial, especialmente tras tratamientos mediante limpieza mecánica o chorro abrasivo, utilizando referencias visuales estandarizadas. En el caso del chorreado abrasivo, los grados más comunes son:

Grados ISO	Descripción
Sa 1	Limpieza ligera. Se elimina parte del óxido, pero persisten residuos adheridos.
Sa 2	Limpieza comercial. Se eliminan óxidos, pinturas sueltas y contaminantes, aunque puedan quedar algunas manchas.
Sa 2 ½	Limpieza casi a metal blanco. Se eliminan prácticamente todos los contaminantes, quedando únicamente una sombra tenue. Es el grado más utilizado en obra.
Sa 3	Limpieza a metal blanco. La superficie queda completamente limpia, metálica y uniforme.

Tabla 1. Grados de limpieza superficial s/ISO 8501. 2025.
Elaboración propia a partir de ISO 8501-1:2008.

La norma ISO 8503 regula la medición del perfil de rugosidad, mientras que la ISO 8502 establece los métodos para el control de contaminantes solubles, incluyendo el ensayo Bresle para detección de sales.

Normativa AMPP (antiguas SSPC/NACE)

En el ámbito internacional, especialmente en entornos industriales, es habitual el uso de los estándares de la antigua SSPC/NACE, actualmente unificados bajo la AMPP (Association for Materials Protection and Performance). Estos establecen equivalencias técnicas con la ISO y detallan los métodos de preparación según el tipo de limpieza:

Código SP	Equivalente ISO	Descripción
SP 1	(no aplica)	Limpieza con solventes para eliminar aceites y grasas.
SP 2	≈St 2	Limpieza manual con herramientas no motorizadas.
SP 3	≈ St 3	Limpieza mecánica con herramientas eléctricas.
SP 6	≈ St 2	Limpieza comercial con chorro abrasivo.
SP 10	≈ Sa 2 ½	Limpieza casi a metal blanco mediante chorreado.
SP 5	≈ Sa 3	Limpieza a metal blanco, nivel máx de exigencia.
SP 7	≈ Sa 1	Limpieza ligera con chorreado mínimo.

Tabla 2. Clasificación de métodos de limpieza S/AMPP y su equivalencia con ISO 8501. 2025. Elaboración propia a partir de AMPP.

Estas clasificaciones garantizan que los distintos agentes implicados (propietarios, técnicos, aplicadores e inspectores) tengan un lenguaje común y puedan asegurar la calidad del proceso de protección frente a la corrosión.

3.7. Métodos de limpieza abrasiva seca.

En los procesos de limpieza por chorro en seco, la elección del abrasivo es un factor determinante en la calidad de la preparación superficial, ya que influye directamente en la rugosidad obtenida, la eficiencia del proceso y la adherencia del sistema de recubrimiento. Los diferentes tipos de abrasivos varían en dureza, forma, posibilidad de reutilización, generación de residuos y compatibilidad con distintos sustratos.

Seleccionar el abrasivo adecuado permite optimizar tanto el rendimiento como la seguridad del tratamiento anticorrosivo o intumescente, adaptándose a las características del sustrato y a los requisitos técnicos del proyecto. En la siguiente tabla se presenta una comparativa de los principales abrasivos utilizados en la industria.

Categoría	Tipo abrasivo	Uso principal	Reutilizable	Perfil de anclaje	Observaciones
Metálicos	Granalla angular de acero	Corte de depósitos o imperfecciones	Sí	Sí	Forma irregular
	Granalla esférica de acero	Eliminar depósitos gruesos y frágiles	Sí	Sí	Forma redonda
Escorias molidas	Escoria carbón/cobre	Corte rápido	No	Sí	Durabilidad media
Cerámicos	Óxidos de aluminio/Carburos de silicio	Preparación de materiales duros y delgados	Sí	Sí	Alta dureza, genera mucho polvo
	Arena de sílice	Limpieza económica, uso común	No	Sí	Económico, riesgo por inhalación silicosis
	Granate	Corte rápido, bajo polvo	Sí	Sí	Baja generación de polvo
Agrícolas	Cáscaras de nuez	Biodegradable, no daña superficies blandas	No	No	Evita incrustaciones
Especiales	Hielo seco	Retirar contaminantes	No	No	No residuos, no polvo
	Hielo	Remover contaminantes	No	No	Deja la superficie mojada
	Esferas de plástico	Remover el recubrimiento	Sí	Sí	Puede generar polvo
	Bicarbonato de sodio	Remover recubrimiento	No	No	Requiere enjuague
	Espónja abrasiva	Remover contaminantes	Sí	Sí	Combina la limpieza y absorción

Tabla 3. Comparativo de los tipos de abrasivos secos más utilizados. 2025. Fuente: Elaboración propia.

3.8. Métodos de limpieza con agua: Waterjetting y Water Blasting.

Además de la limpieza abrasiva en seco, se han desarrollado técnicas basadas en el empleo de agua que han adquirido importancia por su eficacia en la reducción de emisiones de polvo y en la eliminación de contaminantes solubles. Estas tecnologías se clasifican en *waterjetting* (chorro de agua sin abrasivo) y *water blasting* (limpieza abrasiva húmeda), siendo su elección determinada por factores como las condiciones del entorno, los requisitos del proyecto y la sensibilidad del área de intervención. A continuación, se describen sus tipos, características y aplicaciones.

3.8.1. Waterjetting.

Método que utiliza únicamente agua, sin incorporar abrasivos, para limpiar superficies metálicas o de hormigón.

Clasificación	Presión (bar)	Presión (psi)	Descripción técnica
Low-pressure water cleaning (LP WC)	<344	<5000	Limpieza con agua a baja presión (p. ej. manguera de jardín).
High-pressure water cleaning (HP WC)	344-700	5000-10000	Eliminación de suciedad ligera o pintura envejecida.
High-pressure water jetting (HP WJ)	700-2068	10000-30000	Eliminación de recubrimientos deteriorados y óxido leve.
Ultra-high-pressure water jetting (UHP WJ)	>2068	>30000	Eliminación completa de recubrimientos gruesos, óxido adherido o contaminantes solubles.

Tabla 4. Clasificación del Waterjetting según presión. 2025. Fuente: Elaboración propia.

Ventajas:

- Carencia de polvo y riesgos de chispa en la boquilla.
- Reduce la contaminación ambiental, ya que no hay partículas abrasivas que contaminen las áreas circundantes.
- Compatible con inspecciones posteriores de sales solubles.

Limitaciones:

- No genera perfil de anclaje nuevo.
- Requiere equipos de alta presión.
- Necesidad de gestionar aguas residuales.

3.8.2. Water Blasting

Método de limpieza que mezcla agua y abrasivo. Existen tres tipos:

- Limpieza abrasiva con cortina de agua: Se proyecta una película de agua alrededor del chorro abrasivo para reducir la emisión de polvo. El perfil obtenido es similar al de la limpieza en seco.
- Limpieza con agua e inyección de arena: El abrasivo se introduce por succión en la corriente de agua. Es más efectiva que el waterjetting porque permite generar un perfil de anclaje, aunque genera un perfil menor que con el abrasivo en seco.
- Slurry blasting: El abrasivo y el agua se mezclan previamente formando como un lodo que se bombea a la boquilla. Permite controlar la presión fácilmente.

Tipo	Polvo generado	Observaciones
Cortina de agua	Muy bajo	Menor impacto ambiental
Inyección de arena	Bajo	Alta eficiencia en limpieza
Slurry blasting	Bajo	Mayor control sobre presión

Tabla 5. Clasificación de tipos de Water Blasting según el polvo generado. 2025. Elaboración propia.

Ventajas:

- Reducción significativa de emisión de polvo.
- Mejor visibilidad para el operario.
- Menor riesgo de incendios o explosiones.

Limitaciones:

- Generación de residuos húmedos más difíciles de recoger.
- Equipos más complejos de operar y mantener
- Necesidad de secado posterior si se aplican recubrimientos posteriormente.

***Nota:** Tras la limpieza con agua, especialmente en métodos húmedos, es habitual emplear inhibidores temporales de corrosión para evitar la oxidación antes del recubrimiento.

Capítulo 4.

Sistemas de protección anticorrosiva

4.1. Fundamentos y función de los recubrimientos protectores.

Los recubrimientos protectores son barreras físicas o químicas aplicadas sobre materiales metálicos para prevenir o retrasar la acción corrosiva del entorno. En estructuras de acero, el sistema de recubrimiento constituye la primera línea de defensa frente a agentes atmosféricos, químicos o mecánicos que puedan deteriorar la superficie.

Su función principal es interrumpir alguno de los componentes del proceso de corrosión, ya sea evitando el contacto con el oxígeno, reduciendo la humedad, actuando como barrera frente a contaminante o proporcionando protección catódica.

4.2. Clasificación de los recubrimientos y mecanismos de curado.

Los recubrimientos se clasifican de forma general en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos, según la naturaleza del aglutinante utilizado.

4.2.1. Recubrimientos orgánicos.

Los recubrimientos orgánicos contienen aglutinantes de origen orgánico, derivado de materiales que alguna vez fueron vivos (como aceites vegetales) o productos del petróleo refinado. La mayoría de los recubrimientos industriales y marinos son orgánicos. Todos estos recubrimientos contienen carbono.

Ventajas

- Amplia gama de productos

Limitaciones

- Menor resistencia térmica que los inorgánicos

4.2.2. Recubrimientos inorgánicos

Los recubrimientos inorgánicos utilizan aglutinantes minerales como silicatos o siliconas, y se caracterizan por su elevada resistencia térmica. Son adecuados para ambientes de alta agresividad, exposición al calor o como imprimaciones ricas en zinc. También se incluyen aquí los recubrimientos metálicos, como los sistemas galvanizados o metalizados, que actúan por protección catódica.

Ventajas

- Excelente resistencia al calor

Limitaciones

- Poca flexibilidad y requerimientos estrictos de aplicación

4.2.3. Composición.

Todo recubrimiento líquido consta de varios componentes, cada uno con funciones específicas:

- **Pigmento:** Es un sólido en partículas finas que no se disuelve en la mezcla y da color, opacidad y en algunos casos protección inhibidora o catódica.
- **Aglutinante o resina:** Define sus propiedades principales (adhesión, resistencia, flexibilidad).
- **Solvente:** Permite aplicar el recubrimiento disolviendo resina. Se evapora tras la aplicación.
- **Aditivos:** Componentes en pequeñas cantidades que modifican propiedades como estabilidad, fluidez, resistencia UV, etc.

4.2.4. Clasificación según mecanismo de curado.

El mecanismo de curado de un recubrimiento define cómo pasa de estado líquido a sólido tras su aplicación. Este proceso afecta tanto la forma de aplicación como el desempeño final del sistema protector. Los dos grupos de mecanismos de curado son: convertibles y no convertibles.

a) Recubrimientos no convertibles:

Estos recubrimientos no experimentan ningún cambio químico durante el curado. Secan por evaporación del solvente, lo que implica que, una vez formados, pueden redisolverse si se vuelven a exponer al mismo tipo de solvente. Por esta razón también se conocen como termoplásticos.

Tipo de Curado	Descripción	Ejemplos	Observaciones
Curado por evaporación	La película se forma al evaporarse el solvente. No cambio químico.	Vinílicos, caucho clorado, bitúmenes, nitrocelulosas.	Pueden redisolverse. Requieren buena ventilación y control de espesor.
Coalescencia	Fusión de partículas dispersas en agua tras evaporación del agua.	Látex acrílico, epoxódicos base agua.	Sensibles a temperatura y viento durante la aplicación.

