

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un sistema de evaluación del desprendimiento catódico aplicado a
revestimientos de tuberías enterradas

INGE-2969

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Steven Joel Vargas Pacheco

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Este trabajo de titulación va dedicado a las personas que confiaron en mi desde el primer día. A mis padres, Félix y Elena, por su apoyo incansable en cada semestre.

A mi hermana, Jenniffer, cuya admiración me empuja a seguir.

Y a mi novia, Ayllin, por su cariño y la fuerza con la que sostiene mis sueños.

Este logro también es de ustedes.

Steven Vargas Pacheco

Agradecimientos

Primero, agradezco a Dios por permitirme alcanzar este objetivo y acompañarme en cada paso. Expreso mi más sincero agradecimiento al Ing. Luis Campoverde, al Ing. Julián Peña y a la Ing. Demis Cabrera, por su valiosa orientación y el tiempo que dedicaron a este proyecto, lo que hizo posible culminarlo con éxito.

A mis amigas de carrera, Daniela y Génesis, gracias por su amistad y empatía; con su apoyo superamos satisfactoriamente cada semestre.

Asimismo, agradezco profundamente a los docentes técnicos de laboratorio, cuyo conocimiento y respaldo fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todos los profesores de la carrera por su compromiso y dedicación, que contribuyeron al éxito de este proyecto y a mi formación profesional.

Declaración Expresa

Yo Steven Joel Vargas Pacheco acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 30 de mayo del 2025.


Steven Joel Vargas Pacheco

Evaluadores

MSc. Jorge Julián Peña Estrella

Profesor de Materia

MSc. Demis Adriana Cabrera Álava

Tutor de proyecto

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo el diseño y la construcción de un sistema experimental potenciostático, conforme a ASTM G8, para cuantificar el desprendimiento catódico en recubrimientos epóxicos aplicados a tuberías enterradas. El arreglo, compuesto por una celda y un tablero de control, sostuvo un potencial cercano a $-1,5$ V frente a Cu/CuSO_4 dentro del rango de protección. Se evaluaron dos preparaciones superficiales, SP2 (limpieza mecánica) y SP10 (chorro abrasivo casi a metal blanco), y dos recubrimientos epóxicos (RE1 y RE2); el desempeño se midió por el porcentaje de área desprendida tras la exposición y mediante ensayo de adherencia por tracción. En SP2 se obtuvieron promedios de 5,4 % para RE1 y 14,8 % para RE2, mientras que en SP10 los valores se redujeron a 2,7 % y 2,3 % respectivamente. En SP10, el ensayo de adherencia por tracción promedió 8,95 MPa en ambos recubrimientos, dentro del rango de referencia de 8 a 10 MPa, con falla mayoritariamente cohesiva atribuible a un anclaje mecánico eficaz del perfil de rugosidad y a un anclaje químico adecuado sobre el acero. En conjunto, el sistema permitió controlar con precisión el potencial y diferenciar el efecto de la preparación superficial en el desempeño, destacándose que RE2 alcanzó sus menores pérdidas por desprendimiento en condición SP10.

Palabras Clave: desprendimiento catódico; recubrimientos epóxicos; preparación superficial; adherencia por tracción; protección catódica.

Abstract

The objective of this work was to design and build a potentiostatic experimental system, in accordance with ASTM G8, to quantify cathodic disbondment in epoxy coatings for buried pipelines. The setup—comprising a test cell and a control panel—held the potential close to -1.5 V vs Cu/CuSO₄ within the protection window. Two surface preparation levels were assessed, SP2 mechanical cleaning and SP10 near-white blast cleaning, together with two epoxy systems, RE1 and RE2; performance was evaluated by the percentage of area disbonded after cathodic exposure and by pull-off adhesion testing. Under SP2, average disbondment reached 5.4% for RE1 and 14.8% for RE2; with SP10 those values decreased to 2.7% and 2.3%, respectively. In SP10, pull-off adhesion averaged 8.95 MPa for both coatings—consistent with the 8–10 MPa reference range—and failure was predominantly cohesive, consistent with effective mechanical anchoring from the blasted profile and adequate chemical bonding to the steel. Overall, the system enabled precise potential control and made the influence of surface preparation on performance evident, with RE2 showing the lowest disbondment under SP10.

Keywords: cathodic disbondment; epoxy coatings; surface preparation; pull-off adhesion; cathodic protection

Índice general

Resumen	vi
Abstract	vii
Índice general	viii
Abreviaturas	xi
Simbología	xii
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
Capítulo 1	2
1.1 Introducción.....	3
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema.....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Marco Teórico	6
1.5.1 Corrosión en tuberías enterradas	6
1.5.2 Métodos de evaluación de desprendimiento catódico.....	17
Capítulo 2	22
2. Metodología.	23
2.1 Fase I - Levantamiento de información	24
2.2 Fase II - Preparación y acondicionamiento de las probetas.....	24
2.2.1 Preparación de superficies.....	24
2.2.2 Análisis de sales superficiales	26
2.2.3 Aplicación de recubrimientos.....	28
2.3 Fase III - Ensayos de caracterización y trabajo en laboratorio.....	29

2.3.1	Medición de rugosidad superficial.	29
2.3.2	Medición de espesor de capa húmeda.	31
2.3.3	Medición de espesor capa seca.....	31
2.3.4	Prueba de discontinuidades.	32
2.3.5	Ensayo de adherencia por tracción.....	33
2.3.6	Curva potencioestática.	35
2.3.7	Preparación de solución y electrodos.	36
2.3.8	Medición de resistividad y pH de la solución	39
2.4	Fase IV - Diseño del sistema de evaluación catódica.....	42
2.4.1	Desarrollo del sistema experimental.	43
2.4.2	Elaboración de las celdas de ensayo.	43
2.4.3	Monitoreos de los valores de voltaje.....	46
Capítulo 3		47
3.	Resultados y análisis	48
3.1	Resultados de laboratorio	48
3.1.1	Medición de rugosidad superficial.	48
3.1.2	Medición de espesor de capa húmeda.	50
3.1.3	Medición de espesor capa seca.....	51
3.1.4	Prueba de discontinuidades.	52
3.1.5	Ensayo de adherencia por tracción.....	53
3.1.6	Curvas potencioestáticas.	54
3.1.7	Medición de resistividad y pH de la solución	59
3.2	Resultados del diseño	61
3.2.1	Resultados de la prueba de desprendimiento catódico	61
3.2.2	Valores de potencial eléctrico	71
3.3	Análisis económico.....	80

3.3.1	Optimización en la selección de materiales	80
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	83
4.1	Conclusiones.....	83
4.2	Recomendaciones	84
	Referencias	85
	Apéndices	86

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials.
CSE	Copper Sulfate Electrode
DFT	Dry Film Thickness
EAF	Epoxi Adherido por Fusión
3RPE	Recubrimiento de Polietileno de tres Capas
Eh	Potencial redox
H ₂	Hidrógeno gaseoso
INEN 1108	Norma ecuatoriana para preparación de superficies metálicas antes de pintar.
ISO 4624	Norma internacional para determinar la adherencia de recubrimientos mediante prueba de tracción
pH	Potencial de Hidrógeno
PVC	Percent Volume of Solids
RE	Recubrimiento epóxico
SP10	Near-White Blast Cleaning
SPV	Surface Preparation Visual
SSPC	Steel Structures Painting Council.
ST2	Limpieza manual a fondo (según ISO 8501)
UV	Ultraviolet Light
WFT	Wet Film Thickness

Simbología

°C	Grados Celsius
μm	Micrómetro o micra
g	Gramo
m ²	Metro cuadrado
mil	Milésima de pulgada
mm	Milímetro
Mpa	Megapascuales
mV	Milivoltio

Índice de figuras

Figura 1.1 <i>Diagrama Pourbaix del hierro en contacto con el agua</i> [13].	8
Figura 1.2 <i>Diagrama de flujo del mecanismo de corrosión.</i>	9
Figura 1.3 <i>Flujo de electrones del ánodo hacia el cátodo en sentido opuesto a la corriente convencional</i> [5].	¡Error! Marcador no definido.
Figura 1.4 <i>Tubería expuesta en zona húmeda: implicaciones del nivel freático alto en Guayaquil.</i>	17
Figura 1.5 <i>Recubrimiento dañado por desprendimiento catódico</i> [14].	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2.1 <i>Metodología aplicada para el desarrollo del proyecto.</i>	23
Figura 2.2 <i>Probetas planas de acero.</i>	25
Figura 2.3 <i>Probeta SP10.</i>	26
Figura 2.4 <i>Probeta SP2.</i>	26
Figura 2.5 <i>Agua desionizada.</i>	27
Figura 2.6 <i>Anillo magnético.</i>	27
Figura 2.7 <i>Equipo Positector SST.</i>	27
Figura 2.8 <i>Aplicación de recubrimiento en probeta.</i>	28
Figura 2.9 <i>Aplicación de recubrimiento con brocha.</i>	29
Figura 2.10 <i>Aplicación de recubrimiento uniformemente.</i>	29
Figura 2.11 <i>Mediciones distribuidas sobre la superficie de las probetas.</i>	30
Figura 2.12 <i>Medición de rugosidad superficial de las probetas.</i>	30
Figura 2.13 <i>Galga dentada.</i>	31
Figura 2.14 <i>Medición de espesor de capa húmeda.</i>	31
Figura 2.15 <i>Equipo PosiTector 6000.</i>	32
Figura 2.16 <i>Equipo Positest HHD.</i>	32
Figura 2.17 <i>Prueba Holiday.</i>	33
Figura 2.18 <i>Celda electroquímica experimental.</i>	36
Figura 2.19 <i>Agitador Magnético, preparación de solución.</i>	38
Figura 2.20 <i>Etiquetado de probetas.</i>	38
Figura 2.21 <i>Barra de cobre de los electrodos.</i>	39
Figura 2.22 <i>Procedimiento de llenado de los electrodos.</i>	39
Figura 2.23 <i>Esquema conexión de los cables entre el equipo y el soilbox.</i> [13].	40

Figura 2. 24 <i>Equipo MILLER-400A.</i>	41
Figura 2.25 <i>Medición de resistividad.</i>	41
Figura 2.26 <i>Modelado de tablero de control.</i>	44
Figura 2.27 <i>Diagrama Eléctrico elaborado con EasyEDA.</i>	44
Figura 2.28 <i>Probetas y recipientes para ensayo.</i>	45
Figura 2.29 <i>Celda de ensayo.</i>	46
Figura 2. 30 <i>Circuito para monitoreo de potenciales.</i>	46
Figura 3. 1 <i>Rugosidad Superficial RE1</i>	48
Figura 3. 2 <i>Rugosidad Superficial RE2</i>	49
Figura 3. 3 <i>Espesor de capa seca RE1 / Barra de error.</i>	51
Figura 3. 4 <i>Espesor de capa seca RE2 / Barra de error.</i>	52
Figura 3. 5 <i>Mecanismo de falla a probeta de ensayo de adherencia por tracción.</i>	53
Figura 3. 6 <i>Curva de polarización Tafel del testigo.</i>	54
Figura 3. 7 <i>Curva de polarización inicial.</i>	55
Figura 3. 8 <i>Curva de polarización del RE1 y potencia de corrosión.</i>	56
Figura 3. 9 <i>Curva de polarización del RE1.</i>	56
Figura 3. 10 <i>Curva de polarización del RE2 y potencia de corrosión.</i>	56
Figura 3. 11 <i>Curva de polarización del RE2.</i>	57
Figura 3. 12 <i>Diagrama de Área Desprendida de las Probetas SP2.</i>	64
Figura 3. 13 <i>Diagrama de Porcentaje de Desprendimiento SP2.</i>	65
Figura 3. 14 <i>Diagrama de Área Desprendida de las Probetas SP10.</i>	69
Figura 3. 15 <i>Diagrama de Porcentaje de Desprendimiento SP10.</i>	70
Figura 3. 16 <i>Variación del Potencial Eléctrico SP2.</i>	75
Figura 3. 17 <i>Variación del Potencial Eléctrico SP10</i>	79

Índice de tablas

Tabla 1. 1	<i>Tipos de pinturas de secado por oxidación al aire.</i>	12
Tabla 1. 2	<i>Tipos de pinturas de secado por evaporación solvente.</i>	13
Tabla 1. 3	<i>Tipos de pinturas que secan por co-reacción química.</i>	13
Tabla 1. 4	<i>Categorías de preparación de superficie [10].</i>	14
Tabla 2. 1	<i>Clasificación de las probetas.</i>	25
Tabla 2. 2	<i>Parámetros de formulación de la solución ensayada.</i>	37
Tabla 3. 1	<i>RE1 valores promedios de rugosidad por probeta.</i>	48
Tabla 3. 2	<i>RE2 valores promedios de rugosidad por probeta.</i>	48
Tabla 3. 3	<i>RE1 Promedio de espesor de capa húmeda.</i>	50
Tabla 3. 4	<i>RE2 Espesor de Capa Húmeda.</i>	50
Tabla 3. 5	<i>RE1 Espesor de Capa Seca.</i>	51
Tabla 3. 6	<i>RE2 Espesor de Capa Seca.</i>	51
Tabla 3. 7	<i>Comparación de las muestras con respecto al testigo.</i>	57
Tabla 3. 8	<i>Resistividad de la solución.</i>	60
Tabla 3. 9	<i>Mediciones del pH de la solución.</i>	61
Tabla 3. 10	<i>Resultados de diámetro y área desprendida de SP2.</i>	61
Tabla 3. 11	<i>Porcentaje de Desprendimiento del SP2.</i>	65
Tabla 3. 12	<i>Resultados de diámetro y área desprendida de SP10.</i>	66
Tabla 3. 13	<i>Porcentaje de Desprendimiento del SP10.</i>	69
Tabla 3. 14	<i>Datos de potencial eléctrico de SP2 / Semana 1 y 2</i>	72
Tabla 3. 15	<i>Datos de potencial eléctrico de SP2 / Semana 3 y 4</i>	73
Tabla 3. 16	<i>Datos de potencial eléctrico de SP2 / Semana 5</i>	74
Tabla 3. 17	<i>Datos de potencial eléctrico de SP10 / Semana 1 y 2</i>	76
Tabla 3. 18	<i>Datos de potencial eléctrico de SP210 / Semana 3 y 4</i>	77
Tabla 3. 19	<i>Datos de potencial eléctrico de SP210/ Semana 5</i>	78
Tabla 3. 20	<i>Comparativa de alternativas para la evaluación de recubrimientos.</i>	81

Capítulo 1

1.1 Introducción

La protección de componentes metálicos en entornos industriales y marinos exige seleccionar sistemas anticorrosivos eficaces que garanticen su durabilidad frente a la degradación inherente por corrosión [1].

Este fenómeno es ampliamente reconocido como una de las principales causas de pérdidas económicas durante la operación de una planta industrial. Esto se debe a la implementación de soluciones correctivas inadecuadas o incompatibles con el sistema afectado, así como al incumplimiento de las normativas y criterios técnicos establecidos. Como resultado, se generan pérdidas directas relacionadas con los costos de reposición de estructuras, equipos, maquinaria o componentes inutilizados. A esto se suman pérdidas indirectas, más difíciles de cuantificar, pero considerablemente mayores, tales como interrupciones en la producción, fuga de producto, disminución del rendimiento, sobredimensionamiento innecesario y accidentes ocasionados por efectos de la corrosión, entre otros.

La corrosión en superficies metálicas expuestas a entornos agresivos, como los ambientes marinos, ha sido abordada mediante diversos métodos de protección, destacándose entre ellos el denominado sistema dual o combinado por su alta eficacia. Este enfoque consta de dos componentes: la aplicación de recubrimientos anticorrosivos de naturaleza orgánica sobre el elemento metálico (tuberías) y la implementación complementaria de un sistema de protección catódica [2].

En Interagua-Guayaquil, se produce un volumen anual de 386 millones de metros cúbicos de agua potable, destinado al abastecimiento de aproximadamente 2,5 millones de personas[3]. Esta distribución se realiza a través de una red de 6.171 kilómetros de infraestructura hidráulica enterrada, interconectada a tres plantas ubicadas en la ciudad de Guayaquil y cuatro plantas

adicionales situadas en distintas parroquias. Todas estas instalaciones operan conforme a los parámetros establecidos en la norma INEN 1108 y en el contrato de concesión correspondiente[3].

Para garantizar la continuidad y eficiencia del proceso de distribución diaria, el sistema cuenta con una infraestructura técnica robusta, compuesta por 4 acueductos principales, 68 estaciones de bombeo, 14 estaciones de rectoración, 42 reservorios, 182 estaciones reguladoras de presión, 890 equipos de medición de caudal, presión, nivel y calidad del agua, 253 distritos de medición continua y más de 1.037 sectores hidráulicos. Este conjunto de elementos permite asegurar la calidad, cobertura y confiabilidad del servicio, en cumplimiento con los estándares técnicos y normativos vigentes[3].