Tabla 6. Recubrimientos no convertibles. 2025. Fuente: Elaboración propia.

b) Recubrimientos convertibles:

En este tipo de recubrimientos, el curado implica una transformación química irreversible. Una vez curado, el material no puede volver a disolverse, Esto garantiza mayor resistencia, durabilidad y estabilidad estructural frente a agentes agresivos.

Tipo de Curado	Descripción	Ejemplos	Observaciones
Oxidación	Reacción con oxígeno tras evaporar el solvente.	Alquídicos, epoxi éster, oleoresinas.	No aptos para ambientes alcalinos. Espesores excesivos dificultan el curado y provocan arrugamiento superficial. Requiere control del espesor aplicado.
Co-reacción	Reacción entre base y catalizador.	Epóxicos, poliuretanos, poliureas, poliaspárticos, vinil éster, polisiloxanos.	Requiere mezcla exacta, controlar pot life y ventana de repintado.
Hidrólisis	Curado con humedad ambiental o agua del producto.	Uretanos curados por humedad, zinc inorgánico a base de etil silicato, zinc inorgánico base agua.	Evitar exceso de espesor. El curado completo puede tardar más de 24 h.
Fusión (curado térmico)	Activado por calor en taller o cabina.	Epoxi adherido por fusión (FBE), siliconas, fenólicos, recubrimientos horneados.	Aplicación controlada por temperatura.

Tabla 7. Recubrimientos convertibles. 2025. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Compatibilidad entre recubrimientos.

La compatibilidad entre recubrimientos es un aspecto fundamental en la selección y diseño de sistemas de protección anticorrosiva. No todos los tipos de recubrimientos son compatibles entre sí, especialmente cuando se trata de sistemas multicapa aplicados en distintas fases (taller y obra) o durante tareas de mantenimiento.

Un sistema de recubrimiento típico está compuesto por una o varias capas (imprimación, capa intermedia y acabado), y su éxito depende de la correcta interacción entre ellas. Las incompatibilidades pueden generar problemas como:

- Mala adherencia.
- Fisuración o ampollamiento.
- Fallos prematuros por reacciones químicas adversas.

Compatibilidad química entre capas:

- **Alquídicos:** no deben aplicarse sobre recubrimientos ricos en zinc (especialmente IOZ), ni sobre superficies de hormigón, ya que pueden reaccionar con la alcalinidad del soporte.
- **Epóxicos:** normalmente no se aplican sobre alquídicos ni sobre hule clorado. Requieren superficies limpias y pueden presentar exudación de aminas, dificultando el repintado.
- **Caucho clorado y vinílicos:** no deben recubrirse con sistemas bicomponentes como epóxicos o poliuretanos.
- **Poliuretanos aromáticos:** tienden a calentar (tizar) bajo exposición UV, por lo que requieren una capa de acabado compatible, generalmente alifática.
- **IOZ (zinc inorgánico):** no es compatible con sí mismo (no se puede repintar con otra capa de IOZ), ni con materiales que no posean buena humectación. El repintado debe hacerse con sistemas compatibles como epóxicos tolerantes a la superficie o zinc orgánico.

Factores que afectan la compatibilidad:

- **Tipo de resina:** Algunas resinas son químicamente incompatibles con otras. Por ejemplo, los recubrimientos epóxicos no curados completamente pueden provocar reacciones adversas si se recubren con productos que contienen solventes fuertes.
- **Tipo de repintado:** Muchos fabricantes especifican un intervalo de repintado para garantizar la adherencia entre capas. Si este tiempo se excede sin tratamiento previo, puede ser necesario lijar o limpiar con abrasivos suaves.
- **Condiciones ambientales:** temperatura, humedad o contaminación superficial pueden influir en la capacidad del nuevo recubrimiento de adherirse al anterior.

- **Sistema de curado:** Los recubrimientos curados por humedad, como ciertos poliuretanos, pueden presentar problemas si se aplican en condiciones secas o sobre capas anteriores con baja porosidad.

Recomendaciones generales del manual AMPP CIP1:

- Consultar las hojas técnicas de los fabricantes, que suelen incluir tablas de compatibilidad entre sus propios productos.
- Realizar pruebas de adherencia o compatibilidad cuando se mezclan productos de diferentes fabricante o familias químicas.
- Utilizar sistemas completos homologados, donde la imprimación, la capa intermedia y el acabado han sido diseñados como sistema conjunto.

Para una mejor comprensión, se incluye un mapa conceptual con la clasificación de mecanismos de curado y tipo de recubrimientos (*Anexo I*)

4.2.6. Criterios de selección según ambientes (ISO 12944-2).

La selección de un sistema de recubrimiento no solo depende del tipo de producto y su compatibilidad, sino también del ambiente de exposición al que estará sometido el elemento metálico. La norma ISO 12944-2 establece categorías normalizadas de corrosividad ambiental, que permiten definir la agresividad del medio y, por tanto, orientar la elección de sistemas de protección anticorrosiva.

Estas categorías se dividen en dos grandes grupos:

- **Ambientes atmosféricos:** estructuras expuestas al aire exterior o al interior de edificaciones.
- **Ambientes de inmersión:** estructuras metálicas que estarán sumergidas o enterradas de forma continua o prolongada.

Categoría	Nivel de Corrosividad	Descripción	Ejemplos
C1	Muy baja	Ambientes secos y limpios.	Oficinas, escuelas, museo.
C2	Baja	Ambientes poco contaminados.	Almacenes o instalaciones deportivas.
C3	Media	Contaminación o humedad moderada.	Zonas urbanas, plantas de alimentos, lavandería.
C4	Alta	Alta humedad y contaminación.	Piscinas, plantas químicas.
C5	Muy alta	Alta humedad y alta contaminación.	Plantas industriales, refinería.
CX*	Extrema	Alta salinidad y humedad constante.	Ambientes costeros extremos, puertos.

*Nueva categoría que cubre las estructuras en alta mar

Tabla 8. Clasificación de ambientes atmosféricos según nivel de corrosividad (ISO 12944-2). 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de la ISO 12944-2.

Categoría	Nivel de corrosividad	Inmersión/Enterramiento	Ejemplos
Im1	Variable	Agua dulce	Tanques, presas, canales
Im2	Alta	Agua de mar o salobre	Pilotes marinos, cascos de barcos
Im3	Alta	Suelo	Tuberías o estructuras enterradas
Im4*	Muy alta	Alta mar/Salinidad extrema	Industria química o alimentaria

*Nueva categoría que cubre las estructuras en alta mar

Tabla 9. Clasificación de ambientes de inmersión o enterramiento (ISO 12944-2). 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de la ISO 12944-2.

Durabilidad de los Recubrimientos.

La durabilidad de un sistema de pintado es el período de tiempo que pasa desde que se ha realizado la primera aplicación hasta que es necesario realizar el mantenimiento del sistema. La norma ISO 12944 ha especificado un rango de cuatro intervalos de tiempo para clasificar la durabilidad:

Clasificación	Duración esperada
Baja-L	≤ 7 años
Media-M	de 7 a 15 años
Alta-H	de 15 a 25 años
Muy alta-VH	más de 25 años

Tabla 10. Durabilidad requerida para un sistema de pintado. 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de ISO 12944-1.

***Nota:** Esta estimación no equivale a una garantía técnica. La durabilidad depende de múltiples factores: preparación de superficie, método de aplicación, condiciones ambientales, espesor del recubrimiento y mantenimiento.

4.2.7. Vida útil esperada y mantenimiento.

La vida útil esperada de un sistema de recubrimiento abarca su capacidad de conservar sus propiedades protectoras y estéticas durante un periodo determinado.

Los sistemas pueden clasificarse según sus requisitos de mantenimiento:

- **Sistemas de bajo mantenimiento:** Alta durabilidad inicial, menor frecuencia de intervención.
- **Sistemas de mantenimiento periódico:** Se requieren repintados parciales o totales a lo largo de su vida útil.

- **Sistemas de una sola capa o ciclo corto:** Para estructuras temporales o de bajo requerimiento funcional.

El diseño de un sistema anticorrosivo debe prever:

- Una estrategia de mantenimiento coherente con la exposición.
- La accesibilidad de zonas críticas.
- La compatibilidad entre capas para facilitar futuras reparaciones.

4.2.8. Consideraciones finales.

La correcta selección y aplicación de recubrimientos anticorrosivos resulta clave para garantizar la durabilidad de las estructuras metálicas. Factores como el ambiente, la compatibilidad entre capas, el mecanismo de curado y la planificación del mantenimiento deben considerarse de forma conjunta. La ISO 12944 proporciona herramientas fundamentales para asegurar el rendimiento a largo plazo del sistema protector.

Capítulo 5.

Inspección y control de calidad

5.1. Rol de inspector.

El inspector de recubrimientos cumple una función clave en la garantía de calidad de los sistemas de protección, tanto anticorrosivos como intumescentes. Su misión principal consiste en asegurar que los trabajos se ejecuten conforme las especificaciones técnicas y normativas establecidas.

Entre sus funciones más relevantes se encuentran:

- Verificar que los materiales, equipos y procedimientos utilizados sean conformes con lo especificado.
- Inspeccionar visual y técnicamente las superficies antes, durante y después de la aplicación de los sistemas de recubrimiento.
- Realizar mediciones precisas con instrumentos calibrados.
- Identificar y registrar no conformidades y proponer medidas correctivas.
- Redactar informes técnicos detallados que sirvan como respaldo documental del proceso.

5.2. Tipos de inspección.

La inspección debe realizarse en varias fases del proceso, cubriendo los momentos críticos que influyen directamente en el rendimiento del sistema de protección:

- Antes de la preparación de la superficie: Evaluación del estado inicial del sustrato, detección de contaminantes (aceites, grasas, polvo, sales solubles), imperfecciones de fabricación o presencia de recubrimientos antiguos incompatibles.
- Después de la preparación: Verificación del grado de limpieza (según normas ISO 8501 o SSPC-SP), medición del perfil de anclaje (ISO 8503) mediante instrumentos adecuados, y comprobación de la ausencia de contaminantes residuales, como sales solubles (ISO 8502).
- Durante la aplicación del recubrimiento: Control de las condiciones ambientales (temperatura, punto de rocío), medición del espesor en película húmeda) y observación de la técnica de aplicación.
- Entre capas y tras la aplicación final: Control de condiciones ambientales antes de pintar, medición de espesores de película seca, detección de defectos de aplicación (como burbujas, descuelgues o discontinuidades) y evaluación de la adherencia entre capas.

5.3. Herramientas e instrumentos de inspección.

La inspección técnica requiere el uso de equipos específicos que permiten registrar parámetros críticos del proceso. Entre los más habituales se encuentran:

Categoría: Condición ambiental.

Instrumento: Termómetro magnético de superficie.

Función: Mide la temperatura superficial.



Figura 25. Termómetro magnético de superficie. 2025. Fuente: www.cpcinstrumentos.com

Categoría: Condición ambiental.

Instrumento: Psicrómetro giratorio y tablas psicométricas.

Función: Mide la humedad relativa y la temperatura ambiente.



Figura 26. Psicrómetro giratorio. 2025. Fuente: www.cpcinstrumentos.com

Categoría: Superficie.

Instrumento: Comparadores visuales (ISO).

Función: Evalúa visualmente el grado de limpieza.



Figura 27. Comparador visual. 2025. Fuente: Elaboración propia.

Categoría: Superficie.

Instrumento: Medidor de perfil de superficie.

Función: Mide digitalmente el perfil de anclaje.



Figura 28. Medidor de Perfil de Superficie Positector. 2025.
Fuente: Elaboración propia.

Categoría: Superficie.

Instrumento: Cinta Réplica Textex™.

Función: Mide el perfil de anclaje mediante impresión.



Figura 29. Cinta Réplica Textex. 2025.
Fuente: www.cpcinstrumentos.com

Categoría: Aplicación.

Instrumento: Medidor de EPH (tipo peine).

Función: Mide espesor de película húmeda.



Figura 30. Medidor tipo peine/galleta. 2025. Fuente: Elaboración propia.

Categoría: Aplicación.

Instrumento: Medidor de EPS (Positector 6000™, Mikrotest III™).

Función: Mide espesor seco.



Figura 31. Positector 6000™.2025.
Fuente: Elaboración propia.

Categoría: Abrasivos.

Instrumento: Tamizado de abrasivos.

Función: Determina la granulometría.



Figura 32. Tamices para abrasivos.
2025. Fuente:
www.cpcinstrumentos.com

Categoría: Ensayos de adherencia.

Instrumento: Medidor de adherencia "Pull-Off".

Función: Determina la resistencia de adherencia del recubrimiento.



Figura 33. Pull-Off. 2025. Fuente:
Elaboración propia.

5.4. Documentación técnica.

Una parte fundamental del proceso de inspección es la generación y mantenimiento de una documentación técnica rigurosa y estructurada. Esta documentación no solo respalda las decisiones tomadas durante la ejecución del proyecto, sino que también sirve como referencia ante auditorías, reclamaciones o futuras intervenciones de mantenimiento.

Entre los registros documentales más relevantes que debe elaborar el inspector, se encuentran:

- Reportes diarios de inspección, donde se registran las condiciones ambientales, los trabajos realizados, las observaciones técnicas y cualquier incidencia detectada.
- Diario técnico del proyecto, que recopilan de forma cronológica los eventos clave, decisiones técnicas y evolución de los trabajos.
- Informes de avance periódicos (semanales, quincenales o mensuales), útiles para la coordinación entre los diferentes agentes intervinientes.
- Certificados de calibración de los equipos de medición, que aseguran la validez de los resultados obtenidos.
- Registros fotográficos o con marca temporal, como evidencia objetiva de la evolución y estado de las superficies tratadas.
- Fichas de condiciones ambientales, incluyendo temperatura, humedad, punto de rocío y condiciones del sustrato antes de cada aplicación.
- Control de materiales: datos de lotes, caducidad, condiciones de almacenamiento y uso.

Una documentación técnica exhaustiva permite:

- Evaluar el rendimiento del sistema de recubrimiento a lo largo del tiempo.
- Identificar causas de defectos o fallos de aplicación.
- Proporcionar una base técnica para decisiones correctivas o legales.
- Optimizar los costes de mantenimiento, reduciendo intervenciones innecesarias.

5.5. Procedimientos y listas de verificación (check lists).

Todo proyecto que implique la aplicación de sistemas protectores debería contar con un Plan de Inspección y Ensayos (PIE), aprobado en la fase inicial y consensuando por todas las partes implicadas: contratista, cliente, técnicos y aplicadores.

Este plan debe especificar al menos en cada fase del proyecto:

- Los parámetros técnicos a controlar en cada fase del proyecto.
- La frecuencia de las mediciones, así como el número de muestras requeridas.
- Los equipos de inspección a utilizar, debidamente calibrados.
- Los criterios de aceptación o rechazo, basados en normas internacionales como ISO 8501, ISO 8502 o SSPC.
- Los formatos y plazos para la entrega de informes técnicos.

En caso de que el proyecto no defina estos procedimientos previamente, será responsabilidad del inspector proponer un protocolo adaptado, el cual debe validarse durante la reunión inicial o reunión previa al trabajo, donde se establecen además las líneas de comunicación entre los distintos agentes implicados.

Para facilitar la ejecución y el seguimiento del plan, es recomendable utilizar listas de verificación (check lists) específicas para cada etapa crítica del proceso: preparación de superficie, aplicación de capas, control de espesores, verificación de condiciones ambientales, etc. Estas listas ayudan a no omitir aspectos esenciales y aportan claridad a los informes.

Se presenta un diagrama de flujo que sintetiza el proceso de inspección técnica (*Anexo II*), también diversas plantillas de control empleadas durante las fases del proceso, como la preparación superficial, el seguimiento de condiciones ambientales y la medición de espesores (*Anexo III*).

5.6. Fallos comunes en recubrimientos: Causas y prevención.

A pesar de una correcta selección del sistema de recubrimiento, pueden presentarse fallos prematuros si no se cumplen adecuadamente los parámetros de aplicación, curado o mantenimiento. Estos fallos comprometen la integridad de la protección anticorrosiva y pueden derivar en elevados costes de reparación.

Algunos de los fallos más comunes son:

- Fallo de curado
- Exudación de amina
- Esgurrimientos y colgamientos
- Caleamiento
- Ampollamiento
- Agrietamiento y desprendimiento
- Cráteres

Se incluye una recopilación de fichas con ejemplos de defectos habituales en sistemas de recubrimientos proyectores (*Anexo IV*). En cada ficha se describe el tipo de fallo, sus posibles causas, sus consecuencias y una propuesta de intervención para su corrección. Estas fichas tienen como objetivo ilustrar situaciones reales que pueden encontrarse durante las tareas de inspección o mantenimiento de estructuras metálicas protegidas frente a la corrosión.

Capítulo 6.

Optimización de recursos en procesos de preparación de superficie.

6.1. Introducción del estudio de optimización.

En el ámbito de la preparación de superficies metálicas para la aplicación de sistemas anticorrosivos e intumescentes, la fase de limpieza inicial representa un punto crítico tanto en términos de calidad como de consumo de recursos. La elección del método de preparación influye directamente en el tiempo de ejecución, el coste por m², el consumo de material (abrasivos o agua), y la disponibilidad de equipos y operarios.

Dada esta complejidad, surge la necesidad de plantear un modelo que permita optimizar dichos procesos, adaptándolos a las condiciones reales de producción de la empresa “Enesa Continental”.

El presente estudio se centra en el desarrollo de un modelo de optimización que permita asignar de forma eficiente los recursos disponibles (métodos de preparación, equipo, mano de obra) en función de las condiciones de trabajo y el tipo de suciedad presente en las superficies metálicas (óxido y pintura antigua). El objetivo principal es maximizar el beneficio neto o el rendimiento global del sistema, cumpliendo a su vez una serie de restricciones técnicas y operativas propias del entorno industrial.

Para ello, se han empleado herramientas de optimización matemática como Excel Solver y Wolfram Mathematica que permiten formular el problema como un modelo de programación lineal entera. Este modelo contempla distintos escenarios de producción, diferenciando entre métodos utilizados en taller (cabina automática y semiautomática) y en obra (chorro convencional, Sponge-Jet, water blasting), así como sus respectivos costes y rendimientos.

La metodología consiste en:

- Recolección de datos reales de producción de la empresa.
- Identificación de las variables de decisión y parámetros clave (m²/día, €/m², número de operarios).
- Establecimiento de restricciones reales: capacidad máxima por método, número de operarios disponibles, requerimientos mínimos de producción diaria, etc.
- Definición de una función objetivo que permita evaluar diferentes estrategias en función del criterio seleccionado (beneficio, rendimiento...)
- Resolución del modelo mediante herramientas computacionales y análisis de resultados comparativos entre escenarios.

El propósito de este trabajo no es únicamente encontrar una solución matemática óptima, sino también dotar a la empresa de una herramienta práctica para la planificación de recursos y la mejora continua de sus procesos. Esta aproximación permite evaluar de forma anticipada la viabilidad de una planificación y tomar decisiones fundamentales con un criterio técnico y económico.

6.2. Planteamiento de los problemas.

A continuación, se presentan distintos ejemplos desarrollados para ilustrar la aplicación del modelo de optimización en procesos de preparación de superficies. Cada ejemplo definirá las variables, las restricciones y la función objetivo. Para luego desarrollar cada uno de estos problemas mediante Excel Solver y Wolfram Mathematica.

El estudio se centra en el tratamiento de tuberías metálicas de 20 pulgadas de diámetro, las cuales presentan dos condiciones principales de suciedad antes de aplicar el sistema de protección:

- Óxido
- Pintura antigua

Estas superficies pueden ser tratadas mediante distintos métodos de preparación, agrupados en dos entornos diferenciados:

- En taller, mediante:
 - Cabina automática
 - Cabina semiautomática
- En obra, mediante:
 - Chorro convencional
 - Sponge-jet
 - Water blasting

Cada combinación de tipo de superficie y método presenta diferentes rendimientos productivos, costes económicos y tiempos de tratamiento, lo que permite plantear escenarios realistas y comparables.

A continuación, se muestran los datos utilizados en los siguientes modelos de optimización que provienen de condiciones reales de producción en taller y en obra basados en la empresa Enesa Continental.

Condición inicial	Sistema	m2/día	€/m2	m2/min	min/m2
Óxido	Cabina automática	244,22	5,37	0,68	1,47
Pintura antigua	Cabina automática	183,77	7,14	0,51	1,96
Óxido	Cabina semiautomática	122,11	10,75	0,34	2,95
Pintura antigua	Cabina semiautomática	86,10	15,24	0,24	4,18

Tabla 11. Datos: rendimientos y costes en métodos de preparación en taller. 2025. Fuente: Elaboración propia.

Condición inicial	Sistema	m2/día	€/m2	m2/min	min/m2
Óxido	Chorro convencional	75,36	18,97	0,21	4,78
Pintura antigua	Chorro convencional	44,48	32,15	0,12	8,09
Óxido	Sponge-jet	71,54	41,75	0,20	5,03
Pintura antigua	Sponge-jet	36,11	59,76	0,10	9,97
Óxido	water blasting	50,11	38,36	0,14	7,18
Pintura antigua	water blasting	27,11	51,49	0,08	13,28

Tabla 12. Datos: rendimientos y costes en métodos de preparación en obra. 2025. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1. Ejemplo 1: Métodos en taller.

Descripción del problema:

Se plantea un problema de planificación en un entorno industrial donde deben tratarse superficies metálicas de tuberías de 20" en condiciones de óxido o pintura antigua. Estas superficies pueden ser tratadas en taller mediante dos tipos de cabinas: automática y semiautomática. Cada combinación presenta distintos rendimientos y costes.

Este ejemplo se desarrolla en dos versiones, en función del criterio de optimización considerado.

Variables:

X_{11} = m²tubería oxidada tratada en cabina automática.

X_{21} = m²tubería con pintura antigua tratada en cabina automática.

X_{12} = m²tubería oxidada tratada en cabina semiautomática.

X_{22} = m²tubería con pintura antigua tratada en cabina semiautomática.

CASO 1: MAXIMIZAR EL BENEFICIO EN LOS SISTEMAS DE TALLER.**Objetivo:**

Maximizar el beneficio económico diario.