1.2 Descripción del Problema

La protección de tuberías metálicas enterradas frente a la corrosión constituye un desafío crítico en zonas con suelos agresivos como los de Guayaquil, donde la alta humedad, la presencia de sales disueltas y la elevada conductividad del terreno incrementan significativamente la probabilidad de deterioro.

Aunque existen normativas internacionales que estandarizan los ensayos de desprendimiento catódico, no se dispone de un protocolo de laboratorio basado en agua de mar sintética, considerada el escenario más agresivo para la evaluación, que compare la influencia de las preparaciones superficiales ST2 y SP10 sobre la resistencia de recubrimientos líquidos en estas condiciones. Esta ausencia de datos imposibilita seleccionar, con fundamento técnico, el sistema de protección más adecuado para las tuberías enterradas que operan en el entorno costero de Guayaquil. En consecuencia, resulta indispensable generar evidencia experimental que cuantifique dicha interacción y establezca criterios confiables para el diseño, la especificación y el mantenimiento de sistemas anticorrosivos.

1.3 Justificación del Problema

La ausencia de datos experimentales que describan la interacción entre recubrimientos líquidos y sistemas de protección catódica en condiciones extremas dificulta las decisiones técnico-económicas de las empresas de servicios básicos e industrias que emplean tuberías enterradas en la ciudad de Guayaquil. Esta limitación se traduce en mayores costos de mantenimiento y en un riesgo incrementado de interrupciones operativas. Disponer de información comparativa rigurosa permitirá optimizar la selección de recubrimientos y establecer criterios técnicos de aplicación acordes con las características del entorno costero.

Desde el ámbito económico, la correcta selección del sistema anticorrosivo disminuye los gastos de mantenimiento correctivo y prolonga la vida útil de las tuberías, liberando recursos que pueden destinarse a nuevas inversiones. En el plano social, los resultados de este estudio permitirán a Interagua especificar recubrimientos más adecuados y reducir el índice de roturas, garantizando así un suministro de agua continuo y de mayor calidad para la población de Guayaquil. En cuanto al impacto ambiental, la compatibilidad entre los recubrimientos y la protección catódica reducirá la frecuencia de fugas y la necesidad de reemplazos, lo que a su vez minimizará la generación de residuos y las emisiones relacionadas con la fabricación y transporte de tuberías nuevas. Demostrar esta compatibilidad bajo condiciones locales, por lo tanto, ofrece beneficios tangibles y cuantificables para la comunidad, la empresa operadora y el sector productivo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de evaluación potencioestática para determinar la resistencia al desprendimiento catódico en recubrimientos líquidos aplicados sobre tuberías de acero enterradas, utilizando probetas preparadas con diferentes grados de limpieza superficial, de acuerdo con la norma ASTM G8.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Establecer los parámetros técnicos para la evaluación potencioestática de desprendimiento catódico, mediante el uso de un potencioestato.
2. Aplicar ensayos de caracterización complementarios como medición de rugosidad, espesor de película húmeda (WFT), espesor de película seca (DFT) y adherencia (pull-off), para apoyar el análisis del desempeño de los recubrimientos.
3. Analizar la relación entre el grado de limpieza superficial, el tipo de recubrimiento y la resistencia al desprendimiento catódico, bajo condiciones simuladas de protección catódica.
4. Evaluar el comportamiento comparativo de dos recubrimientos líquidos en función de su compatibilidad con la protección catódica, en condiciones representativas del suelo agresivo de Guayaquil.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Corrosión en tuberías enterradas

Se habla de tuberías enterradas cuando la conducción se dispone bajo el nivel del terreno, rodeada por suelo natural o compactado. Esta se centra en ductos subterráneos destinados al transporte de agua potable.

La rotura de una línea de agua potable conlleva pérdidas volumétricas considerables, disminución de la presión en la red y posibles interrupciones del servicio. Además, el flujo incontrolado puede erosionar el terreno circundante, originar socavones o dañar infraestructura cercana. En sentido inverso, la pérdida de hermeticidad favorece la entrada de contaminantes del suelo al interior de la tubería, comprometiendo la calidad del agua distribuida. Por estas razones, la prevención de la corrosión resulta esencial para mantener la confiabilidad y la seguridad sanitaria del sistema[4].

En términos químicos, la corrosión es una reacción destructiva química o electroquímica entre el metal y su ambiente. Los metales, originalmente extraídos de minerales, liberan la energía empleada en su refinación cuando se corroen, regresando a un estado combinado muy similar al de aquellos minerales. Por eso la corrosión suele describirse como la “metalurgia extractiva al revés”: deshace el trabajo realizado para obtener el metal puro y deteriora sus propiedades esenciales[4].

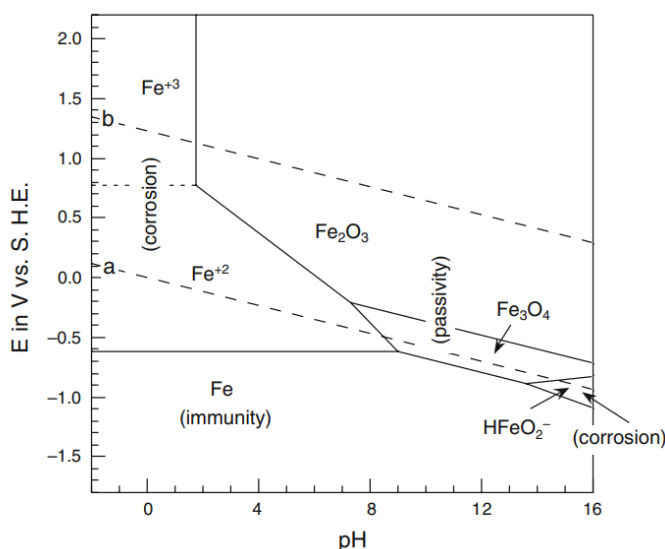
La corrosión metálica solo se manifiesta cuando existe un electrolito capaz de cerrar el circuito electroquímico; dicho entorno genera zonas diferenciadas donde predominan reacciones de oxidación (áreas anódicas) y de reducción (áreas catódicas). En la porción anódica el metal libera electrones y se disuelve, mientras que el sector catódico recibe esos electrones y, por lo tanto, se mantiene intacto. Para que el proceso avance es indispensable disponer de un camino conductor que complete la celda: en tuberías enterradas, ese puente lo proporciona la propia pared metálica y la solución presente en los poros del suelo (humedad, sales disueltas, etc.)[5].

La estabilidad del metal frente al ambiente del suelo puede predecirse con los diagramas de potencial de reducción frente al pH, conocidos como diagramas de Pourbaix. Introducidos por Marcel Pourbaix, estos gráficos trazan el potencial electroquímico (Eh) en el eje vertical y la acidez o alcalinidad (pH) en el horizontal, e identifican tres dominios característicos: inmunidad,

corrosión activa y pasividad. La inmunidad describe la ausencia de ataque, la corrosión activa implica la disolución del metal; y la pasividad, la pérdida de reactividad química causada por la formación de una película protectora estable, que vuelve al material prácticamente inerte bajo determinadas condiciones ambientales. Los diagramas representan una herramienta clave para prever el comportamiento electroquímico de tuberías enterradas y definir estrategias de protección eficientes frente a la corrosión. Como ejemplo práctico, el diagrama Eh-pH del hierro en contacto con agua (Figura 1.1), muestra cómo pequeños cambios en potencial o pH desplazan al material entre zonas de inmunidad, pasivación o corrosión, ilustrando la utilidad de esta herramienta para diseñar sistemas anticorrosivos [6].

Figura 1.1

Diagrama Pourbaix del hierro en contacto con el agua [15].



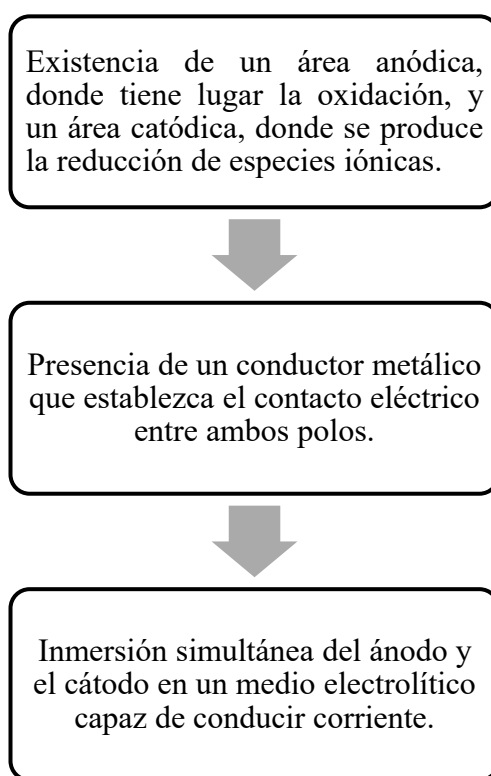
Una celda electroquímica constituida por metal-electrolito-metal puede funcionar de dos maneras: cuando convierte energía química en energía eléctrica y entrega corriente, se clasifica como celda galvánica o pila; en cambio, si recibe electricidad de una fuente externa y la almacena como energía química, se identifica como celda electrolítica.

1.5.1.1 Mecanismo básico de la Corrosión en Tuberías enterradas

La corrosión que afecta a tuberías enterradas o sumergidas tiene, por lo general, un origen galvánico, siendo este un mecanismo propio de los procesos electroquímicos en medios húmedos. Este fenómeno se presenta cuando dos metales, conectados eléctricamente, entran en contacto con un electrolito como el agua o el suelo generando un intercambio de electrones. En este sistema, el metal menos noble actúa como ánodo y experimenta la degradación, mientras que el más noble funciona como cátodo y permanece protegido. Para evaluar este tipo de corrosión, es fundamental determinar la ubicación relativa de los materiales involucrados dentro de la serie galvánica. Todo este mecanismo ocurre dentro de una celda electroquímica, cuya operación requiere el cumplimiento de ciertas condiciones esenciales como se muestra en la Figura 1.2.

Figura 1. 2

Diagrama de flujo del mecanismo de corrosión.

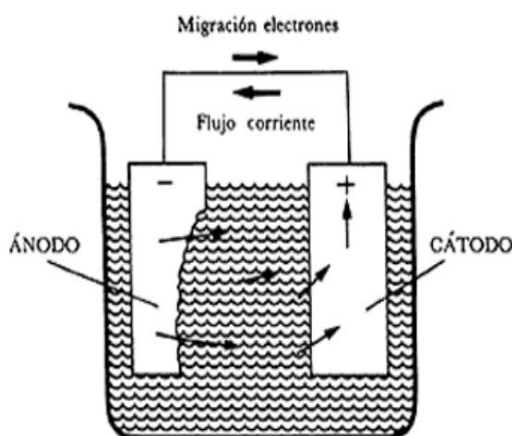


En este contexto, el ánodo, al ser el componente más electronegativo, es la zona donde se produce la oxidación, liberando electrones y permitiendo la migración de iones metálicos hacia el electrolito. En el ánodo, la corriente eléctrica abandona el metal e ingresa en la solución debido al sentido físico del flujo electrónico dentro de los conductores metálicos (opuesto al sentido convencional de la corriente), tal como se aprecia en la Figura 1.3. Por su parte, el cátodo, siendo el material más electropositivo, es el sitio donde los electrones provenientes del ánodo se combinan con especies iónicas del electrolito, dando lugar a las reacciones de reducción[7].

Como referencia cuantitativa de estos procesos en ambientes sumergidos, se ha establecido que el acero, sometido a corrosión uniforme en agua de mar, presenta una velocidad promedio de pérdida de material de aproximadamente 0,13 mm por año, lo que equivale a una pérdida de masa cercana a $2,5 \text{ g} / (\text{m}^2 \cdot \text{día.})$ [8] [8]

Figura 1.3

Flujo de electrones del ánodo hacia el cátodo en sentido opuesto a la corriente convencional [5].



La disolución de un metal inmerso en un electrolito constituye igualmente un fenómeno electroquímico. La aparición de innumerables burbujas sobre la superficie metálica delata la presencia de múltiples microscópico de estas micro pilas galvánicas, resulta imposible distinguir

a simple vista las regiones anódicas de las catódicas. Como estas zonas cambian de ubicación de manera continua, llega un momento en que el metal termina por disolverse por completo[8].

1.5.1.2 Tipos de recubrimientos protectores

Actualmente, existe una amplia gama de recubrimientos desarrollados cuya formulación responde a la necesidad de resolver problemas específicos. En este contexto, es posible distinguir entre los recubrimientos anticorrosivos, diseñados para proteger un sustrato frente a la acción de un ambiente corrosivo, y las pinturas arquitectónicas, orientadas principalmente a fines estéticos.

En el caso de los recubrimientos anticorrosivos que constituyen el objeto de este estudio, su formulación exige la incorporación de resinas y pigmentos de alta resistencia, con el propósito de alcanzar un elevado nivel de protección. Por el contrario, las pinturas arquitectónicas recurren a materias primas de menor resistencia, lo que permite obtener una amplia variedad de colores, matices y acabados decorativos [9].

Clasificación de recubrimientos según el mecanismo de formación de película y tipo de resina

Las pinturas industriales pueden categorizarse, en función de su mecanismo de curado y el tipo de resina empleada, en tres grandes grupos. A continuación, se describe el grupo correspondiente a los sistemas de secado por oxidación atmosférica:

a) Recubrimientos de secado por oxidación al aire

Este tipo de recubrimientos forma su película mediante una reacción química entre los aceites secantes presentes en el vehículo y el oxígeno atmosférico. El proceso de curado combina evaporación del solvente y oxidación, siendo lento en comparación con otros sistemas. Son sistemas económicos y fáciles de aplicar, adecuados para ambientes poco agresivos donde no se requiera alta resistencia química o inmersión prolongada. A continuación, se muestra los siguientes tipos como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1*Tipos de pinturas de secado por oxidación al aire[9].*

<i>Pinturas al aceite</i>	Estos recubrimientos utilizan aceites secantes como vehículo, los cuales reaccionan con el oxígeno atmosférico mediante oxidación, formando la película protectora. Su curado es lento y sufre saponificación en medios agresivos, por lo que se recomienda solo en ambientes de baja corrosividad. No obstante, su buena humectación permite una aplicación eficaz sobre superficies con preparación mínima.
<i>Pinturas alquídicas</i>	Las resinas alquídicas, derivadas de la condensación de poliácidos y polialcoholes, se modifican con aceites secantes vegetales, cuya proporción define el desempeño del recubrimiento. Su curado, basado en evaporación y oxidación atmosférica, es lento. Presentan limitaciones como baja resistencia a la hidrólisis alcalina, sensibilidad a la humedad, incompatibilidad con pigmentos básicos y pérdida de flexibilidad por oxidación continua.

b) Recubrimientos cuyo curado se produce por evaporación del solvente

Son formulaciones con resinas termoestables de alto peso molecular cuyo secado ocurre exclusivamente por evaporación del disolvente, sin reacciones químicas posteriores. Se caracterizan por su rápido secado y buena resistencia química, pero son sensibles a disolventes agresivos tras el curado. Dentro de esta categoría se incluyen los siguientes tipos que se muestra en la Tabla 1.2 [9].

Tabla 1. 2

Tipos de pinturas de secado por evaporación solvente[9].

Vinílicos	Basados en PVC o acetato de vinilo. Alta resistencia química, impermeabilidad y protección barrera. Usados en tanques, represas y estructuras metálicas. Requieren superficie con acabado de metal casi blanco.
Caucho clorado	Derivado del caucho natural. Buena resistencia química y a la humedad. Común en agua potable, plantas industriales y estructuras marinas. Termo degradables sobre 65 °C. Se aplican en capas delgadas, aunque existen versiones de mayor espesor.
Acrílicos	Estéticos, con buena resistencia UV, retención de color y brillo. Aplicados como acabado en ambientes moderadamente agresivos. Existen versiones base solvente y base agua.
Bituminosos	A base de asfalto o alquitrán, con muy baja permeabilidad. Económicos y eficaces en ambientes húmedos o sumergidos. Aplicables sobre superficies de baja preparación; algunas versiones se aplican en caliente con altos espesores y cargas reforzantes.

c) Recubrimientos cuyo curado ocurre mediante co-reacción química

Estos recubrimientos forman redes poliméricas entrecruzadas mediante reacciones químicas, ofreciendo alta resistencia química y mecánica, como se detalla en la Tabla 1.3 [9].

Tabla 1. 3

Tipos de pinturas que secan por co-reacción química[9].

Epóxicas	Bicomponentes (resina + curador), curan por reacción entre epoxi y aminas/amidas. Alta resistencia química, excelente protección anticorrosiva, pero poca estabilidad UV. Requieren superficie limpia (metal blanco), control de humedad y temperatura. Usados en tanques, plataformas y estructuras industriales[9].
Poliuretanos	Reacción entre poli isocianato y polialcohol. Destacan por su resistencia química, abrasiva y retención de brillo UV. Comunes como acabados

	sobre epóxicos en exteriores agresivos. Requieren buena preparación superficial.
<i>Epoxis ricos en zinc</i>	Contienen alto porcentaje de polvo de zinc ($\approx 93\%$) para protección catódica. Funcionan como imprimaciones para ambientes severamente corrosivos. Requieren limpieza a metal blanco para garantizar contacto eléctrico entre partículas de zinc.

1.5.1.3 Preparación de superficies

Una preparación adecuada de la superficie, previa a la aplicación de cualquier recubrimiento o pintura, resulta crucial para el éxito del acabado. El desempeño del revestimiento depende en gran medida de su unión correcta al sustrato; por ello, es indispensable eliminar aceites, grasas, capas antiguas de pintura y contaminantes como la cascarilla de laminación y el óxido [10].

El tratamiento superficial previo a la aplicación de recubrimientos está reglamentado por diversas entidades internacionales; entre ellas sobresale la norma estadounidense SSPC (Steel Structures Painting Council, Pittsburgh, EE. UU.). Dicho documento clasifica las distintas categorías de limpieza y describe los procedimientos requeridos para asegurar una base adecuada antes de aplicar cualquier recubrimiento o pintura. Las categorías contempladas por la SSPC son las que se muestran en la siguiente Tabla 1.4.

Tabla 1. 44

Categorías de preparación de superficie [10].

Norma	Método	Descripción
SSPC		
SP 1	Limpieza con Solventes.	Remueve grasa, aceite y sales con disolventes o detergentes.

SP 2	Desbaste con herramientas manuales	Cepillos y lijas para eliminar óxido suelto o pintura deteriorada.
SP 3	Limpieza con herramientas manuales mecánicas.	Lijadoras, cepillos motorizados; mayor efectividad que SP 2.
SP 5	Limpieza con Chorro de abrasivo: Granallado Metal Blanco	Limpieza total del sustrato. Uso en ambientes severos.
SP 6	Limpieza con Chorro de abrasivo: Granallado Comercial	Limpieza casi total. Se permite hasta 1/3 de residuos firmemente adheridos.
SP 7	Limpieza con Chorro de abrasivo: Granallado Ligero	Limpieza parcial para ambientes poco agresivos.
SP 8	Decapado químico	Uso de químicos para eliminar contaminantes; requiere neutralización posterior.
SP 10	Limpieza con Chorro de abrasivo: Granallado Semi-Blanco	Limpieza muy alta; permite hasta 5 % de residuos firmes.
SP 11	Limpieza Manual con herramientas mecánicas:	Limpieza metal limpio o desnudo c/ rugosidad mínima de 25 micrones
SP 12	Limpieza con Agua presión – Waterjetting:	Remoción de contaminantes solo con agua a alta presión.
SP 13	Limpieza de concreto	Limpieza de sustratos cementicios para lograr buena adherencia.
SP 14	Granallado industrial	Permite hasta 10 % de residuos firmes distribuidos homogéneamente.

SP 15	Limpieza	Manual	con	Limpieza comercial con rugosidad mínima de 25 micrones. Tolera hasta 33 % de residuos leves.
	herramientas mecánicas.			
SP 16	Limpieza metales no ferrosos.			Galvanizado, Acero Inoxidable, cobre aluminio, latón, etc, con perfil mínimo de 19 μm .

1.5.1.4 Nivel freático y factores ambientales que afectan la infraestructura hidráulica.

Guayaquil, asentada sobre una llanura que oscila apenas entre 2,5 y 6 m s. n. m., presenta un nivel freático naturalmente alto debido a su localización entre la ribera occidental del río Guayas y el Estero Salado; esta lámina de agua subterránea, sumada a la salinidad aportada por los estuarios, crea un ambiente permanentemente húmedo y corrosivo para las tuberías enterradas de hierro dúctil y hormigón pretensado. Aunque cerca del 75 % de la trama urbana descansa sobre pendientes inferiores al 20 %, la ciudad se ve interrumpida por cerros aislados Santa Ana, El Carmen, Mapasingue, Ceibos, Urdesa que apenas superan los 250 m, mientras que las estribaciones de la cordillera Chongón-Colonche al noroeste alcanzan cotas de hasta 320 m y revelan laderas de rocas ígneas y sedimentarias con inclinaciones entre el 15 % y el 45 %; estos relieves obligan con frecuencia a rediseñar los trazados y métodos de excavación de nuevas redes[3].

El clima ecuatorial distingue solo dos estaciones: una fase lluviosa y cálida de enero a mayo, que eleva el nivel freático e inunda zanjas, y un periodo relativamente seco y templado de junio a diciembre, aprovechado para la mayor parte de las obras hidráulicas; las temperaturas varían de 23 °C en verano a picos de 40 °C en invierno, y el fenómeno El Niño, con recurrencia aproximada de siete a ocho años, intensifica las precipitaciones e impacta la operación y mantenimiento de los sistemas de distribución. La Figura 1.4 ilustra una excavación en la que se observa una tubería expuesta y rodeada de un terreno saturado, como consecuencia directa del

nivel freático elevado. Se evidencia las condiciones críticas de humedad y barro que enfrentan los equipos técnicos durante las labores de mantenimiento, así como la necesidad de aplicar recubrimientos adecuados y estrategias de drenaje que aseguren la durabilidad de la infraestructura enterrada.

Figura 1. 4

Tubería expuesta en zona húmeda: implicaciones del nivel freático alto en Guayaquil.



En conjunto, la topografía casi plana, la proximidad a cuerpos de agua y la dualidad climática conforman un escenario en el que la elección adecuada de recubrimientos y la gestión del nivel freático resultan cruciales para prolongar la vida útil de las redes de agua potable.

1.5.2 Métodos de evaluación de desprendimiento catódico.

1.5.2.1 Desprendimiento catódico del recubrimiento en tuberías enterradas.

En la superficie del recubrimiento que protege la tubería existen poros microscópicos que, aunque imperceptibles, resultan demasiado pequeños para que el hidrógeno gaseoso (H_2) generado por la electrólisis del agua se libere al exterior. Como consecuencia, entre la película de pintura y el metal se forman diminutas burbujas o ampollas que, con el tiempo, ejercen presión sobre la capa protectora. La pintura resiste hasta que esta presión supera su límite mecánico, se fisura y deja una

porción del sustrato expuesta, facilitando la entrada de humedad y el inicio de la oxidación. Este mecanismo se conoce como desprendimiento catódico (cathodic disbonding), ya que el deterioro del recubrimiento comienza con la formación de ampollas, ofreciendo un entorno favorable para la corrosión. La rapidez con que las ampollas revientan depende principalmente de la fragilidad del recubrimiento, mientras que su diámetro puede variar según el tamaño del área metálica afectada. Una preparación superficial óptima incrementa la resistencia del sistema frente a este fenómeno.

Para mitigar la corrosión de estructuras metálicas se emplean habitualmente sistemas duales de protección; sin embargo, a potenciales excesivamente negativos (por ejemplo, inferiores a 1500 mV, límite que varía según la capacidad del recubrimiento para resistir el desprendimiento catódico) puede aparecer sobreprotección. El exceso de corriente favorece la reacción catódica de evolución de hidrógeno en la interfaz metal-recubrimiento, lo que acelera la formación de ampollas (Figura 1.5) y, en última instancia, compromete la integridad de la pintura [8].

Figura 1.5

Recubrimiento dañado por desprendimiento catódico [16].



1.5.2.2 Ensayos de rugosidad, adherencia, espesor de capa seca y espesor de capa húmeda

- ***Ensayo de adherencia***

El ensayo de adherencia por tracción perpendicular, establecido por las normas ASTM D 4541 y BS EN ISO 4624, cuantifica la fuerza normal necesaria para separar un recubrimiento de su sustrato. El procedimiento consiste en adherir un testigo metálico (dolly) a la película protectora mediante un adhesivo epoxídico correctamente formulado, dejarlo curar bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, y aplicar después una carga creciente, perpendicular a la superficie, hasta que el conjunto testigo-recubrimiento se desprende. La presión máxima alcanzada en el momento de la falla y el modo de fractura cohesivo en la película, cohesivo en el adhesivo, adhesivo en la interfaz o mixto permiten evaluar cuantitativamente la adherencia del sistema de recubrimiento. La exactitud de la medición puede verse alterada por diversos factores, entre ellos la viscosidad y la relación de mezcla del adhesivo, la limpieza y rugosidad inicial de la superficie, la geometría y el material del testigo, las temperaturas de curado y de ensayo, la decisión de seccionar o no la película alrededor del dolly y el tipo de dispositivo de tracción (manual o automático). Cualquier desviación significativa de los parámetros indicados en la norma puede introducir errores y comprometer la validez de los resultados. Para minimizar fallos originados en el adhesivo, es habitual efectuar un lijado muy ligero de la capa superficial del recubrimiento con el fin de aumentar el anclaje del adhesivo. Este acondicionamiento debe realizarse con extremo cuidado para no dañar la película ni reducir de forma apreciable su espesor, de lo contrario se alteraría el estado original del recubrimiento y, en consecuencia, la fiabilidad del ensayo [11].

- **Determinación de espesor de película**

El espesor de película comprende dos magnitudes distintas: el espesor de película húmeda (WFT) y el espesor de película seca (DFT), términos que derivan del inglés. Las lecturas de WFT se utilizan como guía operativa para que el personal de aplicación y el equipo de inspección controlen la cantidad de recubrimiento aplicada y aseguren que, tras el curado, se alcance el DFT especificado. El valor de DFT constituye el registro oficial que certifica la conformidad del trabajo.

El medidor de película húmeda suele ser una platina dentada normalizada con dos puntas extremas coplanarias y una serie de muescas intermedias de longitudes progresivas; cada muesca define la distancia entre su extremo y el plano formado por las puntas exteriores.

Durante la medición, el dispositivo se presiona de forma firme y perpendicular sobre la pintura fresca y luego se retira. Las dos puntas extremas siempre quedan impregnadas de pintura, mientras que algunas muescas centrales también muestran pintura. El espesor húmedo corresponde al intervalo comprendido entre la última muesca manchada y la primera muesca limpia. Si ninguna muesca resulta impregnada o, por el contrario, todas lo están, se requiere emplear otra cara del medidor, ya que el espesor se encuentra fuera del rango de la escala utilizada. Para obtener datos fiables, las mediciones deben realizarse lejos de irregularidades superficiales. En superficies curvas, el medidor se aplica longitudinalmente para que la curvatura no distorsione la lectura. Asimismo, el instrumento se limpia cuidadosamente antes de cada uso para garantizar la precisión. Los medidores de WFT resultan útiles únicamente cuando se conoce el porcentaje de sólidos por volumen del material (% SPV). La relación WFT/DFT depende directamente de dicho porcentaje; multiplicar por dos el DFT para estimar el WFT solo es válido cuando el recubrimiento posee un 50 % de sólidos por volumen.

Para determinar el DFT sobre sustratos ferrosos se emplean instrumentos magnéticos; en materiales no ferrosos se utilizan equipos basados en corrientes de Eddy. La calibración de los medidores magnéticos se realiza conforme a la norma SSPC-PA 22. Las lecturas proporcionan la precisión necesaria para comprobar que se ha alcanzado el espesor seco especificado, aunque no es factible medir cada centímetro cuadrado de superficie. Según el estándar SSPC 24, deben efectuarse cinco mediciones independientes por cada 10 m² de área.

Cada medición corresponde al promedio de tres lecturas consecutivas. El promedio de las cinco mediciones debe situarse dentro del intervalo de DFT prescrito, mientras que cada medición individual puede alcanzar hasta el 80 % del valor nominal; las lecturas individuales empleadas para calcular cada promedio pueden desviarse considerablemente sin invalidar el resultado global [12].

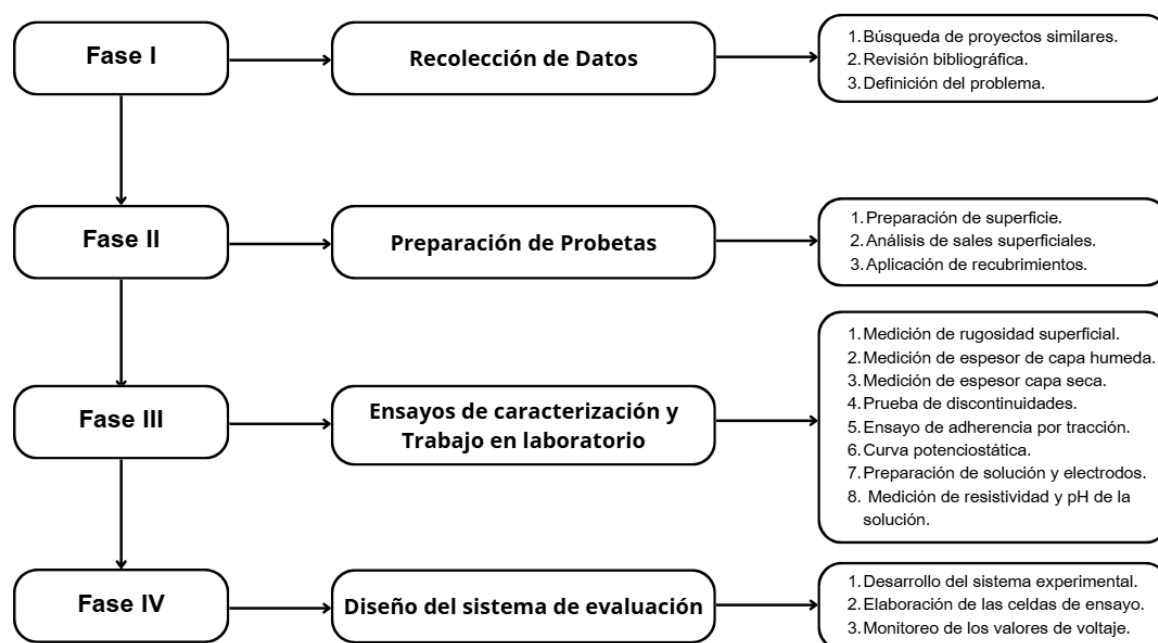
Capítulo 2

2. Metodología.

El proyecto se estructuró en cuatro etapas, ilustradas en la Figura 2.1. La primera fase consistió en la recopilación de datos y fuentes bibliográficas. Posteriormente, se llevó a cabo la preparación de las probetas que sirvieron como base para la parte experimental. La tercera etapa abarcó la caracterización experimental y la ejecución de los ensayos de laboratorio. Finalmente, el trabajo culminó con el diseño del sistema de evaluación del desprendimiento catódico.

Figura 2. 1

Metodología aplicada para el desarrollo del proyecto.



2.1 Fase I - Levantamiento de información

En esta primera fase se llevó a cabo el levantamiento de información con el objetivo de establecer una base sólida para el desarrollo del proyecto. Se inició con la búsqueda de antecedentes y proyectos similares que aborden el desprendimiento catódico en recubrimientos aplicados a tuberías enterradas, lo cual permitió identificar enfoques metodológicos y soluciones previamente implementadas. Posteriormente, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre normativas, mecanismos de corrosión, métodos de ensayo y criterios de evaluación relacionados con el fenómeno. Por último, con base en la información recopilada, se procedió a la definición clara del problema técnico que motiva la propuesta del diseño de un sistema de evaluación.

2.2 Fase II - Preparación y acondicionamiento de las probetas

2.2.1 Preparación de superficies.

El presente estudio se realizó utilizando 12 probetas planas de acero A36, cada una con dimensiones de 15×15 cm y 6 mm de espesor (Figura 2.2). Las probetas fueron preparadas utilizando dos grados diferentes de limpieza superficial: SP10 y SP2. La elección del grado de limpieza SP10 se fundamentó en las recomendaciones establecidas por la ficha técnica del fabricante del revestimiento, garantizando condiciones óptimas de adherencia y desempeño del recubrimiento. Por otro lado, la limpieza SP2 fue seleccionada debido a que representa la práctica habitual de los contratistas locales, quienes comúnmente no siguen estrictamente las indicaciones técnicas, lo que permite evaluar las consecuencias reales de estas desviaciones en campo.

Adicionalmente, se aplicaron dos sistemas diferentes de recubrimiento, ambos formulados con resinas epóxicas de alto desempeño. Aunque existen alternativas con mayores prestaciones como los recubrimientos EAF o 3RPE, estas opciones presentan limitaciones significativas en el contexto local de Guayaquil debido a la limitada disponibilidad de aplicadores especializados,

incompatibilidad con ciertos diámetros de tubería y costos elevados. Por estos motivos, se optó por utilizar recubrimientos líquidos epóxicos, que combinan alto rendimiento, facilidad de aplicación y viabilidad económica.

La combinación de estos factores dio lugar a cuatro grupos experimentales claramente definidos, permitiendo evaluar y comparar el desempeño de los recubrimientos en función del grado de limpieza superficial y del sistema aplicado. Los detalles de estas combinaciones se presentan en la Tabla 2.1.

Figura 2. 2

Probetas planas de acero.



Tabla 2. 1

Clasificación de las probetas.