Función objetivo:

La función objetivo, detallada a continuación, será la que plantearemos para cumplir con los requerimientos de aumentar el beneficio.

$$Max = 5,37X_{11} + 7,14X_{21} + 10,75 X_{12} + 15,24 X_{22}$$

Restricciones:**1) Capacidad máxima de tratamiento por sistema (m^2)**

$$X_{11} \leq 244$$

$$X_{21} \leq 184$$

$$X_{12} \leq 122$$

$$X_{22} \leq 86$$

2) Tiempo total disponible (6 horas efectivas → 360min/op)

- Cabina automática → 2 operarios
- Cabina semiautomática → 3 operarios

Tiempo que trabajan al día los operarios (dedicándose toda la jornada a estos trabajos).

$$2op \times 360 \text{ min} = 720 \text{ min}$$

$$3op \times 360 \text{ min} = 1080 \text{ min}$$

$$1.47 X_{11} + 1.96X_{21} \leq 720$$

$$2.95 X_{12} + 4.18 X_{22} \leq 1080$$

3) Mínimo trabajo diario. (60% m2)

$$X_{11} \geq 244 * 0.6 = 147$$

$$X_{21} \geq 184 * 0.6 = 111$$

$$X_{12} \geq 122 * 0.6 = 74$$

$$X_{22} \geq 86 * 0.6 = 52$$

Solución Método Excel Solver:

Microsoft Excel 16.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [Ex_Solver_230929.xlsx]Full1

Informe creado: 04/07/2025 16:55:08

Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.

Motor de Solver

Motor: Simplex LP

Tiempo de la solución: 0,047 segundos.

Iteraciones: 2 Subproblemas: 4

Opciones de Solver

Tiempo máximo ilimitado, Iteraciones ilimitado, Precisión 0,000001, Usar escala automática

Máximo de subproblemas ilimitado, Máximo de soluciones de enteros ilimitado, Tolerancia de enteros 0%, Asumir no negativo

Celda objetivo (Máx)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$3	Funció Objectiu Maximitzar	5246,18	5246,18

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$C\$4	x11	244	244	Entero
\$D\$4	x21	184	184	Entero
\$E\$4	x12	122	122	Entero
\$F\$4	x22	86	86	Entero

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$G\$12	Restricció 7	244	\$G\$12>=\$I\$12	No vinculante	97
\$G\$13	Restricció 8	184	\$G\$13>=\$I\$13	No vinculante	73
\$G\$14	Restricció 9	122	\$G\$14>=\$I\$14	No vinculante	48
\$G\$15	Restricció 10	86	\$G\$15>=\$I\$15	No vinculante	34
\$G\$6	Restricció 1	244	\$G\$6<=\$I\$6	No vinculante	1
\$G\$7	Restricció 2	184	\$G\$7<=\$I\$7	Vinculante	0
\$G\$8	Restricció 3	122	\$G\$8<=\$I\$8	Vinculante	0
\$G\$9	Restricció 4	86	\$G\$9<=\$I\$9	Vinculante	0
\$G\$10	Restricció 5	719,32	\$G\$10<=\$I\$10	No vinculante	0,68
\$G\$11	Restricció 6	719,38	\$G\$11<=\$I\$11	No vinculante	360,62
\$C\$4:\$F\$4=Entero					

	x11	x21	x12	x22		
Funció Objectiu Maximitzar	5,37	7,14	10,75	15,24	5246,18	
	244	184	122	86		
Restricció 1	1	0	0	0	244	<= 245
Restricció 2	0	1	0	0	184	<= 184
Restricció 3	0	0	1	0	122	<= 122
Restricció 4	0	0	0	1	86	<= 86
Restricció 5	1,47	1,96	0	0	719,32	<= 720
Restricció 6	0	0	2,95	4,18	719,38	<= 1080
Restricció 7	1	0	0	0	244	>= 147
Restricció 8	0	1	0	0	184	>= 111
Restricció 9	0	0	1	0	122	>= 74
Restricció 10	0	0	0	1	86	>= 52

Variables no negatives i enters

Variable
Func. Objectiu
Restriccions

Figura 34. Informe de respuesta realizado por Solver. 2025. Fuente: Excel Solver.

Solución Wolfram Mathematica:

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES		Introducción	Comunidad	Cursos
Este cuaderno está mostrando traducciones de código en el idioma predeterminado de su equipo. Controle esto desde el diálogo de Preferencias.				
Evaluación		Asistente de IA	Estilo de celda	Celdas
+ Insertar celda...				
Código				Insertar
$\text{In[1]:} = \text{Maximize} [\{ 5.37 x_{11} + 7.14 x_{21} + 10.75 x_{12} + 15.24 x_{22}, x_{11} \leq 245, x_{21} \leq 184, x_{12} \leq 122, x_{22} \leq 86, 1.47 x_{11} + 1.96 x_{21} \leq 720, 2.95 x_{12} + 4.18 x_{22} \leq 1080, x_{11} \geq 147, x_{21} \geq 111, x_{12} \geq 74, x_{22} \geq 52 \}, \{ x_{11}, x_{21}, x_{12}, x_{22} \}, \text{Integers}]$				
$\text{Out[1]:} = \{ 5246.18, \{ x_{11} \rightarrow 244, x_{21} \rightarrow 184, x_{12} \rightarrow 122, x_{22} \rightarrow 86 \} \}$				

Figura 35. Informe de respuesta realizado por Wolfram Mathematica. 2025. Fuente: Wolfram Mathematica.

Conclusión:

El problema planteado consistía en maximizar el beneficio económico diario derivado del tratamiento de superficies metálicas de tuberías de 20" en condiciones de óxido o pintura antigua, utilizando dos sistemas de limpieza en taller: cabina automática y cabina semiautomática. Se formularon restricciones realistas relacionadas con la capacidad técnica de cada sistema, la disponibilidad de operarios y el tiempo efectivo de trabajo diario, así como requisitos mínimos de producción.

El modelo fue resuelto mediante dos herramientas diferentes de optimización:

- Excel Solver, configurado con una función objetivo lineal, restricciones de desigualdad y variables enteras no negativas.
- Wolfram Mathematica, empleando programación lineal para obtener la misma solución mediante resolución simbólica y numérica.

En ambos casos, los resultados coincidieron plenamente, por tanto, la solución óptima consistió en utilizar completamente la capacidad de tratamiento de los cuatro procesos disponibles:

- 245 m² de óxido tratados en cabina automática.
- 184 m² de pintura antigua tratados en cabina automática.
- 122 m² de óxido tratados en cabina semiautomática.
- 86 m² de pintura antigua tratados en cabina semiautomática.

Esto permitió alcanzar un beneficio máximo de 5246,18 € diarios, respetando todas las restricciones impuestas.

Desde el punto de vista técnico, se observa que:

- Las restricciones de capacidad fueron vinculantes, es decir, han limitado directamente la solución. Esto indica que la capacidad máxima de tratamiento es el factor crítico para alcanzar el beneficio óptimo.
- Las restricciones de tiempo disponible y producción mínima diaria no fueron vinculantes, lo cual significa que existe un margen operativo en ambos aspectos. Esto permite cierta flexibilidad en la planificación de recursos.

Un aspecto relevante derivado del análisis del tiempo de ejecución es que, aunque se asignaran tres operarios a la cabina semiautomática durante 1080 minutos diarios, solo sería necesario 720 minutos de trabajo en este sistema, por tanto, esto implica que uno de los operarios podría realizar otras tareas.

CASO 2: MAXIMIZAR EL BENEFICIO EN LOS SISTEMAS DE TALLER.

En este caso, se parte del mismo planteamiento que el caso 1 pero reduciendo el tiempo total de los operarios que se dedican a trabajos de cabinas.

Tiempo total disponible:

- Cabina automática → 2 operarios
- Cabina semiautomática → 3 operarios

Tiempo que trabajan al día los operarios (dedicándose toda la jornada a estos trabajos).

$$2op \times 3h \times 60 \text{ min} = 360 \text{ min/día}$$

$$3op \times 3h \times 60 \text{ min} = 540 \text{ min/día}$$

$$1.47 X_{11} + 1.96 X_{21} \leq 360$$

$$2.95 X_{12} + 4.18 X_{22} \leq 720$$

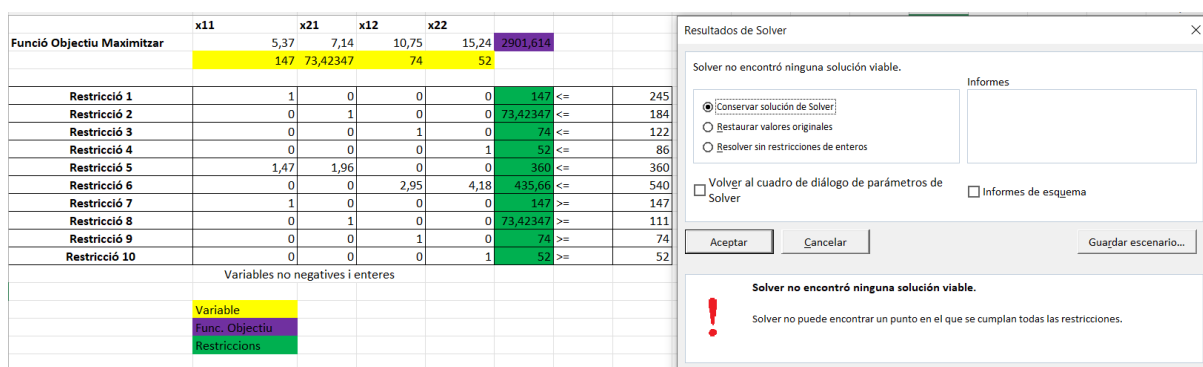


Figura 36. Informe de respuesta realizado por Solver. 2025. Fuente: Excel Solver.

Conclusión:

En este segundo caso, se modificó el tiempo total disponible para los operarios en ambas cabinas (automática y semiautomática), pasando de 6 a 3 horas diarias por operario (360 y 540 minutos disponibles, respectivamente). Al resolverlo manteniendo las condiciones anteriores, no se obtuvo ninguna solución viable con el programa.

Esto es debido a que la variable X_{21} (tubería con pintura antigua tratada en cabina automática) no alcanza el mínimo de m^2 diarios exigidos, es decir, 111 m^2 debido a la limitación de tiempo. Por tanto, será necesario disponer de más tiempo en este sistema para que cumplan con los m^2 diarios exigidos.

6.2.2. Ejemplo 1: Métodos en obra.

Descripción del problema:

Se plantea un problema de planificación en un entorno industrial en obra donde deben tratarse superficies metálicas de tuberías de 20" en condiciones de óxido o pintura antigua. Estas superficies pueden ser tratadas en obra mediante tres tipos de sistemas: Chorro convencional, sponge-jet, water blasting. Cada combinación presenta distintos rendimientos y costes.

Este ejemplo se desarrolla en dos versiones, en función del criterio de optimización considerado.

Variables:

- X_{11} = m^2 tubería oxidada tratada con chorro convencional
- X_{21} = m^2 tubería con pintura antigua tratada con chorro convencional
- X_{12} = m^2 tubería oxidada tratada con sponge – jet
- X_{22} = m^2 tubería con pintura antigua tratada con sponge – jet
- X_{13} = m^2 tubería oxidada tratada con water blasting
- X_{23} = m^2 tubería con pintura antigua tratada con water blasting

CASO 1: MAXIMIZAR EL BENEFICIO EN LOS SISTEMAS DE OBRA.**Objetivo:**

Maximizar el beneficio económico diario.

Función objetivo:

La función objetivo detallada a continuación, será la que plantearemos para cumplir con los requerimientos de aumentar el beneficio.

$$Max = 18,97X_{11} + 32,15X_{21} + 41,75 X_{12} + 59,75 X_{22} + 38,36 X_{13} + 51,49 X_{23}$$

Restricciones:**1) Capacidad máxima de tratamiento por sistema (m^2)**

$$X_{11} \leq 76$$

$$X_{21} \leq 45$$

$$X_{12} \leq 72$$

$$X_{22} \leq 36$$

$$X_{13} \leq 50$$

$$X_{23} \leq 27$$

2) Tiempo total disponible (6 horas efectivas → 360min/op)

- Chorro convencional → 3 operarios
- Sponge-jet → 2 operarios
- Water blasting → 2op

Tiempo que trabaja al día los operarios (dedicándose toda la jornada a estos trabajos).

$$3op \times 360 \text{ min} = 1080 \text{ min}$$

$$2op \times 360 \text{ min} = 720 \text{ min}$$

$$2op \times 360 \text{ min} = 720 \text{ min}$$

$$4.78 X_{11} + 8.09 X_{21} \leq 1080$$

$$5.03 X_{12} + 9.97 X_{22} \leq 720$$

$$7.18 X_{12} + 13.28 X_{22} \leq 720$$

4) Mínimo trabajo diario (60% m2).

$$X_{11} \geq 46$$

$$X_{21} \geq 27$$

$$X_{12} \geq 43$$

$$X_{22} \geq 22$$

$$X_{13} \geq 30$$

$$X_{23} \geq 17$$

Solución Método Excel Solver:

Microsoft Excel 16.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [Ex_Solver_230929.xlsx]Full1

Informe creado: 04/07/2025 18:41:06

Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.

Motor de Solver

Motor: Simplex LP

Tiempo de la solución: 0,094 segundos.

Iteraciones: 1 Subproblemas: 4

Opciones de Solver

Tiempo máximo ilimitado, Iteraciones ilimitado, Precisión 0,000001, Usar escala automática

Máximo de subproblemas ilimitado, Máximo de soluciones de enteros ilimitado, Tolerancia de enteros 0%, Asumir no negativo

Celda objetivo (Máx)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$J\$2	Funció Objectiu Maximitzar	0	11293,34

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$D\$3	x11	0	75	Entero
\$E\$3	x21	0	45	Entero
\$F\$3	x12	0	71	Entero
\$G\$3	x22	0	36	Entero
\$H\$3	x13	0	50	Entero
\$I\$3	x23	0	27	Entero

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$J\$14	Restricció 10	75	\$J\$14>=\$L\$14	No vinculante	29
\$J\$15	Restricció 11	45	\$J\$15>=\$L\$15	No vinculante	18
\$J\$16	Restricció 12	71	\$J\$16>=\$L\$16	No vinculante	28
\$J\$17	Restricció 13	36	\$J\$17>=\$L\$17	No vinculante	14
\$J\$18	Restricció 14	50	\$J\$18>=\$L\$18	No vinculante	20
\$J\$19	Restricció 15	27	\$J\$19>=\$L\$19	No vinculante	10
\$J\$5	Restricció 1	75	\$J\$5<=\$L\$5	Vinculante	0
\$J\$6	Restricció 2	45	\$J\$6<=\$L\$6	Vinculante	0
\$J\$7	Restricció 3	71	\$J\$7<=\$L\$7	No vinculante	1
\$J\$8	Restricció 4	36	\$J\$8<=\$L\$8	Vinculante	0
\$J\$9	Restricció 5	50	\$J\$9<=\$L\$9	Vinculante	0
\$J\$10	Restricció 6	27	\$J\$10<=\$L\$10	Vinculante	0
\$J\$11	Restricció 7	722,55	\$J\$11<=\$L\$11	No vinculante	357,45
\$J\$12	Restricció 8	716,05	\$J\$12<=\$L\$12	No vinculante	3,95
\$J\$13	Restricció 9	717,56	\$J\$13<=\$L\$13	No vinculante	2,44
\$D\$3:\$I\$3=Entero					

	x11	x21	x12	x22	x13	x23		
Funció Objectiu Maximitzar	18,97	32,15	41,75	59,76	38,36	51,49	11293,34	
	75	45	71	36	50	27		
Restricció 1	1	0	0	0	0	0	75	<= 75
Restricció 2	0	1	0	0	0	0	45	<= 45
Restricció 3	0	0	1	0	0	0	71	<= 72
Restricció 4	0	0	0	1	0	0	36	<= 36
Restricció 5	0	0	0	0	1	0	50	<= 50
Restricció 6	0	0	0	0	0	1	27	<= 27
Restricció 7	4,78	8,09	0	0	0	0	722,55	<= 1080
Restricció 8	0	0	5,03	9,97	0	0	716,05	<= 720
Restricció 9	0	0	0	0	7,18	13,28	717,56	<= 720
Restricció 10	1	0	0	0	0	0	75	>= 46
Restricció 11	0	1	0	0	0	0	45	>= 27
Restricció 12	0	0	1	0	0	0	71	>= 43
Restricció 13	0	0	0	1	0	0	36	>= 22
Restricció 14	0	0	0	0	1	0	50	>= 30
Restricció 15	0	0	0	0	0	1	27	>= 17

Variables no negatives i enters

Variable
Func. Objectiu
Restriccions

Figura 37. Informe de respuesta realizado por Solver. 2025. Fuente: Excel Solver.

Solución Wolfram Mathematica:

WOLFRAM MATHEMATICA EDICIÓN PARA ESTUDIANTES		Introducción	Comun
Este cuaderno está mostrando traducciones de código en el idioma predeterminado de su equipo. Controle esto desde el diálogo de Preferencias.		Abrir Preferencias...	No p
Evaluación	Asistente de IA	Estilo de celda	Código
+ Insertar celda...			Insertar
$\text{In}[2]:= \text{Maximize} [\{ 18.97 x_{11} + 32.15 x_{21} + 41.75 x_{12} + 59.76 x_{22} + 38.36 x_{13} + 51.49 x_{23}, x_{11} \leq 76, x_{21} \leq 45, x_{12} \leq 72, x_{22} \leq 36, x_{13} \leq 50, x_{23} \leq 27, \\ 4.78 x_{11} + 8.09 x_{21} \leq 1080, 5.03 x_{12} + 9.97 x_{22} \leq 720, 7.18 x_{13} + 13.28 x_{23} \leq 720, x_{11} \geq 46, x_{21} \geq 27, x_{12} \geq 43, x_{22} \geq 22, x_{13} \geq 30, x_{23} \geq 17 \}, \\ \{ x_{11}, x_{21}, x_{12}, x_{22}, x_{13}, x_{23} \}, \text{Integers}]$			
$\text{Out}[2]= \{ 11312.3, \{ x_{11} \rightarrow 76, x_{21} \rightarrow 45, x_{12} \rightarrow 71, x_{22} \rightarrow 36, x_{13} \rightarrow 50, x_{23} \rightarrow 27 \} \}$			

Figura 38. Informe de respuesta realizado por Wolfram Mathematica. 2025. Fuente: Wolfram Mathematica.

Conclusión:

La solución coincidió plenamente en los resultados tanto en Excel Solver como mediante Wolfram Mathematica.

Los resultados muestran que aprovechan prácticamente al máximo las capacidades de los tres sistemas disponibles (chorro convencional, sponge-jet y water blasting), cumpliendo con todas las restricciones definidas:

- Se alcanzan o superan los mínimos de producción diaria (60%), para todas las combinaciones de sistema y condición de superficie.
- El tiempo disponible por operarios no ha sido un factor limitante, salvo en el caso del chorro convencional, que ha alcanzado un uso de 727,33 min frente al máximo disponible de 1080 min/día.

En este último punto, es destacable que, aunque la restricción de tiempo se ha cumplido holgadamente, solo se han requerido 727,33 minutos de los 1080 min/diarios disponibles. Esto implica que el trabajo asignado a chorro convencional puede ser ejecutado únicamente por 2 operarios ($2 \times 360 \text{ min} = 720 \text{ min}$), sin afectar al cumplimiento del plan productivo. Por tanto, el tercer operario podría destinarse a otras tareas, optimizando aún más los recursos disponibles en obra.

El beneficio económico total alcanzado con esta solución es de 11293,34€ diarios, demostrando que la combinación adecuada de métodos permite obtener máximo rendimiento operativo y financiero.

Capítulo 7.

Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido como objetivo el estudio detallado, técnico y aplicado de los procesos de preparación de superficies metálicas como paso esencial previo a la aplicación de sistemas de protección anticorrosiva. A lo largo de su desarrollo, se han abordado de manera estructurada las distintas tipologías de limpieza, tanto tradicionales como innovadoras, con especial atención a los criterios normativos, la adecuación técnica, la viabilidad operativa y la optimización de recursos.

Uno de los principales logros de este trabajo ha sido integrar en un mismo documento contenidos teóricos, análisis normativos, criterios técnicos y una aplicación práctica real, vinculada al ámbito profesional mediante la colaboración directa con la empresa Enesa Continental. Esto ha permitido contextualizar el estudio dentro de un entorno real de producción, evaluando las condiciones operativas, económicas y técnicas que influyen en la toma de decisiones en proyectos de protección industrial.

Desde el punto de vista técnico, se han descrito de forma detallada los métodos clásicos de preparación superficial, como la limpieza con disolventes, el desbaste manual y mecánico, el chorreado con abrasivos convencionales, la limpieza húmeda y el waterjetting. Todos ellos se han contrastado con sus respectivas normas (ISO 8501, ISO 8503, SSPC) y con los requerimientos específicos de los distintos sistemas de recubrimiento. A partir de esta base, se ha llevado a cabo una comparativa en cuanto a eficacia, coste, perfil de anclaje, rendimiento y seguridad.

Uno de los aspectos más destacables del TFG ha sido la incorporación y el desarrollo de tecnologías emergentes que representan una evolución significativa respecto a los métodos tradicionales. La incorporación del sistema Sponge-Jet, la limpieza por ablación láser y los robots Blastrac® de limpieza automatizada permite mostrar el estado actual de la innovación en el sector. Estos métodos, si bien aún en fase de implantación parcial en el mercado, aportan mejoras sustanciales en términos de sostenibilidad, control de emisiones, eficiencia energética, ergonomía y repetibilidad del proceso.

El sistema Sponge-Jet, por ejemplo, ha demostrado ser una alternativa sostenible al chorro convencional en entornos sensibles, gracias a su bajo nivel de generación de polvo, su capacidad de reciclaje de abrasivo y su perfil de anclaje controlado. La limpieza por láser, respaldada por la norma AMPP SP 21511-1, representa una solución de alta precisión y mínima generación de residuos, aunque limitada por su coste y su incapacidad para generar rugosidad. Por su parte, los robots Blastrac® constituyen un paso hacia la automatización de procesos industriales de limpieza, mejorando la productividad y reduciendo la exposición del operario, al tiempo que mantienen los estándares normativos exigibles.

Estas innovaciones han sido además analizadas desde una perspectiva alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, aportando valor al cumplimiento del ODS 9 (industria, innovación e infraestructura), ODS 12 (producción y consumo responsables) y ODS 3 (salud y bienestar en el trabajo). Esta conexión refuerza la necesidad de que la construcción y la industria evolucionen hacia modelos más sostenibles y seguros sin perder eficacia técnica.

La segunda gran aportación de este trabajo radica en el desarrollo de un caso práctico de optimización, basado en datos reales de producción de la empresa colaboradora. Mediante el uso de Solver de Excel y Wolfram Mathematica se ha formulado un modelo matemático capaz de maximizar el beneficio económico, considerando restricciones como el tiempo de trabajo disponible, la capacidad de los equipos, los métodos aplicables en obra y en taller, y los precios de cada unidad de trabajo. Esta parte del trabajo aporta una visión operativa que trasciende el enfoque descriptivo tradicional y propone un marco de toma de decisiones cuantificable, justificado y adaptable.