Limpieza superficial	Tipo de recubrimiento	Cantidad	Código identificación
SP2	RE1	3	SP2-RE1
	RE2	3	SP2-RE2
SP10	RE1	3	SP10-RE1
	RE2	3	SP10-RE2

Cada una de las probetas utilizadas en este estudio fue marcada con un código único, diseñado para identificar tanto el tipo de recubrimiento epóxico aplicado como el grado de preparación superficial previo al pintado. Esta codificación permite rastrear con claridad el sistema de protección evaluado en cada caso. A modo de ejemplo, la nomenclatura incluye información sobre el grupo experimental, el tipo de recubrimiento y el método de preparación, facilitando así la trazabilidad a lo largo de todo el proceso de ensayo (Figura 2.3 y 2.4).

Figura 2. 4

Probeta SP2.



Figura 2. 3

Probeta SP10.



2.2.2 Análisis de sales superficiales

Este ensayo se realizó conforme a la norma ASTM D4940, empleando el equipo Positector SST (Salt Soluble Tester). En primer lugar, se verificó que la superficie de la probeta estuviera libre de contaminantes. A continuación, se seleccionó aleatoriamente un punto sobre la superficie para colocar el anillo magnético. Posteriormente, se utilizaron 3 ml de agua desionizada, los cuales fueron introducidos mediante una jeringuilla a través de un anillo magnético, diseñada específicamente para este propósito (Figura 2.5 y 2.6)

Figura 2. 5*Agua desionizada.***Figura 2. 6***Anillo magnético.*

Una vez dentro del anillo magnético, se realizó un proceso de succión y expulsión del agua utilizando la jeringuilla, con el fin de asegurar una distribución uniforme del líquido sobre el área delimitada por el parche imantado, optimizando así la precisión del ensayo. Finalmente, el agua extraída fue depositada en la sonda del equipo, el cual registró parámetros como la duración del ensayo, la temperatura de la muestra, la conductividad eléctrica y la densidad de sales superficiales (Figura 2.7).

Figura 2. 7*Equipo Positector SST.*

2.2.3 Aplicación de recubrimientos

La aplicación de los recubrimientos se realizó siguiendo estrictamente las recomendaciones del fabricante. Inicialmente, se prepararon los revestimientos mezclando las proporciones adecuadas de catalizador, según lo establecido en las respectivas fichas técnicas. Se utilizaron dos tipos de recubrimientos, ambos de base epóxica.

El primer recubrimiento aplicado fue RE2, cuyo espesor de capa seca de referencia, según la ficha técnica, es de 350 micras. Debido a este requerimiento, fue necesaria la aplicación de una segunda capa para alcanzar el espesor especificado. La aplicación se llevó a cabo utilizando un rodillo (Figura 2.8).

Figura 2. 8

Aplicación de recubrimiento en probeta.



Posteriormente, se aplicó el recubrimiento RE1, el cual tiene como valor de referencia un espesor de capa seca de 200 micras. Para lograr este espesor, se realizaron múltiples aplicaciones empleando tanto rodillo como brocha (Figura 2.9), garantizando una cobertura uniforme y continua sobre la superficie de las probetas (Figura 2.10).

Figura 2. 9

Aplicación de recubrimiento con brocha.



Figura 2. 10

Aplicación de recubrimiento uniformemente.



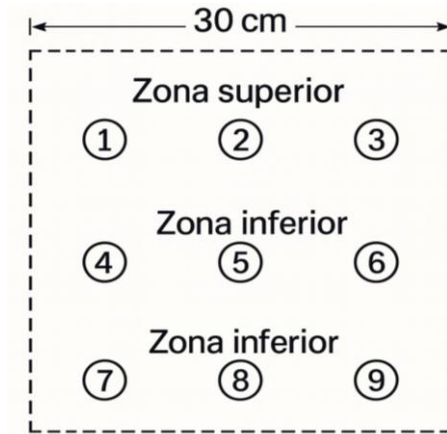
2.3 Fase III - Ensayos de caracterización y trabajo en laboratorio.

2.3.1 Medición de rugosidad superficial.

Para la medición de la rugosidad superficial se utilizó el equipo Positector SPG, siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D4417 – Método B. El ensayo se ejecutó tomando nueve mediciones distribuidas sobre la superficie de cada probeta, tal como se muestra en la Figura 2.11.

Figura 2. 11

Mediciones distribuidas sobre la superficie de las probetas.



El procedimiento aplicado fue el siguiente:

- Se retiró la tapa de protección de la sonda.
- Se encendió el medidor presionando el botón central.
- Se colocó la sonda en posición plana sobre la superficie a medir, asegurándose de que la punta alcanzara el punto más bajo del perfil, manteniéndola fija hasta que el equipo emitiera dos señales sonoras y mostrara el valor de medición (Figura 2.12).
- Se levantó la sonda de la superficie antes de realizar la siguiente lectura.

Este procedimiento fue repetido para las doce probetas con el fin de obtener un registro representativo de la rugosidad superficial de cada una.

Figura 2. 12

Medición de rugosidad superficial de las probetas.



2.3.2 Medición de espesor de capa húmeda.

Después de la aplicación del recubrimiento, y mientras la capa aún permanecía húmeda, se procedió a medir el espesor de la película húmeda utilizando una galga dentada (Figura 2.13), conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM D4414. Este procedimiento fue realizado de manera individual para cada una de las probetas, con el fin de verificar que el espesor aplicado estuviera dentro del rango requerido según la ficha técnica del recubrimiento antes ya revisada (Figura 2.14).

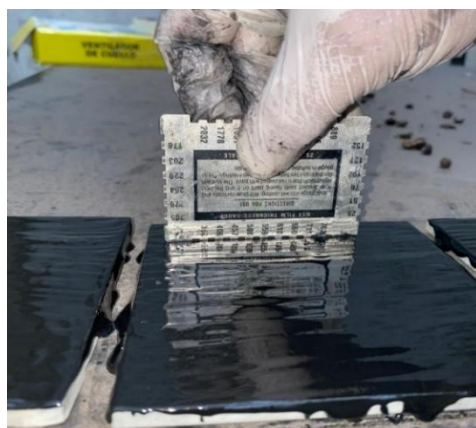
Figura 2. 13

Galga dentada.



Figura 2. 14

Medición de espesor de capa húmeda.



2.3.3 Medición de espesor capa seca.

Para la medición del espesor de capa seca se siguieron los lineamientos establecidos en la norma ASTM D7091. El procedimiento fue similar al utilizado para la medición de rugosidad superficial, ya que también se tomaron nueve lecturas distribuidas a lo largo de la superficie de cada probeta, con el fin de obtener un valor representativo. Las mediciones se realizaron empleando el equipo PosiTector 6000 (Figura 2.15).

Figura 2. 15

Equipo PosiTector 6000.



2.3.4 Prueba de discontinuidades.

Para la detección de discontinuidades o defectos en el recubrimiento (holidays), se realizó un ensayo conforme a la norma ASTM D5162, empleando el equipo Positest HHD (Figura 2.16). La prueba consistió en realizar un barrido uniforme sobre toda la superficie de la probeta utilizando la escobilla de acero inoxidable provista por el equipo, manteniendo una velocidad de desplazamiento no mayor a 0,30 m/s (1 ft/s), según lo estipulado en la norma, con el objetivo de identificar posibles fallas de continuidad en la película aplicada. En caso de que el equipo detectara un poro o discontinuidad, se activaba de forma inmediata la alarma visual mediante luz estroboscópica o la alarma sonora, alertando la presencia de un defecto en el recubrimiento.

Figura 2. 16

Equipo Positest HHD.



Para asegurar la correcta ejecución de la prueba, se siguieron los siguientes pasos:

- Se fijó el rodillo del electrodo según las indicaciones del fabricante.
- Se conectó el electrodo de alta tensión al cuerpo del equipo.
- Se conectó el cable de tierra a una zona metálica limpia y sin recubrimiento de la probeta.
- Se ajustó el voltaje de prueba usando la norma como referencia.

Para este estudio, el voltaje de ensayo se estableció considerando un espesor de recubrimiento de 500 – 1000 μm y la norma NACE SP0188, sección 4 (Tabla 1), lo que arrojó un valor de 3 000 V y aseguró la conformidad del ensayo y la fiabilidad de los resultados obtenidos (Figura 2.17).

Figura 2. 17

Prueba de discontinuidades.



2.3.5 Ensayo de adherencia por tracción.

El ensayo de adherencia por tracción perpendicular se ejecutó siguiendo los lineamientos de ASTM D4541-23, la cual proporciona los requisitos esenciales para evaluar la resistencia con la que el recubrimiento permanece anclado al sustrato, así como los criterios para la interpretación del modo de fallo. A continuación, se describe, de forma integrada, el procedimiento adoptado:

- **Preparación de la superficie y del recubrimiento**

El área de ensayo se limpió con solventes libres de residuos, eliminando polvo, aceite y humedad. Donde la norma lo recomienda, se lijó suavemente el recubrimiento con lija P320 para garantizar un contacto óptimo con el adhesivo sin comprometer la integridad de la película.

- **Selección y acondicionamiento de los dollys**

Se utilizaron dollys de acero inoxidable de **20 mm de diámetro** (área $\approx 314 \text{ mm}^2$), conforme al rango especificado en ASTM D4541. Antes de su aplicación, las superficies de contacto se desengrasaron y se rugosizaron ligeramente para mejorar la adhesión del pegamento.

- **Aplicación del adhesivo**

Se empleó un adhesivo epóxico bicomponente de alta resistencia, curable a temperatura ambiente, garantizando un espesor homogéneo ($< 0,1 \text{ mm}$) entre dolly y recubrimiento. Así se evita que la falla se origine en la propia línea de pegamento.

- **Curado**

Los dollys se dejaron curar 24 h a condiciones ambientales recomendadas por el fabricante del adhesivo.

- **Ensamble del equipo de tracción**

Se acopló un medidor hidráulico portátil PosiTest AT-A calibrado conforme a la Sección 7 de ASTM D4541. El pistón se alineó axialmente con el centro del dolly para evitar esfuerzos de corte.

- **Aplicación de carga**

La presión se incrementó de forma continua a $0,5 \text{ MPa s}^{-1}$ hasta la rotura. El equipo convierte automáticamente la presión a tensión (MPa) considerando el área del dolly.

- **Registro y clasificación del fallo**

Se registró el valor de adherencia (PA) como la tensión máxima alcanzada antes de producirse la separación del recubrimiento. Asimismo, se identificó el modo de fallo, clasificándolo como adhesivo (A), cohesivo en el recubrimiento (C), cohesivo en el sustrato (S) o mixto, de acuerdo con lo establecido en la Nota 10 de la norma ASTM D4541. Todos los resultados fueron documentados mediante fotografías macro y micro, con el fin de facilitar su posterior análisis.

2.3.6 Curva potencioestática.

Como complemento al ensayo de desprendimiento catódico, se realizaron mediciones electroquímicas para obtener parámetros cinéticos y de interfaz del sistema recubrimiento epóxico–acero ASTM A36 en un electrolito salino multicomponente (NaCl – Na_2SO_4 – Na_2CO_3). Se empleó una celda de tres electrodos (WE: muestra con área expuesta previamente definida de 28.27 mm^2 ; RE: Ag/AgCl ; CE: inerte), manteniendo condiciones controladas de ensayo (Figura 2.18).

Curva potencioestática

- El ensayo se ejecutó de acuerdo con prácticas ASTM vigentes para la obtención de parámetros de corrosión a partir de curvas de polarización.
- Condiciones de barrido: se aplicó un rango de $\pm 250 \text{ mV}$ respecto del E_{corr} , con una velocidad de 1 mV/s .
- Registro de señal: se registró la densidad de corriente en función del potencial aplicado, obteniéndose la curva característica.

- Parámetros extraídos: a partir del ajuste en regiones de Tafel se determinaron I_{corr} , E_{corr} y los coeficientes anódico y catódico (β_a , β_c), insumos para estimar la tasa de corrosión según los supuestos del método.

Figura 2. 18

Celda electroquímica experimental.



2.3.7 Preparación de solución y electrodos.

Preparación de soluciones

Con fundamento en la norma ASTM G8, se preparó el electrolito requerido para evaluar el desprendimiento catódico en doce probetas individuales, cada una alojada en su recipiente cilíndrico de 22 cm de diámetro interno y 17 cm de altura útil. Cada recipiente se llenó hasta 1,4195 L, volumen determinado experimentalmente y adoptado como valor de referencia en los cálculos. Usando una densidad media del agua de $0,996\ 9\ \text{kg L}^{-1}$, la masa de agua por recipiente resultó de 1415 g; para las doce probetas, la masa total de agua ascendió a 16980 g.

De acuerdo con la norma, la solución debe contener un 1 % en masa de las sales de grado técnico: NaCl, Na₂SO₄ y Na₂CO₃, respecto de la masa de agua. Por ello se pesaron simultáneamente 4,72g de NaCl, 4,72 g de Na₂SO₄ y 4,72 g de Na₂CO₃ por recipiente, totalizando 14,15 g de sales (1 % m/m). Escalado a las doce probetas, se dispuso de 56,6 g de cada sal, para 169,8 g de sales totales, como se representa en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2

Parámetros de formulación de la solución ensayada.

Magnitud	Por recipiente	Total (12 probetas)
Volumen de agua (L)	1,4195	17,034
Masa de agua (g)	1415	16 980
NaCl (g)	4,72	56,6
Na ₂ SO ₄ (g)	4,72	56,6
Na ₂ CO ₃ (g)	4,72	56,6

Se ejecutó el siguiente procedimiento:

- **Limpieza:** los recipientes se lavaron con detergente neutro y agua destilada, y se enjuagaron tres veces con agua destilada.
- **Dosificación del agua:** se añadieron $1\,419 \pm 5$ ml de agua destilada a cada recipiente.
- **Disolución asistida:** las tres sales se incorporaron simultáneamente y se disolvieron empleando una agitadora magnética (Fig. 2.19) provista de barras de agitación de PTFE, manteniendo el giro durante quince minutos hasta obtener una solución homogénea y transparente.
- **Etiquetado:** cada recipiente se identificó con el código de la probeta y la fecha de preparación, tras lo cual se procedió al montaje de la celda y al ensayo electroquímico conforme a ASTM G8 (Figura 2.20).

Esta metodología garantiza la preparación reproducible del electrolito al 1 % m/m de las sales de grado técnico para las doce condiciones de prueba especificadas.

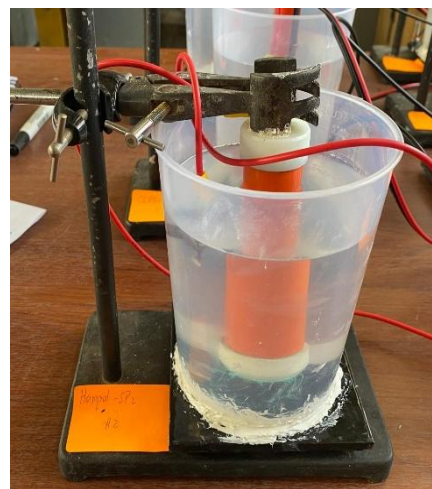
Figura 2. 19

*Agitador Magnético,
preparación de solución.*



Figura 2. 20

Etiquetado de probetas.



Preparación de electrodos

Para garantizar lecturas precisas, se aplicó un procedimiento de limpieza a los electrodos de referencia Cu/CuSO₄, prestando especial atención a la barra de cobre interna. El proceso se desarrolló del modo siguiente:

- Se desmontaron todas las piezas del electrodo y se desechó la solución saturada de CuSO₄ utilizada como relleno.
- Se lavó el cuerpo del electrodo con agua destilada para retirar residuos.
- El tapón poroso se sumergió en agua destilada; se agitó durante 10 min, se reemplazó el agua y se repitió el enjuague para eliminar contaminantes solubles.
- Con una esponja abrasiva de fibra se lijó suavemente la barra de cobre hasta eliminar cualquier capa contaminada u óxido visible.
- La barra de cobre se enjuagó con abundante agua destilada (Figura 2.21).

- Se ensambló nuevamente el electrodo, verificando el ajuste correcto de todas las piezas.
- Se llenó el cuerpo del electrodo con agua destilada y, seguidamente, se añadieron cristales de sulfato de cobre hasta saturar la solución (Figura 2.22).

Figura 2. 21

Barra de cobre de los electrodos.



Figura 2. 22

Procedimiento de llenado de los electrodos.



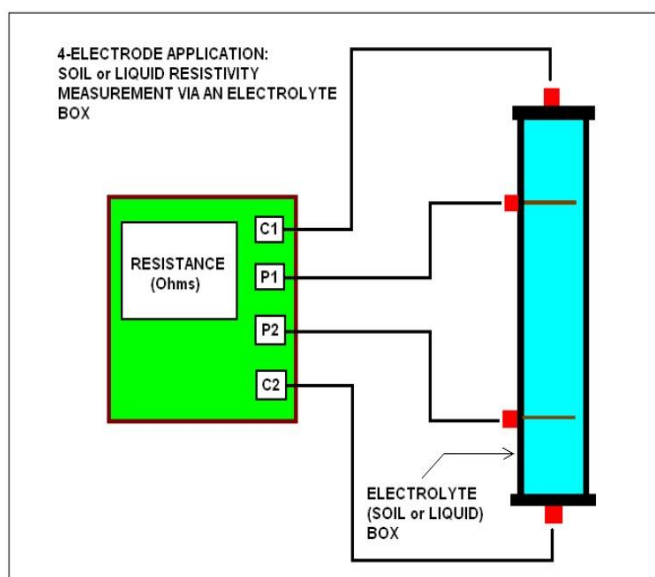
2.3.8 Medición de resistividad y pH de la solución

Medición de resistividad

Para determinar la resistividad del electrolito se utilizó un medidor MILLER-400A acoplado a una caja de electrolitos con cuatro electrodos integrados. La medición se realizó siguiendo el esquema del manual (corriente–potencial–potencial–corriente) y empleando cuatro cables de prueba conectados a los bornes correspondientes (Figura 2.23).