Gracias a esta herramienta, se ha demostrado que, en función de la disponibilidad horaria y los costes de producción, se pueden redistribuir las tareas entre los distintos métodos y ubicaciones para mejorar el rendimiento global sin aumentar los recursos. En un segundo caso, también se ha probado el impacto que tiene la reducción del tiempo disponible, planteando soluciones realistas para mantener la rentabilidad mediante el ajuste estratégico del uso de equipos. Esta herramienta, fácilmente replicable, puede ser de gran utilidad en empresas del sector para planificar y optimizar procesos productivos de forma dinámica y racional.

Desde el punto de vista académico, este trabajo integra múltiples competencias del Grado en Arquitectura Técnica, incluyendo conocimientos técnicos de materiales y procesos, interpretación normativa, modelado de datos, uso de herramientas digitales, y capacidad de análisis y evaluación comparativa.

Como toda investigación aplicada, el trabajo presenta limitaciones. En primer lugar, la disponibilidad de datos reales, especialmente en cuanto a rendimientos y costes unitarios, ha condicionado la precisión de los modelos de cálculo. En segundo lugar, el enfoque de optimización ha sido lineal y determinista, sin incorporar escenarios inciertos.

Por todo ello, como posibles líneas de mejora y continuidad, se propone:

- Ampliar el modelo de optimización incluyendo tiempos de secado y aplicación de pintura, para una gestión integral del proceso.
- Incorporar herramientas más avanzadas como programación entera mixta, algoritmos evolutivos o simulaciones con incertidumbre.
- Desarrollar una evaluación ambiental comparativa (análisis de ciclo de vida, huella de carbono) de los métodos tradicionales y modernos.
- Realizar ensayos experimentales propios con tecnologías emergentes (láser, Sponge-Jet, robots Blastrac®) para verificar rendimientos, calidad y condiciones de uso.

En definitiva, este Trabajo de Fin de Grado aporta una visión técnica, actualizada y aplicable a los retos reales del sector industrial y constructivo, conjugando el análisis normativo con la innovación, la

sostenibilidad y la optimización operativa. Se espera que sus conclusiones puedan servir como base para futuras decisiones técnicas en el ámbito de la preparación de superficies y protección anticorrosiva, así como punto de partida para investigaciones más amplias en torno a la mejora de procesos constructivos en entornos industriales.

Capítulo 8.

Bibliografía

- [1] AENOR, 2007. UNE-EN ISO 8502-6: *Ensayos para la evaluación de la presencia de sales solubles. Método de extracción Bresle*. Edn. Madrid.
- [2] AENOR, 2007. UNE-EN ISO 8502-9: *Ensayos para la evaluación de la presencia de sales solubles. Método de medición con tiras reactivas*. Edn. Madrid.
- [3] AENOR, 2012. UNE-EN ISO 8501: *Preparación de sustratos de acero antes de la aplicación de pinturas y productos similares. Evaluación visual de la limpieza de superficies*. Edn. Madrid.
- [4] AENOR, 2012. UNE-EN ISO 8503-1: *Rugosidad de la superficie. Comparadores visuales*. Edn. Madrid.
- [5] AENOR, 2020. UNE-EN ISO 12944-1 a 12944-9: *Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente la corrosión mediante sistemas de pintura protectores*. Edn. Madrid.
- [6] AMPP. 2023. *SP21511-1: Standard Practice for Laser Cleaning of Steel Surfaces Before Coating Application*.
- [7] ASTM INTERNATIONAL. 2010. *ASTM D4417-10: Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel*. West Conshohocken: ASTM.
- [8] BILURBINA ALTER, L., LIESA MESTRES, F. e IRIBARREN LACO, J.I. (2008). *Corrosión y protección*. Barcelona: Edicions UPC.
- [9] BLASTRAC GLOBAL. 2024. *Surface Preparation Equipment*. [Online] Disponible en: <https://www.blastrac.com> [Consulta: julio 2025].
- [10] CPC INSTRUMENTOS. 2025. *Catálogo de instrumentos para inspección de recubrimientos*. [Online] Disponible en: <https://www.cpcinstrumentos.com> [Consulta: julio 2025]
- [11] ENESA CONTINENTAL. 2025. *Datos internos de producción. Documento técnico interno*.
- [12] EXCEL SOLVER. 2023. *Herramienta de optimización en Microsoft Excel*. Microsoft Corporation.
- [13] FELIU, S. y ANDRADE, M.C. (coords.). 2003. *Corrosión y protección metálicas. Vol. I*. Colección Nuevas Tendencias, Vol. 16. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [14] FELIU, S. y ANDRADE, M.C. (coords.). 2003. *Corrosión y protección metálicas. Vol. II*. Colección Nuevas Tendencias, Vol. 16. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [15] NACIONES UNIDAS. 2015. *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. [Online] Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> [Consulta: julio 2025].

- [16] PANCORBO, F.J., 2009. *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Barcelona: Marcombo, Ediciones Técnicas.
- [17] SPONGE-JET INC. 2024. *Technology Overview* [Online] Disponible en: <https://www.spongejet.com/es/> [Consulta: julio 2025].
- [18] SSPC – The Society for Protective Coatings. 2000. *SSPC-SP 10/NACE No. 2: Near-White Metal Blast Cleaning*. Pittsburgh: SSPC/NACE.
- [19] VERTIDRIVE. 2024. *Magnetic Climbing Robots for Surface Preparation*. [Online] Disponible en: <https://www.vertidrive.com> [Consulta: julio 2025].
- [20] WOLFRAM RESEARCH. 2023. *Wolfram Mathematica 13.2 – Manual de usuario y documentación*.

Capítulo 9.

Índice de Figuras

Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). 2025. Fuente: https://fundacioniter.org/objetivos-desarrollo-sostenible-ods/	8
Figura 2. Corrosión uniforme. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 3. Corrosión galvánica. 2025. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 4. Corrosión por picaduras. 2025. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 5. Corrosión por grietas. 2025. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 6. Corrosión intergranular. 2025. Fuente: Elaboración propia	11
Figura 7. Corrosión bajo tensión. 2025. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 8. Corrosión por erosión. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 9. Corrosión microbiológica. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 10. Serie Galvánica. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 11. Contaminación superficial. 2025. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 12. Defectos internos y defectos superficiales en cordones de soldadura. 2025. Fuente: Urbán Brotóns, P. (2010). Construcción de estructuras metálicas. 4.ª ed. ECU.	18
Figura 13. Comparativa de perfiles de soldadura. 2025. Fuente: Urbán Brotóns, P. (2010). Construcción de estructuras metálicas. 4.ª ed. ECU.	19
Figura 14. Cordón de soldadura sin preparar. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 15. Cordón de soldadura preparado. 2025. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 16. Limpieza manual con disolventes. 2025. Fuente: www.sikagua.com	20
Figura 17. Limpieza mecánica con cepillo de alambre rotativo. 2025. Fuente: www.wikipedia.org/wiki/Bristle_blasting#/media/File:BristleBlasting.JPG	20
Figura 18. Limpieza con chorro abrasivo en cabina semiautomática (blasting). 2025. Fuente: Enesa Continental.....	21
Figura 19. Chorro de agua a presión alta (Waterjetting). 2025. Fuente: Enesa Continental.....	21
Figura 20. Esponja abrasiva utilizada en Sponge-jet. 2025. Fuente: www.spongejet.com	23
Figura 21. Limpieza con Sponge-jet. 2025. Fuente: www.soltgn.com	23
Figura 22. Limpieza con Láser. 2025. Fuente: Enesa Continental.	24
Figura 23. Equipo Blastrac, granallado horizontal. 2025. Fuente: Enesa Continental.	25
Figura 24. Equipo Blastrac, granallado vertical. 2025. Fuente: Enesa Continental.....	25
Figura 25. Termómetro magnético de superficie. 2025. Fuente: www.cpcinstrumentos.com	40
Figura 26. Psicrómetro giratorio. 2025. Fuente: www.cpcinstrumentos.com	40
Figura 27. Comparador visual. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 28. Medidor de Perfil de Superficie Positector. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 29. Cinta Réplica Textex. 2025. Fuente: www.cpcinstrumentos.com	41
Figura 30. Medidor tipo peine/galleta. 2025. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 31. Positector 6000™. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 32. Tamices para abrasivos. 2025. Fuente: www.cpcinstrumentos.com	42
Figura 33. Pull-Off. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 34. Informe de respuesta realizado por Solver. 2025. Fuente: Excel Solver.....	50

Figura 35. Informe de respuesta realizado por Wolfram Mathematica. 2025. Fuente: Wolfram Mathematica 50

Figura 36. Informe de respuesta realizado por Solver. 2025. Fuente: Excel Solver..... 52

Figura 37. Informe de respuesta realizado por Solver. 2025. Fuente: Excel Solver..... 55

Figura 38. Informe de respuesta realizado por Wolfram Mathematica. 2025. Fuente: Wolfram Mathematica 55

Capítulo 10.

Índice de Tablas

Tabla 1. Grados de limpieza superficial s/ISO 8501. 2025. Elaboración propia a partir de ISO 8501-1:2008.....	27
Tabla 2. Grados de limpieza superficial s/ISO 8501. 2025. Elaboración propia a partir de ISO 8501-1:2008.....	27
Tabla 3. Comparativo de los tipos de abrasivos secos más utilizados. 2025. Fuente: Elaboración propia	29
Tabla 4. Clasificación del Waterjetting según presión. 2025. Fuente: Elaboración propia.....	30
Tabla 5. Clasificación de tipos de Water Blasting según el polvo generado. 2025. Elaboración propia.....	31
Tabla 6. Recubrimientos no convertibles. 2025. Fuente: Elaboración propia	33
Tabla 7. Recubrimientos convertibles. 2025. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 8. Clasificación de ambientes atmosféricos según nivel de corrosividad (ISO 12944-2). 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de la ISO 12944-2	36
Tabla 9. Clasificación de ambientes de inmersión o enterramiento (ISO 12944-2). 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de la ISO 12944-2.	37
Tabla 10. Durabilidad requerida para un sistema de pintado. 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de ISO 12944-1	37
Tabla 11. Datos: rendimientos y costes en métodos de preparación en taller. 2025. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 12. Datos: rendimientos y costes en métodos de preparación en obra. 2025. Fuente: Elaboración propia	47

Anexos

Anexo I: Mapa conceptual clasificación de mecanismos de curado y tipo de recubrimientos.