Figura 2. 23

Esquema conexión de los cables entre el equipo y el soilbox. [13]



La geometría interna de la caja asegura que la relación $\frac{A}{L}$, donde el área efectiva de los electrodos de corriente (A) dividida por la distancia entre los electrodos de potencial (L), sea exactamente 1 cm. Bajo esta condición, la resistividad (ρ) del líquido se obtiene directamente a partir de la lectura de resistencia (R) mostrada por el MILLER-400A, mediante la ecuación 2.1:

$$\rho = R \left(\frac{A}{L} \right) = R \times 1 (\Omega \times \text{cm}) \quad (2.1)$$

Para el procedimiento se llevó a cabo los siguientes pasos:

- **Preparación de la celda**

Se enjuagó la caja de electrolitos con agua destilada para eliminar cualquier residuo presente, y a continuación se llenó con el electrolito recién preparado hasta alcanzar la línea de nivel, asegurándose de que los cuatro electrodos quedaran completamente sumergidos y libres de burbujas adheridas, con el fin de garantizar una medición estable y precisa.

○ Conexión del instrumento

Se procedió a conectar los cuatro cables de prueba al equipo MILLER-400A (Figura 2.24) siguiendo el orden indicado: corriente–potencial–potencial–corriente. Posteriormente, se verificó la continuidad eléctrica del sistema y se aseguró que todos los bornes estuvieran firmemente ajustados, garantizando una conexión estable y segura durante el ensayo.

○ Medición

Se encendió el equipo MILLER-400A y se seleccionó el rango de resistencia adecuado según las condiciones del ensayo. Tras un periodo de estabilización de aproximadamente 30 segundos, se registró el valor de resistencia R (Ω) indicado en la pantalla del equipo (Figura 2.25).

○ Cálculo

Tomar R como la resistividad ρ en ($\Omega \times \text{cm}$), dado que $\frac{A}{L} = 1 \text{ cm}$

○ Limpieza posterior

Vaciar el electrolito, enjuagar la caja con agua destilada y secar los electrodos con aire comprimido limpio para evitar corrosión.

Figura 2. 24

Equipo MILLER-400A.



Figura 2. 25

Medición de resistividad.



Medición de pH

○ Calibrar el pH-metro

Se encendió el equipo y se procedió a su calibración utilizando dos soluciones tampón frescas, correspondientes a pH 7,0 y pH 4,0 (o 10,0, según el rango requerido). Entre cada etapa de calibración, el electrodo fue enjuagado cuidadosamente con agua destilada y agitado suavemente para eliminar el exceso de líquido y evitar la contaminación cruzada

○ Preparar la muestra

Se vertió un volumen adecuado de la solución a analizar en un vaso limpio, utilizando entre 200 y 250 ml, cantidad suficiente para realizar la medición con precisión. Durante este proceso, se procuró evitar la formación de burbujas o la presencia de sólidos en suspensión que pudieran interferir con la lectura del equipo.

○ Medir el pH

El electrodo fue enjuagado nuevamente con agua destilada y colocado dentro de la muestra. A continuación, se agitó suavemente el electrodo o la solución durante algunos segundos con el fin de homogeneizar el medio. Finalmente, se esperó a que el valor se estabilizara y se registró el pH indicado por el equipo.

○ Limpieza y almacenamiento

Al finalizar la medición, se enjuagó el electrodo con agua destilada para eliminar cualquier residuo de la muestra, y posteriormente se almacenó en la solución de mantenimiento recomendada por el fabricante, o en su defecto, en una solución tampón de pH 4,0, con el fin de preservar la integridad de la membrana.

2.4 Fase IV - Diseño del sistema de evaluación catódica.

En esta última fase se llevó a cabo el diseño e implementación del sistema experimental destinado a evaluar el desprendimiento catódico en recubrimientos aplicados a tuberías enterradas.

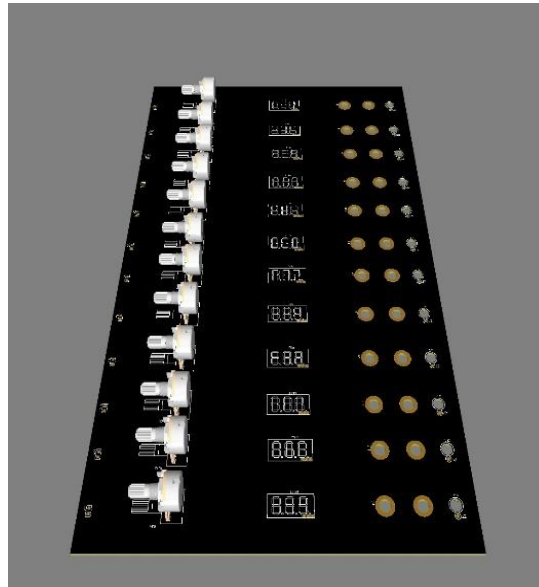
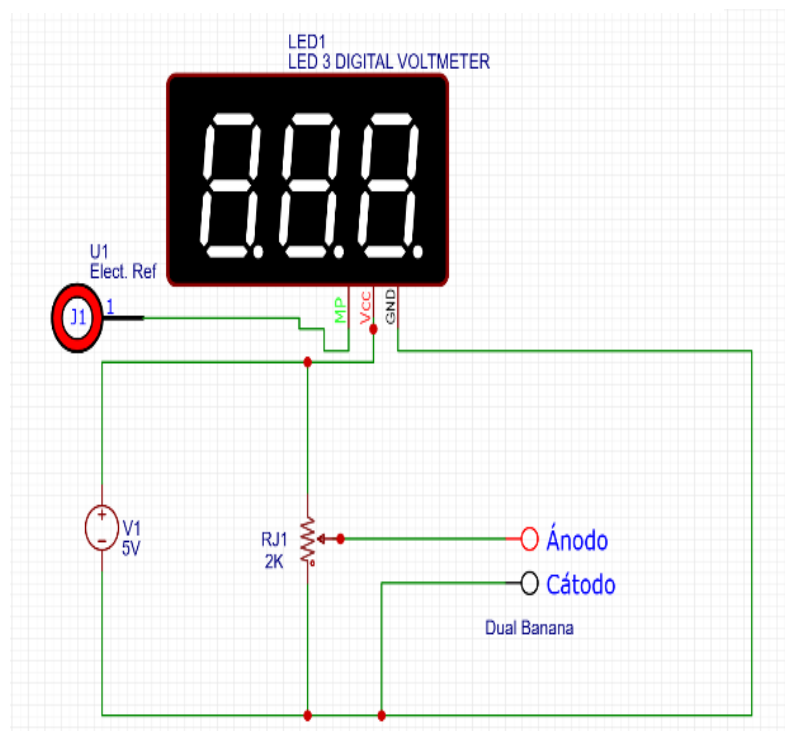
Se elaboraron las celdas de ensayo según los parámetros definidos previamente y se configuraron los elementos eléctricos necesarios. Finalmente, se realizó el monitoreo de los valores de voltaje con el fin de asegurar la estabilidad del sistema durante el periodo de exposición, permitiendo así obtener datos confiables para el análisis de desempeño de los recubrimientos.

2.4.1 Desarrollo del sistema experimental.

Con el propósito de evaluar el desempeño de los recubrimientos frente al desprendimiento catódico, se diseñó y construyó un sistema experimental que simula condiciones controladas de protección catódica. Este sistema permitió aplicar voltajes específicos de forma individual a cada una de las probetas, replicando el entorno electroquímico al que se exponen las tuberías enterradas en campo.

2.4.2 Elaboración de las celdas de ensayo.

De acuerdo con lo establecido en la norma ASTM G8, el ensayo de desprendimiento catódico tuvo una duración mínima de 720 horas (30 días), durante las cuales las probetas permanecieron conectadas bajo un potencial constante de $-1,5\text{ V}$, medido con referencia a un electrodo de Cu/CuSO_4 . Para cumplir con estas condiciones, se diseñó y construyó un tablero de control (Figura 2.26), como el que se muestra en la imagen, específicamente configurado para mantener el sistema en funcionamiento continuo. Dicho tablero estuvo compuesto por una fuente de alimentación (cargador) que suministraba 5 V , un potenciómetro instalado en serie como resistencia variable para regular el voltaje aplicado, un voltímetro digital que facilitó la medición directa del potencial, y tres conectores de salida que aseguraron una conexión estable, evitando falsos contactos durante el ensayo. En el diagrama que se presenta a continuación se detallan las conexiones eléctricas del circuito utilizado (Figura 2.27).

Figura 2. 26*Modelado de tablero de control.***Figura2.27***Diagrama Eléctrico elaborado con EasyEDA.*

A cada probeta se le colocó un recipiente plástico transparente de 17 cm de altura, con el objetivo de realizar el ensayo de forma individual. Para ello, se cortó la base de cada recipiente y se lo fijó firmemente a la superficie recubierta de la probeta mediante la aplicación de silicón sellante, asegurando una unión estanca que evitara cualquier tipo de fuga durante el periodo de exposición establecido para la prueba, como se muestra en la Figura 2.28.

Figura 2. 28

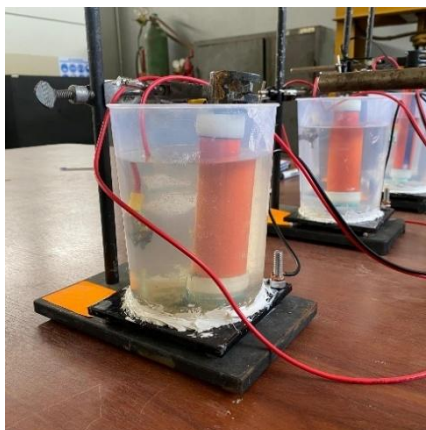
Probetas y recipientes para ensayo.



Para el montaje del sistema experimental, se utilizaron soportes universales, pinzas y nueces con el fin de conformar estaciones independientes para cada una de las probetas. Cada estación estuvo compuesta por un soporte universal, una pinza de sujeción, una nuez, un electrodo de referencia, un dispersor de corriente (perno de acero inoxidable) y la probeta recubierta a la cual se le realizó un defecto intencional donde el metal quedó expuesto para que, bajo el potencial impuesto, se concentre la reacción catódica y se genere y propague el desprendimiento del recubrimiento de forma reproducible, permitiendo medir el área desprendida y comparar el desempeño entre probetas, como se muestra en la Figura 2.29).

Figura 2. 29

Celda de ensayo.

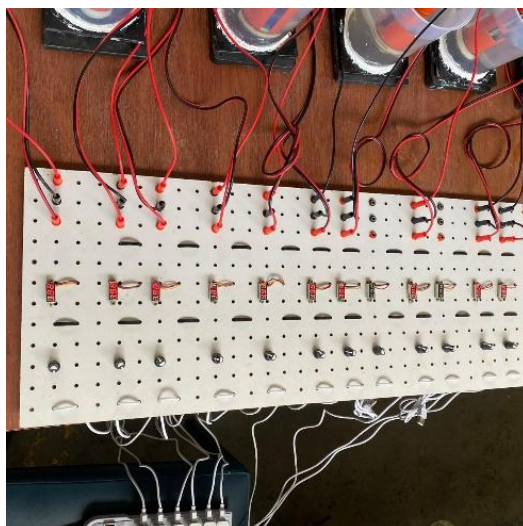


2.4.3 Monitoreos de los valores de voltaje

Utilizando un multímetro Fluke modelo 175 se documentaron las condiciones iniciales, diarias y finales de cada celda, así como cualquier anomalía durante el ensayo. Para las mediciones se colocó el terminal positivo en la conexión negativa de la probeta y el terminal negativo en el electrodo de referencia, de modo que el multímetro registre el signo negativo que confirma que la probeta está a un potencial más bajo (más negativo) que el electrodo Cu/CuSO (Figura 2.30)⁴.

Figura 2. 30

Circuito para monitoreo de potenciales.



Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Resultados de laboratorio

3.1.1 Medición de rugosidad superficial.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la medición de rugosidad superficial para las probetas recubiertas con los dos sistemas de pintura evaluados, como se muestra en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2; Figura 3.1 y Figura 3.2. El ensayo se realizó siguiendo los procedimientos establecidos, registrando los valores de rugosidad en milésimas de pulgada (mils) para cada probeta como se detalla en el [Apéndice A-D](#).

Tabla 3. 1

RE1 valores promedios de rugosidad por probeta.

Probeta	Rugosidad (mils)
<i>SP2 RE1-001</i>	1.07
<i>SP2 RE1-002</i>	2.68
<i>SP2 RE1-003</i>	1.48
<i>SP10 RE1-001</i>	3.6
<i>SP10 RE1-002</i>	3.12
<i>SP10 RE1-003</i>	3.41

Figura 3. 1

Rugosidad Superficial RE1

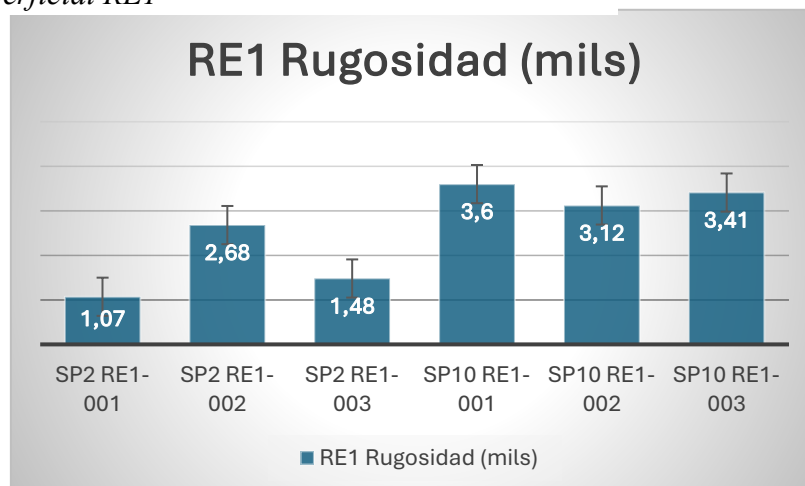


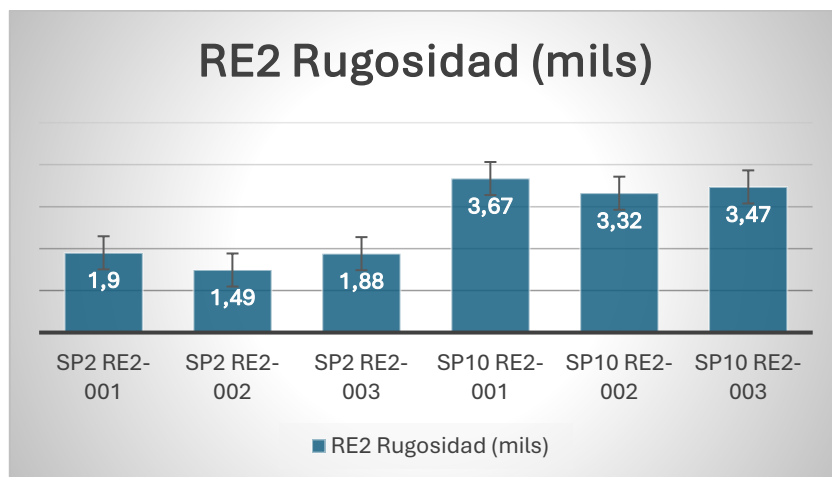
Tabla 3. 2

RE2 valores promedios de rugosidad por probeta.

Probeta	Rugosidad (mils)
<i>SP2 RE2-001</i>	1.9
<i>SP2 RE2-002</i>	1.49
<i>SP2 RE2-003</i>	1.88
<i>SP10 RE2-001</i>	3.67
<i>SP10 RE2-002</i>	3.32
<i>SP10 RE2-003</i>	3.47

Figura 3. 2

Rugosidad Superficial RE2



Los valores de rugosidad promedio obtenidos para las superficies preparadas por SP2 y SP10 fueron consistentes con los rangos de control definidos en este estudio. En limpieza manual, según SSPC-SP 2, se estableció como criterio de aceptación un perfil de anclaje entre 1 y 2 mils, y las lecturas se concentraron dentro de ese intervalo. Para la limpieza por chorro abrasivo cercana a metal blanco, conforme a SSPC-SP 10 el perfil objetivo fue de 2 a 3 mils y los resultados se mantuvieron en ese rango. Esta concordancia con los criterios normativos de la SSPC confirmó el cumplimiento de las condiciones de preparación de superficie y sustenta la validez y fiabilidad de los resultados que se buscan obtener.

3.1.2 Medición de espesor de capa húmeda.

En este apartado se presentan los resultados de espesor de capa húmeda para las probetas recubiertas con ambos sistemas de pintura. La información comparativa se muestra en las Tablas 3.3 y 3.4. El control se efectuó conforme a los procedimientos establecidos, realizando nueve lecturas por probeta inmediatamente después de la aplicación y registrando los valores en micrómetros (μm); el detalle completo se consigna en el [Apéndice E-H](#).

Tabla 3. 3

RE1 Promedio de espesor de capa húmeda.

Probeta	Espesor C.H (micras)
<i>SP2 RE1-001</i>	704.44
<i>SP2 RE1-002</i>	695.67
<i>SP2 RE1-003</i>	697.44
<i>SP10 RE1-001</i>	696.33
<i>SP10 RE1-002</i>	695.44
<i>SP10 RE1-003</i>	699.44

Tabla 3. 4

RE2 Espesor de Capa Húmeda.

Probeta	Espesor C.H (micras)
<i>SP2 RE2-001</i>	700
<i>SP2 RE2-002</i>	703
<i>SP2 RE2-003</i>	700.67
<i>SP10 RE2-001</i>	695.78
<i>SP10 RE2-002</i>	707.67
<i>SP10 RE2-003</i>	703

Las mediciones de capa húmeda confirmaron que las aplicaciones realizadas conducirían al espesor de capa seca especificado para este estudio.

3.1.3 Medición de espesor capa seca.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la medición del espesor de capa seca para las probetas recubiertas con los dos sistemas de pintura evaluados, tal como se muestra en la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6 con sus respectivos gráficos de barra con barra de error Figura 3.3 y Figura 3.4. La verificación se efectuó conforme a SSPC-PA 2, registrando el espesor en micrómetros (μm) para cada probeta, con el detalle completo de lecturas y promedios consignado en el [Apéndice I-L](#).

Tabla 3. 5

RE1 Espesor de Capa Seca.

Probeta	Espesor C.S (micras)
<i>SP2 RE1-001</i>	612.87
<i>SP2 RE1-002</i>	605.23
<i>SP2 RE1-003</i>	606.78
<i>SP10 RE1-001</i>	605.81
<i>SP10 RE1-002</i>	605.04
<i>SP10 RE1-003</i>	608.52

Figura 3. 3

Espesor de capa seca RE1 / Barra de error.

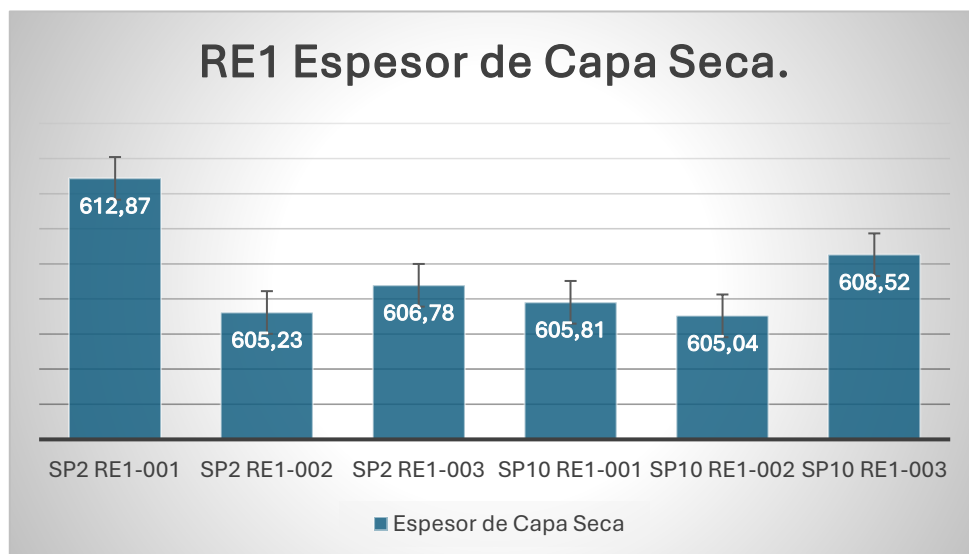
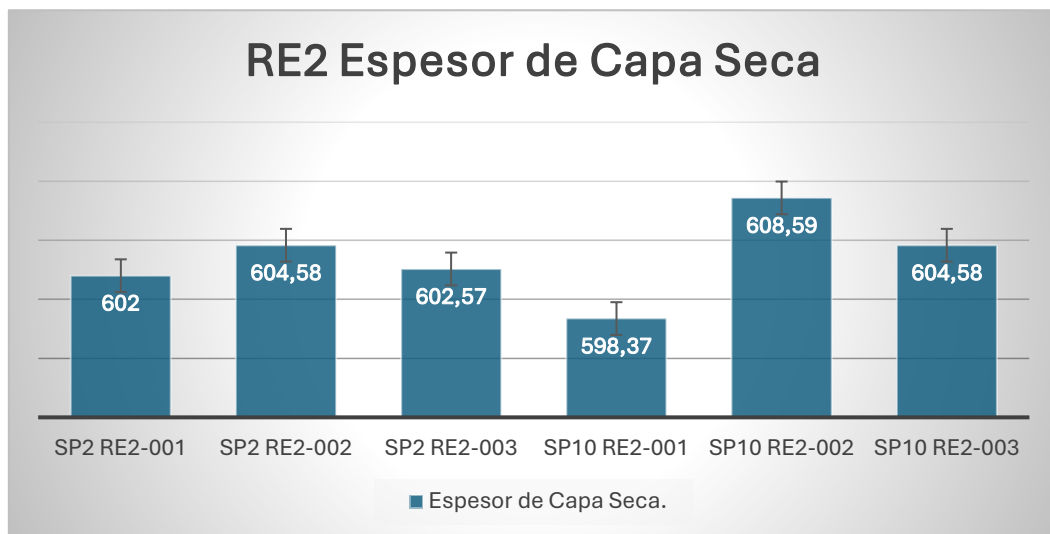


Tabla 3. 6*RE2 Espesor de Capa Seca.*

Probetas	Espesor C.S (micras)
<i>SP2 RE2-001</i>	602
<i>SP2 RE2-002</i>	604.58
<i>SP2 RE2-003</i>	602.57
<i>SP10 RE2-001</i>	598.37
<i>SP10 RE2-002</i>	608.59
<i>SP10 RE2-003</i>	604.58

Figura 3. 4

Espesor de capa seca RE2 / Barra de error.

**3.1.4 Prueba de discontinuidades.**

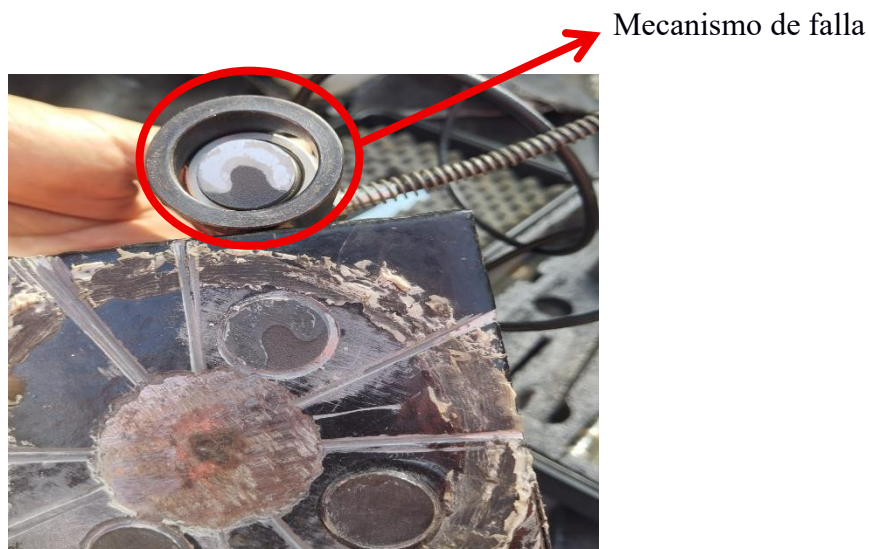
Tras la realización de las pruebas correspondientes en cada una de las probetas, utilizando el equipo específico para la detección de discontinuidades, se obtuvieron resultados satisfactorios, ya que no se identificaron discontinuidades en la superficie del recubrimiento. Esto indica que el espesor aplicado cumplió con los valores requeridos y que el nivel de aislamiento proporcionado por el revestimiento fue adecuado para las condiciones del ensayo.

3.1.5 Ensayo de adherencia por tracción.

El ensayo de adherencia por tracción sobre sustratos preparados con limpieza abrasiva SP10 arrojó un promedio de 8,95 MPa en ambos recubrimientos, ubicándose dentro del rango indicado por los fabricantes entre 8 y 10 MPa, por lo que el desempeño se consideró satisfactorio. El modo de falla fue predominantemente cohesivo dentro del recubrimiento, evidenciado por remanentes de película tanto en el sustrato como en el dolly y por una huella de ruptura con textura propia del film; esta respuesta se atribuye a un anclaje mecánico eficaz derivado del perfil de rugosidad alcanzado con SP10 y a la limpieza que favoreció el anclaje químico sobre el acero, de modo que durante la tracción la distribución de tensiones superó la resistencia interna de la matriz del recubrimiento antes que la adhesión a la superficie. Como se aprecia en la Figura 3.5, la morfología de la superficie fracturada confirma la naturaleza cohesiva de la falla y respalda los valores medidos.

Figura 3. 5

Mecanismo de falla a probeta de ensayo de adherencia por tracción.



3.1.6 *Curvas potenciostáticas.*

Referencia sin desprendimiento catódico

El testigo mostró un comportamiento electroquímico bastante particular, con un potencial de corrosión de -0.9273 V en comparación con Ag/AgCl, que es notablemente más negativo que el de las otras muestras. Esto podría sugerir, a primera vista, una mayor vulnerabilidad a la corrosión. Sin embargo, es importante considerar este valor junto con la densidad de corriente de corrosión, que fue de 7.90×10^{-7} A/cm², la más baja del grupo. Este contraste resalta que, a pesar de tener un E_{corr} más negativo, el material presenta una cinética de corrosión muy limitada, posiblemente debido a fenómenos de pasivación o a la formación de productos protectores en su superficie. Además, las pendientes de Tafel ($\beta_a = 0.1250$ V/década y $\beta_c = -0.1378$ V/década) indican una respuesta más estable en las reacciones anódicas y catódicas, lo que confirma que el testigo tiene la mayor resistencia a la corrosión bajo las condiciones de prueba. Sin embargo, se estima que esta muestra se ha sometido a algún tipo de procedimiento que haya sesgado el valor de su potencial debido a que esta más negativo, es decir, ha sido polarizado o intervenido antes del muestreo (Figura 3.6 y Figura 3.7).

Figura 3. 6

Curva de polarización Tafel del testigo.

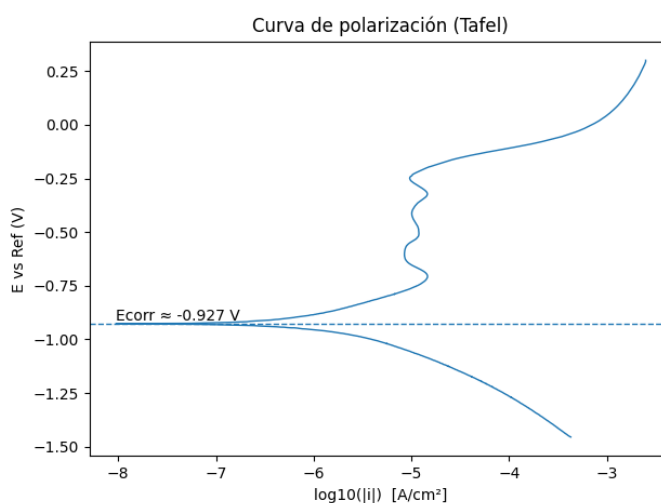
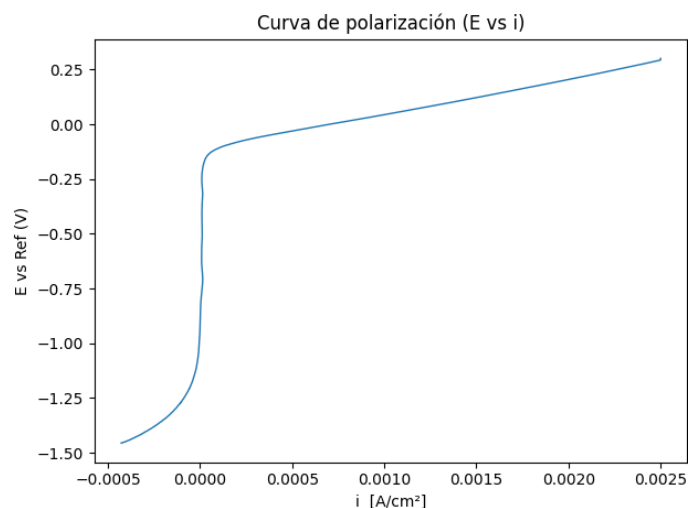
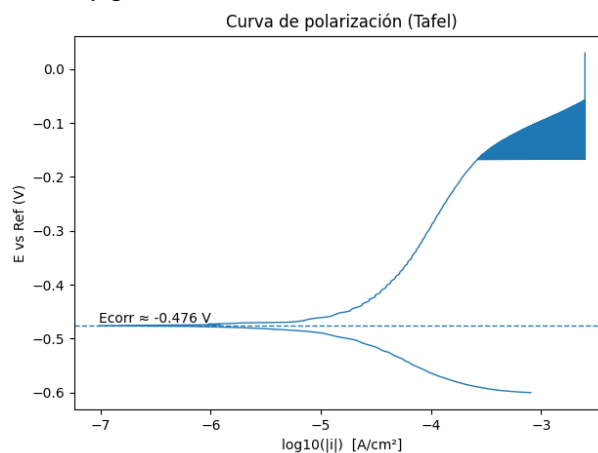


Figura 3. 7*Curva de polarización inicial.****Recubrimiento RE1***

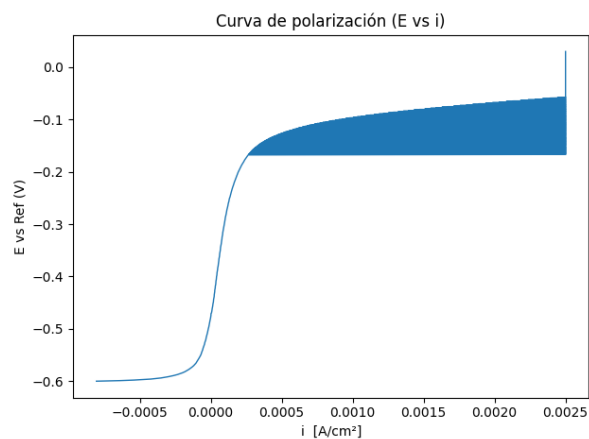
La Muestra con el Recubrimiento 1 mostró un potencial de corrosión de -0.4644 V en comparación con Ag/AgCl y una densidad de corriente de 3.05×10^{-5} A/cm². Este resultado indica una tendencia moderada hacia la corrosión, junto con una velocidad de deterioro relativamente alta. Las pendientes de Tafel ($\beta_a = 0.2423$ V/década y $\beta_c = -0.0361$ V/década) revelan una cinética anódica notable y un proceso catódico más sensible, lo que sugiere que el mecanismo de corrosión está dominado por la reacción de oxidación metálica, con una resistencia limitada a los procesos de reducción. La región sombreada registra ya una sobrecarga en la muestra, es decir el rango en el cual ya está sobre evaluada durante el ensayo (Figura 3.8 y Figura 3.9).

Figura 3. 8

Curva de polarización del RE1 y potencia de corrosión.

**Figura 3. 9**

Curva de polarización del RE1.



Recubrimiento RE2

Figura 3. 10

Curva de polarización del RE2 y potencia de corrosión.