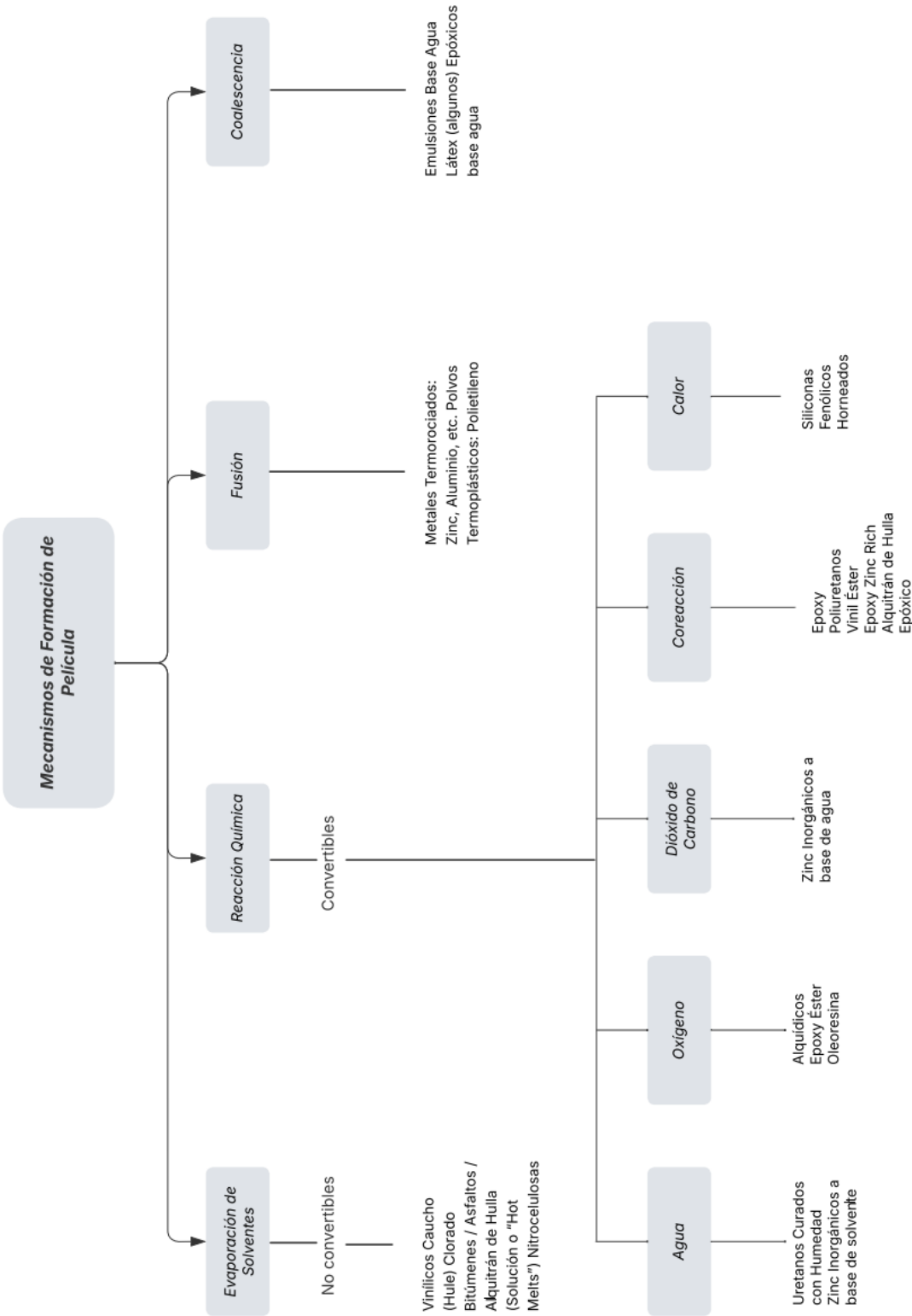
Anexo II: Diagrama de flujo del proceso de inspección técnica.

Anexo III: Plantillas de control (preparación superficial, seguimiento de condiciones ambientales y medición de espesores).

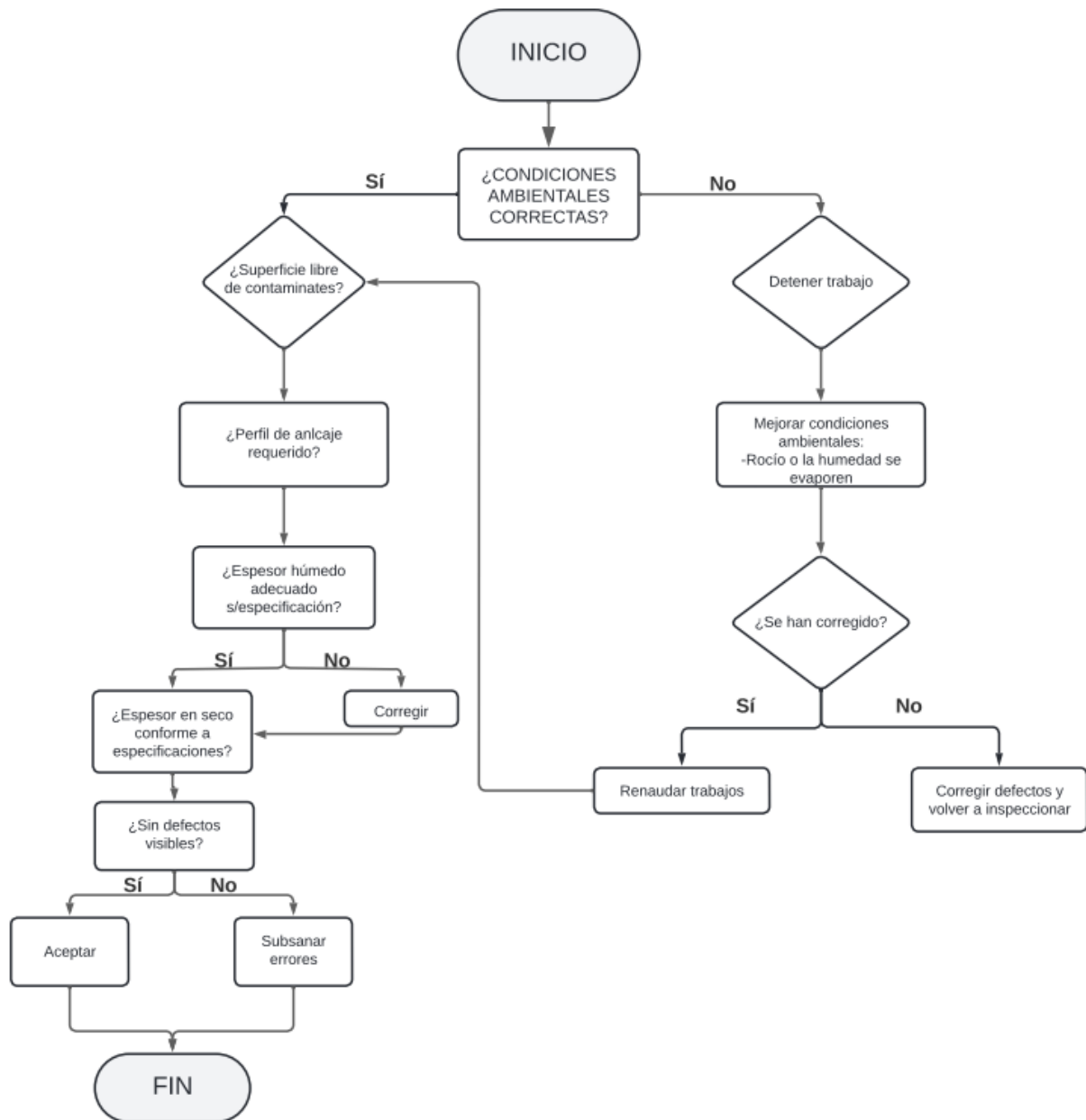
Anexo IV: Fichas con fallos habituales de recubrimientos.

Anexo V: Plano de Emplazamiento de Enesa Continental, empresa donde se ha desarrollado el TFG.

Anexo I Mapa conceptual de los mecanismos de formación de película
(secado y/o curado)



Anexo II Proceso de inspección técnica



CONTROL DE CONDICIONES AMBIENTALES

--

REF. PROYECTO:		FECHA:	
RESPONSABLE DE PROYECTO		HOJA:	
INSPECTOR:			
EQP. DE MEDICION:			
HORA:			
PARAMETER		VALOR	
Ta [°C]			
HR [%]			
Td [°C]			
Ts [°C]			
>3			
COMENTARIOS:			
HORA:			
PARAMETER		VALOR	
Ta [°C]			
HR [%]			
Td [°C]			
Ts [°C]			
>3			
COMENTARIOS:			
HORA:			
PARAMETER		VALOR	
Ta [°C]			
HR [%]			
Td [°C]			
Ts [°C]			
>3			
COMENTARIOS:			
COMENTARIOS:			

PREPARACION SUPERFICIAL

REF. PROYECTO:		FECHA:	
RESPONSABLE DE PROYECTO		HOJA:	
INSPECTOR:			
LOCALIZACIÓN:			
EQP. DE MEDICION:			
SURFACE PREPARATION			
HORA:		PHOTO:	
APLICADOR:			
METODO DE PREPARACION:			
PRE-CLEANING:			
ABRASIVO:			
ESTANDARD:			
COMENTARIOS:			
SURFACE PREPARATION			
HORA:		PHOTO:	
APPLIC:			
METODO DE PREPARACION:			
PRE-CLEANING:			
ABRASIVO:			
ESTANDARD:			
COMENTARIOS:			
ANCHOR PROFILE			
METODO	RESULTADOS	ACCEPTABLE?	
ISO COMPARATOR Nº 8024:			
MEDIDOR DIGITA			
COMENTARIOS:			
ANCHOR PROFILE			
METODO	RESULTADOS	ACCEPTABLE?	
ISO COMPARATOR Nº 8024:			
MEDIDOR DIGITA			
COMENTARIOS:			
CONTAMINANTE VISIBLES			
NIVEL:		(Insert adhesive tape)	
COMENTARIOS:			
CONTAMINANTE VISIBLES			
NIVEL:		(Insert adhesive tape)	
COMENTARIOS:			
COMENTARIOS:			

CONTROL DE ESPESORES

CONTROL DE ESPESOR DE PINTURA EN HUMEDO

--

REF. PROYECTO:		FECHA:	
RESPONSABLE DE PROYECTO:		HOJA:	
INSPECTOR:			
EQP. DE MEDICION:			
LOCATION:			
PRIMERA CAPA:			
SEGUNDA CAPA:			
TERCERA CAPA:			
TOMA DE DATOS			
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		

	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		

	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
PRIMERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
SEGUNDA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE
	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		
TERCERA CAPA:			Min. WFT: μm
MARCA	PUNTOS	ESPESOR(μm)	CUMPLE

	AREA INSPECT.		
	1		
	2		
	3		

CONTROL DE ESPESOR DE PINTURA EN SECO

--

REF. REF. PROYECTO:								FECHA:	
RESPONSABLE DE PROYECTO:								HOJA:	
INSPECTOR:									
LOCATION:									
PRIMERA CAPA:									
SEGUNDA CAPA:									
TERCERA CAPA:									
TOMA DE DATOS									
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm						
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE	
	INSPEC. AREA								
	1								
	2								
	3								
	PROMEDIO								
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm						
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE	
	INSPEC. AREA								
	1								
	2								
	3								
	PROMEDIO								
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm						
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE	
	INSPEC. AREA								
	1								
	2								
	3								
	PROMEDIO								
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm						
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE	
	INSPEC. AREA								
	1								
	2								
	3								
	PROMEDIO								
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm						
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE	
	INSPEC. AREA								
	1								
	2								
	3								
	PROMEDIO								
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm						
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE	
	INSPEC. AREA								
	1								
	2								
	3								
	PROMEDIO								
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm						

MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							

	2							
	3							
	PROMEDIO							
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
TERCERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
PRIMERA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	2	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							
SEGUNDA CAPA:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							

Tercera Capa:			Min. EPS: μm					
MARCA	PUNTOS	1	2	3	4	5		CUMPLE
	INSPEC. AREA							
	1							
	2							
	3							
	PROMEDIO							

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Se produce cuando el recubrimiento no ha experimentado una reacción completa de curado (endurecimiento), ya sea por evaporación, oxidación, co-reacción, fusión o hidrolisis. La película queda pegajosa, blanda, no adherente o con problemas visuales como arrugas o falta de brillo.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

- Mezcla incorrecta de los componentes (en sistemas bicomponentes).
- Exceso de espesor de película.
- Temperaturas o humedad fuera del rango recomendado.
- Superficie húmeda o contaminada.
- Uso de disolventes incompatibles o en exceso.