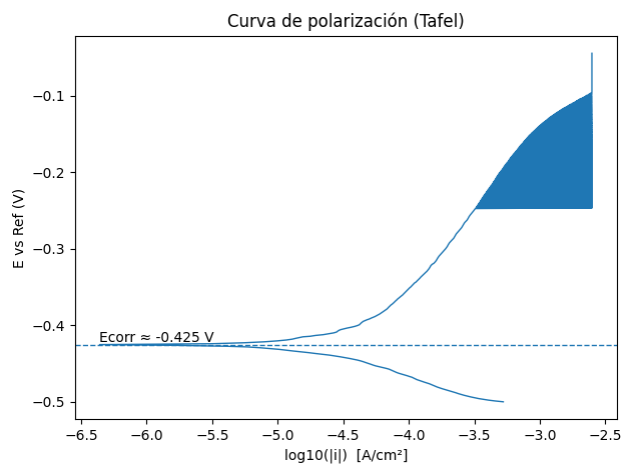
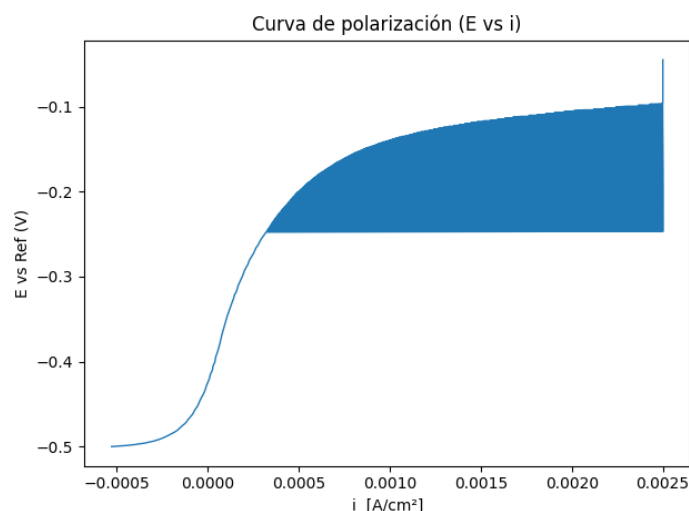


Figura 3. 11

Curva de polarización del RE2.



La Muestra con el Recubrimiento 2 mostró un E_{corr} ligeramente más favorable (-0.4255 V) en comparación con la Muestra 1, mientras que su i_{corr} se mantuvo prácticamente igual (3.04×10^{-5} A/cm²). Aunque el cambio en el potencial sugiere una leve mejora en la resistencia termodinámica, la similitud en las corrientes de corrosión indica que su comportamiento general frente al ataque corrosivo es bastante comparable. Las pendientes de Tafel ($\beta_a = 0.1871$ V/década y $\beta_c = -0.0439$ V/década) revelan un proceso anódico menos marcado y un catódico más claro que en la Muestra 1, lo que refleja una interacción electroquímica más equilibrada, aunque esto no se traduce en una disminución significativa de la velocidad de corrosión (Figura 3.10 y Figura 3.11). Se muestra una tabla comparativa de las muestras con respecto al testigo (Tabla 3.7).

Tabla 3. 7

Comparación de las muestras con respecto al testigo.

Parámetro / Muestra	Muestra RE1	Muestra RE2	Testigo	Análisis comparativo
E_{corr} (V vs Ag/AgCl)	-0.4676	-0.4255	-0.9273	Muestras RE1 y RE2 muestran potenciales menos negativos, lo que

				sugiere mayor nobleza; sin embargo, el Testigo, pese a su E_{corr} más negativo, no reflejó mayor corrosión real.
i_{corr} (A/cm²)	3.05×10^{-5}	3.04×10^{-5}	7.90×10^{-7}	El Testigo presenta la menor velocidad de corrosión, confirmando mejor resistencia. Las muestras RE1 y RE2 exhiben corrientes similares y significativamente más altas.
Pendiente anódica β_a (V/década)	0.2423	0.1871	0.1250	La Muestra RE1 evidencia un proceso de oxidación más acelerado. El Testigo presenta la menor pendiente, indicando una oxidación más controlada.
Pendiente catódica β_c (V/década)	-0.0361	-0.0439	-0.1378	El Testigo presenta la pendiente más pronunciada, lo que refleja un proceso catódico más estabilizado. Las muestras RE1 y RE2 muestran reacciones catódicas más sensibles.
Comportamiento global	Tendencia moderada a corroerse,	Ligera mejora en E_{corr} , pero con velocidad	Mejor desempeño global: baja	El Testigo presenta la mayor resistencia a la corrosión, mientras que

con oxidación dominante y limitada resistencia.	de corrosión similar a Muestra RE1.	icorr a Ecorr negativo, indicando posible pasivación.	pese a más muestras activa.	Muestras RE1 y RE2 muestran vulnerabilidad
---	---	--	--------------------------------------	---

Al comparar las Muestras como se observa en la tabla 3.7, se puede notar que ambas tienen densidades de corriente de corrosión muy parecidas (aproximadamente 3.0×10^{-5} A/cm²), lo que indica una velocidad de corrosión alta y casi idéntica. La pequeña diferencia en el potencial de corrosión, donde la Muestra 2 es más noble (-0.4255 V frente a -0.4644 V), sugiere que tiene una resistencia a la corrosión ligeramente mejor, aunque esto no afecta de manera significativa la protección real contra el ataque corrosivo. Además, este comportamiento podría haber sido influenciado por el hecho de que ambas muestras estuvieron sumergidas en sales durante un mes, lo que facilitó la acumulación de cloruros en la superficie metálica, la posible ruptura de capas protectoras iniciales y el aumento de los procesos corrosivos activos.

3.1.7 Medición de resistividad y pH de la solución

Resistividad

La resistividad fue evaluada al inicio y al final del ensayo con el fin de determinar la estabilidad del medio iónico durante la exposición. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3.8, donde la mínima variación registrada indicó que la solución mantuvo una conductividad prácticamente constante, lo que significa que la concentración iónica y la capacidad del medio para transportar corriente eléctrica no se alteraron de manera significativa durante el ensayo. Este comportamiento aseguró que las condiciones de exposición fueran electroquímicamente estables y reproducibles, garantizando que las variaciones observadas en las probetas estuvieran asociadas al desempeño de los recubrimientos y no a fluctuaciones en el medio electrolítico.

Tabla 3. 8*Resistividad de la solución.*

Medición	Resistividad Inicial (ohm*cm)	Resistividad Final (ohm*cm)
1	44	45
2	46	48
3	54	55
VALOR PROMEDIO	48	49

pH

Durante el ensayo se controló el pH de la solución electrolítica con el fin de verificar la estabilidad del medio de exposición. Los resultados mostraron que el pH inicial se mantuvo constante hasta el final, como se muestra en la Tabla 3.9, lo cual evidenció que, al finalizar el periodo de prueba, el pH del electrolito no mostró variaciones apreciables respecto del valor inicial. Este resultado se explicó porque, mientras en el defecto catódico se generaron iones hidróxido y en el ánodo auxiliar se formaron iones hidrógeno, la mezcla en el volumen total condujo a una neutralización ácido-base que mantuvo prácticamente inalterado el balance global. Además, la solución de ensayo preparada con cloruro de sodio, sulfato de sodio y carbonato de sodio al 1% en peso proporcionó una elevada capacidad amortiguadora por el sistema carbonato bicarbonato, lo que resistió las fluctuaciones de pH y favoreció el consumo del exceso de hidróxido mediante la captación de dióxido de carbono del aire. Por otra parte, el ánodo de acero inoxidable operó principalmente en régimen de evolución de oxígeno y presentó disolución metálica despreciable, de modo que no se incorporaron especies en cantidad suficiente para desplazar el pH del volumen. En consecuencia, la combinación de neutralización simultánea, efecto amortiguador y comportamiento anódico estable explicó la estabilidad del pH, aun cuando en la interfase del defecto se alcanzó un pH local elevado que impulsó el desprendimiento catódico.

Tabla 3. 9*Mediciones del pH de la solución.*

pH Inicial	pH Final
11	11

3.2 Resultados del diseño

3.2.1 Resultados de la prueba de desprendimiento catódico

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de desprendimiento catódico para las probetas preparadas con los grados de limpieza superficial SP2 y SP10. En la Tabla 3.10 se muestran los valores de diámetro y área desprendida para las probetas SP2, mientras que la Figura 3.12 representa gráficamente la distribución del área desprendida en este grupo de muestras. Asimismo, la Tabla 3.11 recoge el porcentaje de desprendimiento correspondiente a cada probeta SP2, información que se resume de manera visual en la Figura 3.13.

Tabla 3. 10*Resultados de diámetro y área desprendida de SP2.*

SP2				
Probetas	Diámetro de Desprendimiento (cm)	Área Desprendida (cm ²)	Descripción	Evidencia Fotográfica
SP2 RE1-001	4,45	15,55	El levantamiento en el sector de estudio resultó de dificultad moderada a baja; la pintura se separó con facilidad en forma de	

			escamas y no se observaron burbujas en la superficie	
SP2 RE1-002	4,0	12,57	En esta área el levantamiento fue de baja dificultad. La pintura se retiró con rapidez desde el centro del defecto hasta donde la adherencia sana lo impidió, predominando un patrón de desprendimiento en escamas.	
SP2 RE1-003	3,3	8,55	El desprendimiento inducido en esta zona no presentó dificultad; la pintura se levantó muy fácilmente desde el centro del holiday hasta el límite definido por la	

			película en buen estado, con un modo de falla en escamas.	
SP2 RE2-001	6,37	31,87	Se observó un desprendimiento inducido carente de dificultad; la película se removió con facilidad desde el centro del holiday hasta el límite impuesto por la pintura sana, con desprendimiento en escamas.	
SP2 RE2-002	6,65	34,73	No se registró dificultad durante el desprendimiento inducido; el recubrimiento se retiró con facilidad desde el centro del holiday hasta el borde	

			de la zona íntegra, con patrón de escamado.
			El ensayo registró dificultad media-baja; la capa se desprendió fácilmente desde el punto de iniciación en el holiday hasta el borde de la zona adherida, con modo de falla tipo escamado.
SP2 RE2-003	6,51	33,29	



Figura 3. 12

Diagrama de Área Desprendida de las Probetas SP2.

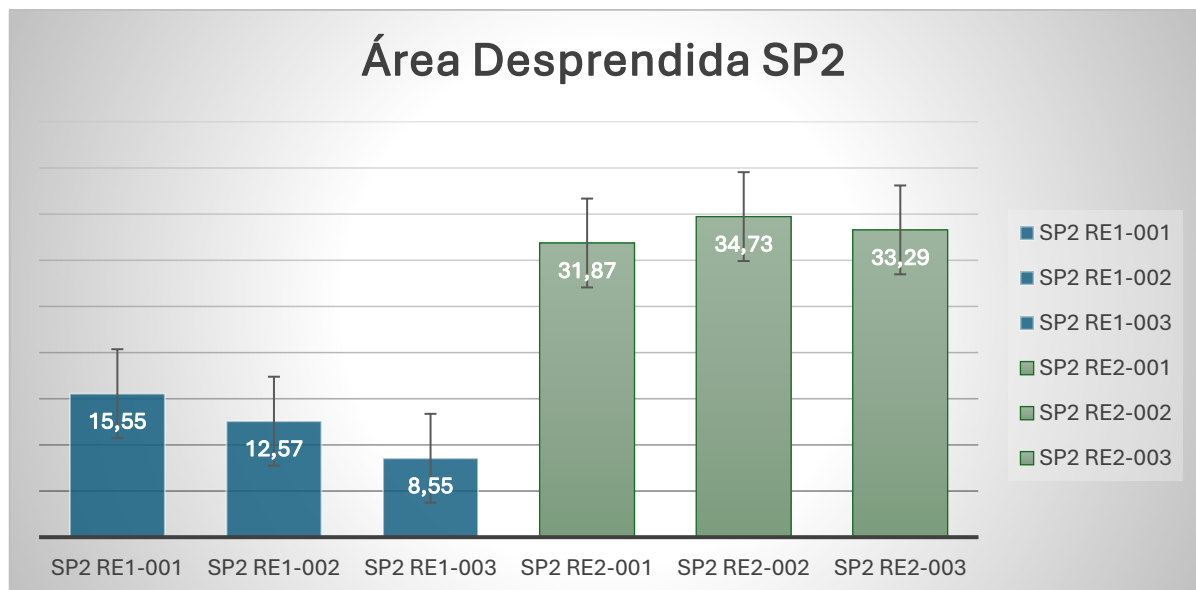
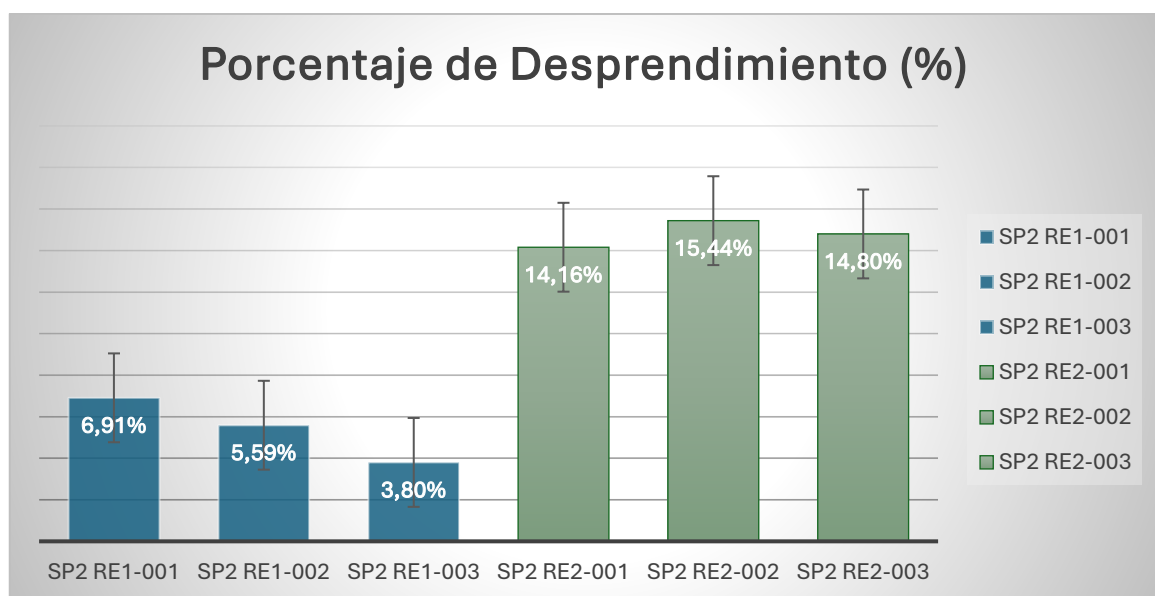


Tabla 3. 11*Porcentaje de Desprendimiento del SP2.*

SP2		
Probetas	Área Desprendida (cm ²)	Porcentaje de Desprendimiento (%)
<i>SP2 RE1-001</i>	15,55	6,91
<i>SP2 RE1-002</i>	12,57	5,59
<i>SP2 RE1-003</i>	8,55	3,80
<i>SP2 RE2-001</i>	31,87	14,16
<i>SP2 RE2-002</i>	34,73	15,44
<i>SP2 RE2-003</i>	33,29	14,80

Figura 3. 13*Diagrama de Porcentaje de Desprendimiento SP2.*

De manera análoga, en la Tabla 3.12 se presentan los resultados de diámetro y área desprendida para las probetas SP10, siendo ilustrados gráficamente en la Figura 3.14. Finalmente, la Tabla 3.13 detalla el porcentaje de desprendimiento obtenido en este grupo, lo cual se representa comparativamente en la Figura 3.15.

Tabla 3. 12

Resultados de diámetro y área desprendida de SP10.

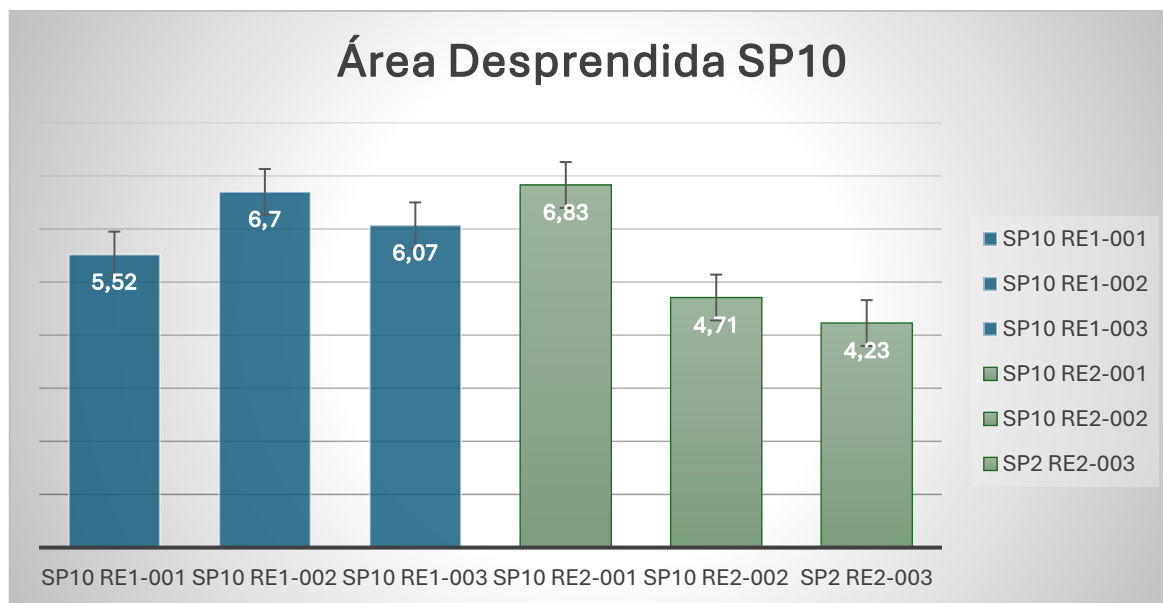
SP10				
Probetas	Diámetro de Desprendimiento (cm)	Área Desprendida (cm ²)	Descripción	Evidencia Fotográfica
SP10 RE1-001	2,65	5,52	El recubrimiento mostró fuerte adherencia al sustrato y se mantuvo íntegro, sin signos de degradación. La extracción fue compleja y en las áreas sin desprendimiento espontáneo únicamente se produjo residuo particulado fino.	