CONSECUENCIAS

- Pérdida de adherencia al sustrato.
- Desarrollo de ampollar, fisuras o delaminación.
- Incapacidad de repintar dentro del tiempo adecuado.
- Pérdida de propiedades mecánicas y químicas del recubrimiento.
- Fallo prematuro del sistema de protección.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Inspección y confirmación del fallo.
2. Retirada del recubrimiento afectado.
3. Preparación de superficie.
4. Aplicación del nuevo recubrimiento.
5. Control de calidad post-aplicación.

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Formación de una capa blanquecina, cerosa o pegajosa sobre la superficie de un recubrimiento epóxico bicomponente, especialmente en condiciones de alta humedad. Interfiere gravemente con la adherencia de capas posteriores.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

- Uso de resinas epóxicas curadas con aminas
- Condiciones de alta humedad relativa o condensación durante o tras la aplicación.
- Presencia de CO2 en el aire que reacción con las aminas.
- Uso de productos con curado lento.
- Aplicación en condiciones por debajo del punto de rocío.
- Curado incompleto.

CONSECUENCIAS

- Fallo de adherencia del repintado.
- Incompatibilidad con recubrimientos posteriores.
- Aumento del coste y tiempo de la intervención.
- Decoloración del recubrimiento con el paso del tiempo.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Identificar la presencia del exudado.
2. Eliminar completamente la exudación.
3. Inspeccionar la limpieza y realizar si es necesario la prueba de adherencia.
4. Aplicar la siguiente capa.

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Formación de una capa blanquecina, cerosa o pegajosa sobre la superficie de un recubrimiento epóxico bicomponente, especialmente en condiciones de alta humedad. Interfiere gravemente con la adherencia de capas posteriores.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

- Uso de resinas epóxicas curadas con aminas
- Condiciones de alta humedad relativa o condensación durante o tras la aplicación.
- Presencia de CO2 en el aire que reacción con las aminas.
- Uso de productos con curado lento.
- Aplicación en condiciones por debajo del punto de rocío.
- Curado incompleto.

CONSECUENCIAS

- Fallo de adherencia del repintado.
- Incompatibilidad con recubrimientos posteriores.
- Aumento del coste y tiempo de la intervención.
- Decoloración del recubrimiento con el paso del tiempo.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Identificar la presencia del exudado.
2. Eliminar completamente la exudación.
3. Inspeccionar la limpieza y realizar si es necesario la prueba de adherencia.
4. Aplicar la siguiente capa.

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Formación de polvo blanco en la superficie del recubrimiento debido a la degradación del aglutinante por exposición a la radiación ultravioleta (UV). Este polvo puede desprenderse al frotar la superficie y afecta a la apariencia y función del recubrimiento.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

- Exposición prolongada a la luz solar
- Uso de recubrimientos no resistentes a loa rayos (p.ej: poliuretanos aromáticos o ciertos epóxicos).
- Recubrimiento aplicado fuera de especificaciones o sin capa de acabado adecuada.
- Falta de mantenimiento en ambientes exteriores severos.

CONSECUENCIAS

- Pérdida de calor y brillo.
- Dificultad de adherencia para repintado.
- Reducción progresiva del espesor y capacidad de protección.
- Problemas estéticos importantes en estructuras visibles.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Confirmar la presencia de caleamiento frotando la superficie con un paño oscuro o guante.
2. Lavar y cepillar la superficie con agua y detergente para eliminar residuos sueltos.
3. Enjuagar y dejar secar completamente.
4. Verificar adherencia residual si va a repintar.
5. Aplicar una nueva capa compatible (resistente a UV, como poliuretano alifático).
6. Documentar condiciones de exposición y actualizar el plan de mantenimiento si es necesario.

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Formación de burbujas o cavidades elevadas entre la superficie y el recubrimiento, causadas por la acumulación de vapor, gases, líquidos o contaminantes atrapados. Pueden ser pequeñas, dispersas o de gran tamaño, y afectar una o varias capas del sistema.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

- Humedad atrapada en la superficie al momento de la aplicación.
- Presencia de sales, aceites u otros contaminantes en la superficie.
- Aplicación sobre una superficie mal preparada o humedad.
- Aplicación con condiciones ambientales no controladas (alta humedad, rocío, lluvia).
- Exceso de espesor de película que dificulta la salida de solventes.
- Formación de presión osmótica o reacción química con la superficie.

CONSECUENCIAS

- Pérdida de adherencia localizada.
- Riesgo de corrosión bajo película.
- Propagación de defectos si no se interviene.
- Problemas estéticos o de funcionalidad en servicio.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Inspeccionar visualmente sin romper las ampollas, a menos que sea necesario analizar su contenido.
2. Evaluar el tipo y extensión del daño.
3. Retirar el recubrimiento dañado con el método adecuado.
4. Limpiar completamente la superficie y eliminar la causa (sales, humedad, actividad catódica, etc.)
5. Reaplicar el sistema completo con materiales compatibles y bajo condiciones controladas.

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Fisuras visibles en la película del recubrimiento, que pueden evolucionar hasta la separación parcial o total del recubrimiento respecto al sustrato. Las grietas pueden ser lineales, ramificadas (craqueado), en forma de piel de cocodrilo o delaminación en placas. Perjudica a la integridad del sistema de protección.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

- Espesor de película excesivo o mal controlado.
- Recubrimientos incompatibles.
- Curado deficiente del recubrimiento.
- Movimientos o deformaciones del sustrato que superan la flexibilidad del sistema.
- Envejecimiento natural del recubrimiento por UV, humedad o temperatura.
- Tensión acumulada.

CONSECUENCIAS

- Exposición del metal base a agentes corrosivos.
- Pérdida de adherencia generalizada.
- Degradación estética.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Inspeccionar la extensión del agrietamiento y su profundidad.
2. Retirar el recubrimiento afectado por métodos mecánico o químicos apropiados.
3. Verificar la presencia de deformaciones del soporte o condiciones estructurales que lo hayan provocado.
4. Aplicar un sistema compatible, flexible si es necesario, con espesor adecuado y condiciones controladas de aplicación y curado.

DESCRPCIÓN DEL FALLO

Depresiones circulares en la película de pintura con un centro hueco, causados por el aire atrapado en la película.

IMAGEN



POSIBLES CAUSAS

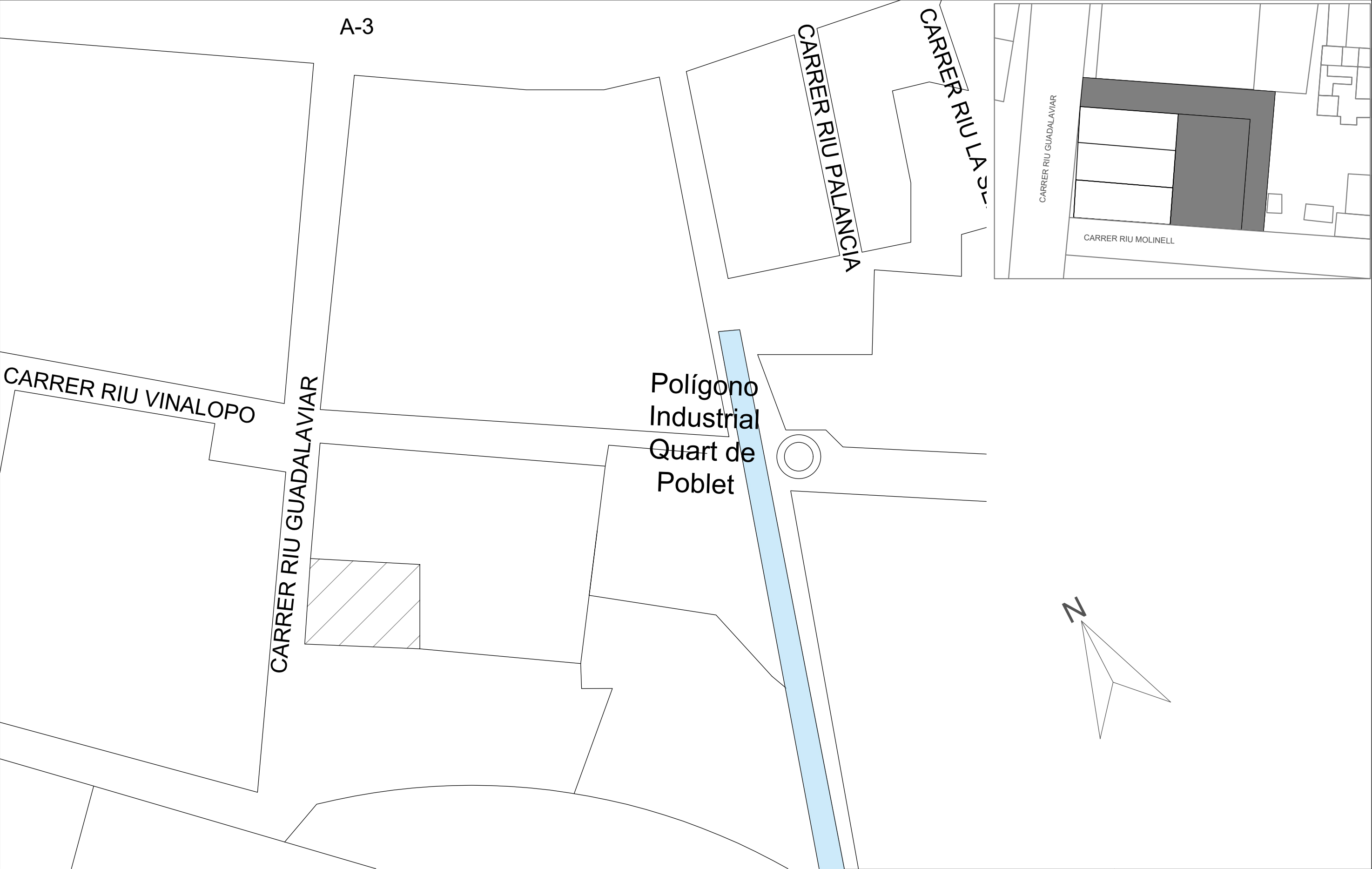
- Contaminación superficial antes de la aplicación (aceite, grasa, silicona, humedad, agentes antiadherentes, polvo fino).
- Contaminación del aire comprimido.
- Uso de disolventes incompatibles.
- Aplicación en condiciones de alta humedad relativa.
- Contaminación cruzada desde herramientas o recipientes.

CONSECUENCIAS

- Defecto estético visible.
- Posible inicio de corrosión localizada por acumulación de humedad o agentes agresivos en los cráteres.
- Pérdida de adherencia generalizada.
- Degradación estética.

PROPUESTAS D EINTERVENCIÓN

1. Evaluar la extensión del fallo y el tipo de recubrimiento aplicado.
2. Si el defecto es superficial y aislado:
 - Lijar o raspar suavemente la zona afectada.
 - Limpiar con disolvente.
 - Repintar en dichas zonas respetando condiciones ambientales adecuadas.
3. Si los cráteres están extendidos o afectan a la protección general:
 - Retirar completamente el recubrimiento afectado.
 - Reparar la superficie: limpieza, desengrasado, comprobación de aire comprimido.
4. Aplicar nuevo sistema compatible según especificaciones del fabricante.



Alumno:	PALOP VARGAS ,CARMEN		 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	
Profesor:	FULLANA I ALONSO, MÀRIUS JOSEP		TFG	Curso:
EMPLAZAMIENTO			E 1:1000	24/25
				1