SP10 RE1-002	2,92	6,70	Se observó resistencia significativa al desprendimiento por la buena adhesión al sustrato, manteniendo la integridad de la película. La retirada fue complicada y en las zonas que no se desprendían solo se obtuvo un desmoronamiento en polvo fino	
SP10 RE1-003	2,78	6,07	Se constató elevada resistencia al levantamiento del epóxico debido a su buena adherencia; no se observaron daños visibles. La película pudo retirarse con gran esfuerzo y, donde no cedía, se desmenuzó en polvo.	
SP10 RE2-001	2,95	6,83	El sistema presentó adherencia superior y oposición marcada al desprendimiento, conservando su integridad. La	

			remoción resultó laboriosa y en las zonas más resistentes el recubrimiento se redujo a polvo.	
SP10 RE2-002	2,45	4,71	El ensayo evidenció un comportamiento de alta adherencia y mínima degradación del recubrimiento. El levantamiento fue difícil y, en las áreas más adheridas, la película se fragmentó como polvo.	
SP10 RE2-003	2,32	4,23	La capa epóxica permaneció firmemente adherida al sustrato, sin evidencia de deterioro superficial. El retiro exigió esfuerzo mecánico y en los sectores que no se levantaron se generó residuo en forma de polvo	

Figura 3. 14

Diagrama de Área Desprendida de las Probetas SP10.

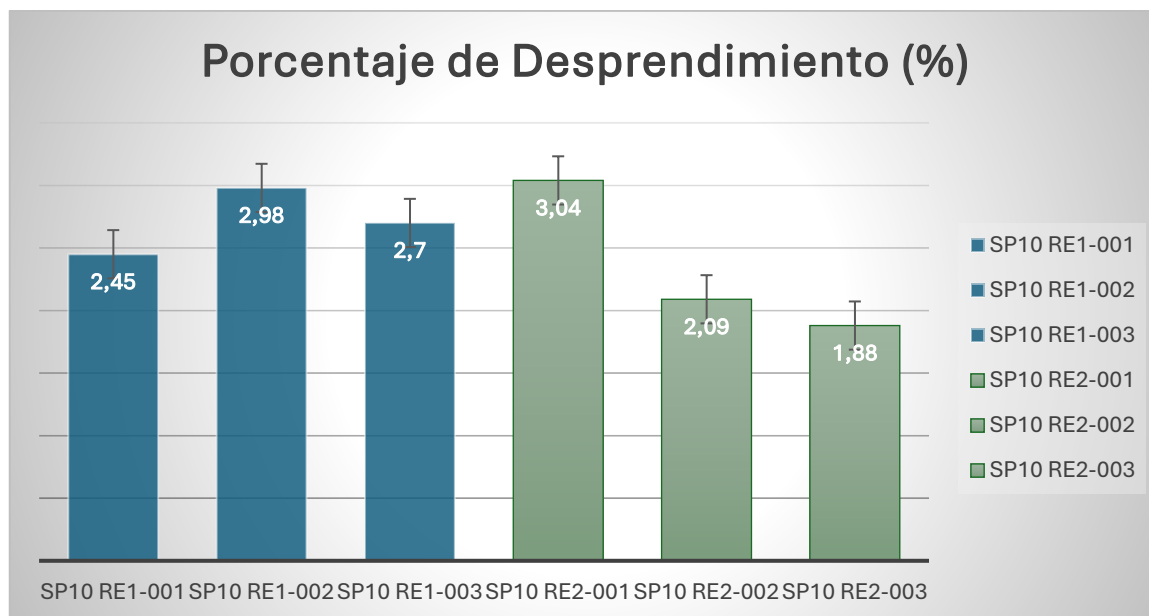
**Tabla 3. 13**

Porcentaje de Desprendimiento del SP10.

SP10		
Probetas	Área Desprendida (cm²)	Porcentaje de Desprendimiento (%)
<i>SP10 RE1-001</i>	5,52	2,45
<i>SP10 RE1-002</i>	6,70	2,98
<i>SP10 RE1-003</i>	6,07	2,70
<i>SP10 RE2-001</i>	6,83	3,04
<i>SP10 RE2-002</i>	4,71	2,09
<i>SP10 RE2-003</i>	4,23	1,88

Figura 3. 15

Diagrama de Porcentaje de Desprendimiento SP10.



Al comparar las Figuras 3.8 y 3.10 se observó que, con limpieza limitada tipo SP2, el recubrimiento RE1 presentó menores porcentajes de desprendimiento que RE2 (promedios de 5,43 % frente a 14,80 %), mientras que con limpieza exigente tipo SP10 ambos sistemas mostraron valores bajos y cercanos (2,71 % para RE1 y 2,34 % para RE2). Al contrastar estos resultados de SP10 con la información técnica de los fabricantes, se esperaba para RE1 un halo de desprendimiento muy reducido tras la exposición, y para RE2 una separación acotada en torno al defecto con buena adherencia en el resto del panel; en este estudio, los valores bajos obtenidos para ambos recubrimientos fueron compatibles con una afectación contenida en SP10, con una correspondencia más clara en RE2, mientras que en RE1, si bien el porcentaje fue bajo, la extensión observada resultó mayor a la sugerida por su referencia técnica bajo condiciones controladas. En conjunto, RE1 evidenció mayor tolerancia cuando la preparación superficial fue limitada (mejor desempeño en SP2), y RE2 respondió de manera sobresaliente cuando se garantizó la limpieza abrasiva de alta calidad (SP10), por lo que, considerando ambos escenarios, RE1 fue

más robusto frente a variaciones de preparación y RE2 resultó la opción más competitiva cuando se aseguró sistemáticamente la condición SP10.

3.2.2 Valores de potencial eléctrico

A continuación, se presentan los resultados de los registros de potencial eléctrico obtenidos en las probetas preparadas con los grados de limpieza superficial SP2 y SP10, durante las cinco semanas de ensayo. Para el grupo SP2, en la Tabla 3.14 se muestran los datos correspondientes a las semanas 1 y 2, mientras que en la Tabla 3.15 se detallan los resultados de las semanas 3 y 4, complementados finalmente con la Tabla 3.16, que reúne la información registrada en la semana 5. Estos resultados se representan de manera comparativa en la Figura 3.16, donde se aprecia la tendencia en la variación del potencial eléctrico a lo largo del tiempo. Por otra parte, los valores obtenidos para el grupo SP10 se presentan en la Tabla 3.17 para las semanas 1 y 2, en la Tabla 3.18 para las semanas 3 y 4, y en la Tabla 3.19 para la semana 5. La evolución de estos registros se muestra en la Figura 3.17, que permite visualizar la estabilidad y comportamiento del potencial eléctrico en este segundo grupo de probetas.

Tabla 3. 14*Datos de potencial eléctrico de SP2 / Semana 1 y 2*

SP 2									
SEMANA 1			SEMANA 2						
Probetas	14/07	15/07	16/07	17/07	18/07	21/07	22/07	23/07	24/07
<i>SP2 RE1-001</i>	-1,505	-1,503	-1,505	-1,506	-1,504	$\bar{-}$ 1,490	$\bar{-}$ 1,498	$\bar{-}$ 1,496	-1,501
<i>SP2 RE1-002</i>	-1,507	-1,506	-1,510	-1,506	-1,508	$\bar{-}$ 1,472	$\bar{-}$ 1,483	$\bar{-}$ 1,491	-1,496
<i>SP2 RE1-003</i>	-1,511	-1,508	-1,518	-1,515	-1,516	$\bar{-}$ 1,523	$\bar{-}$ 1,508	$\bar{-}$ 1,523	-1,515
<i>SP2 RE2-001</i>	-1,507	-1,506	-1,506	-1,508	-1,505	$\bar{-}$ 1,509	$\bar{-}$ 1,506	$\bar{-}$ 1,507	-1,508
<i>SP2 RE2-002</i>	-1,503	-1,500	-1,504	-1,503	-1,502	$\bar{-}$ 1,483	$\bar{-}$ 1,487	$\bar{-}$ 1,484	-1,489
<i>SP2 RE2-003</i>	-1,503	-1,503	-1,508	-1,503	-1,504	$\bar{-}$ 1,498	$\bar{-}$ 1,503	$\bar{-}$ 1,499	-1,501

Tabla 3. 15*Datos de potencial eléctrico de SP2 / Semana 3 y 4*

Probetas	SP2								
	SEMANA 3				SEMANA 4				
	28/07	29/07	30/07	31/07	01/08	04/08	05/08	06/08	07/08
<i>SP2 RE1-001</i>	-1,504	-1,502	-1,505	-1,507	-1,504	-1,503	-1,505	-1,505	-1,508
<i>SP2 RE1-002</i>	-1,506	-1,509	-1,511	-1,508	-1,509	-1,510	-1,512	-1,510	-1,509
<i>SP2 RE1-003</i>	-1,512	-1,509	-1,515	-1,513	-1,515	-1,514	-1,510	-1,520	-1,517
<i>SP2 RE2-001</i>	-1,503	-1,504	-1,507	-1,509	-1,508	-1,508	-1,509	-1,510	-1,508
<i>SP2 RE2-002</i>	-1,505	-1,502	-1,503	-1,504	-1,506	-1,506	-1,508	-1,509	-1,503
<i>SP2 RE2-003</i>	-1,504	-1,503	-1,508	-1,503	-1,504	-1,505	-1,507	-1,508	-1,503

Tabla 3. 16*Datos de potencial eléctrico de SP2 / Semana 5*

Probetas	SP2			
	12/08	13/08	14/08	15/08
<i>SP2 RE1-001</i>	-1,491	-1,498	-1,497	-1,502
<i>SP2 RE1-002</i>	-1,474	-1,485	-1,495	-1,498
<i>SP2 RE1-003</i>	-1,525	-1,510	-1,520	-1,516
<i>SP2 RE2-001</i>	-1,509	-1,508	-1,507	-1,509
<i>SP2 RE2-002</i>	-1,489	-1,487	-1,485	-1,490
<i>SP2 RE2-003</i>	-1,499	-1,503	-1,499	-1,501

Figura 3. 16

Variación del Potencial Eléctrico SP2.

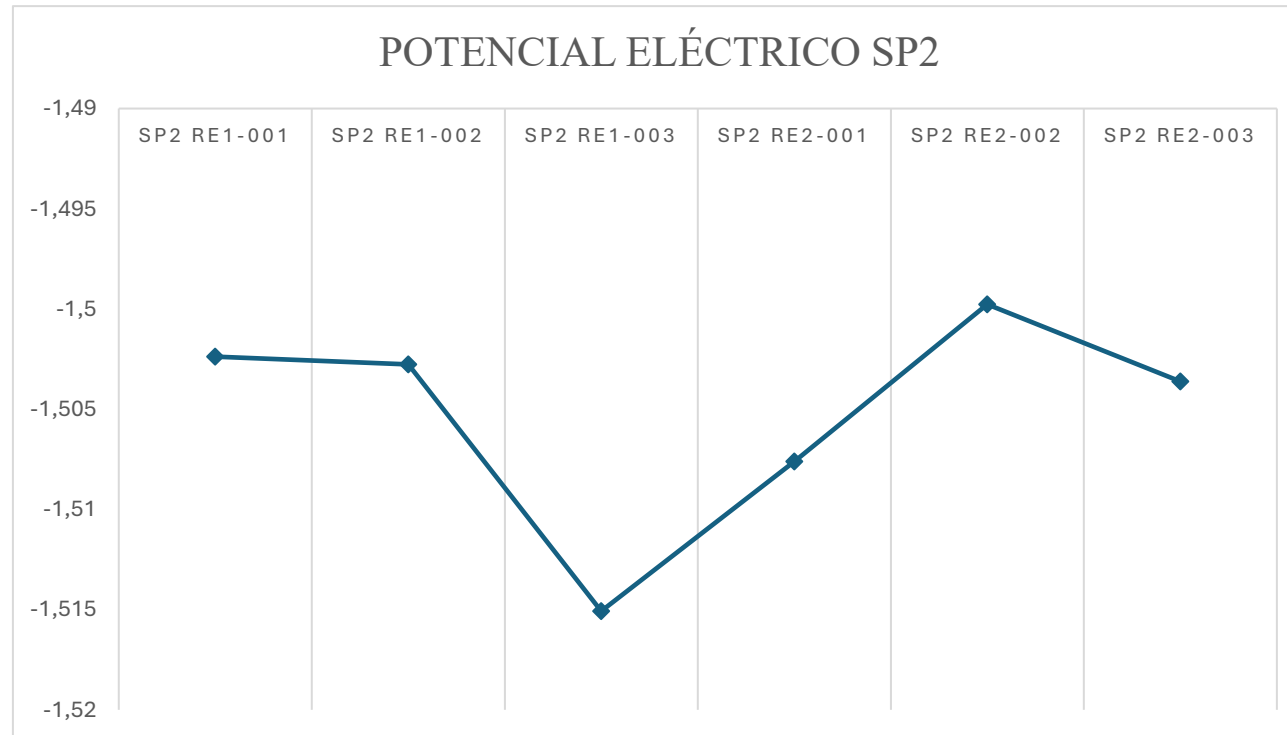


Tabla 3. 17*Datos de potencial eléctrico de SP10 / Semana 1 y 2*

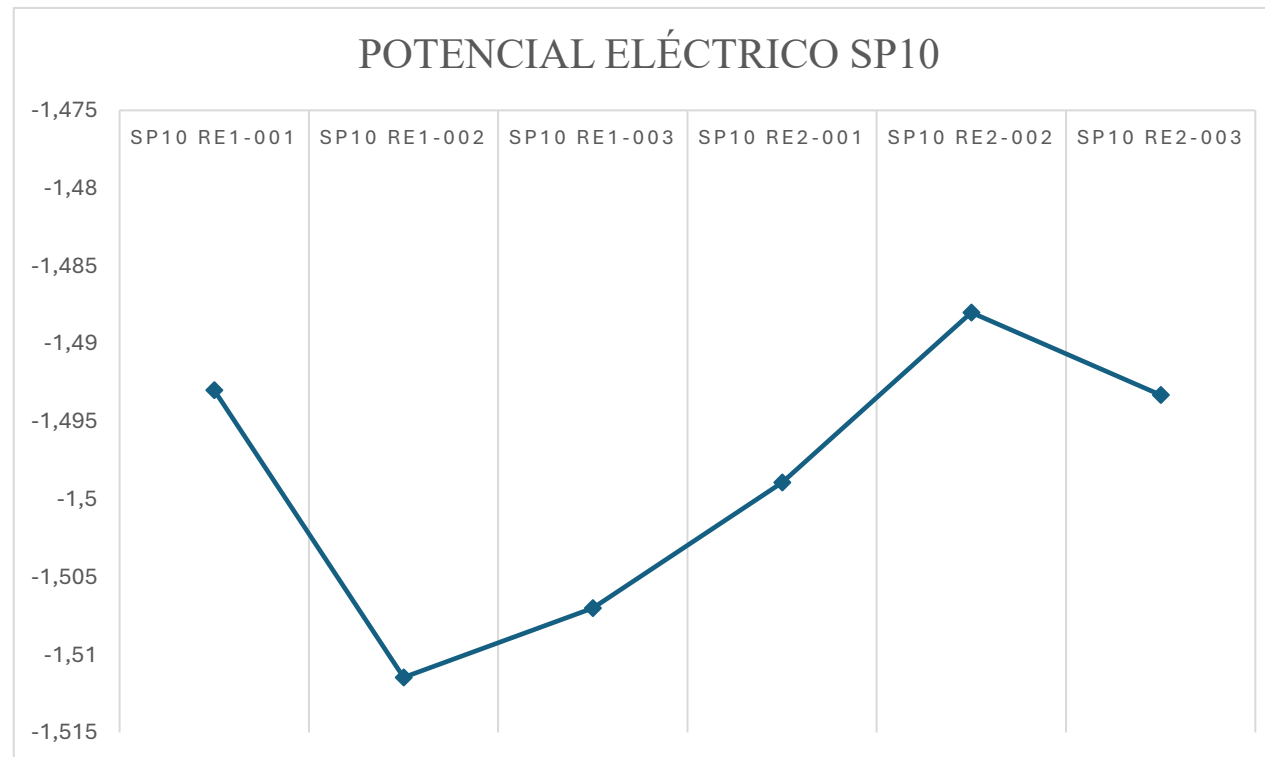
Probetas	SP10								
	SEMANA 1					SEMANA 2			
	14/07	15/07	16/07	17/07	18/07	21/07	22/07	23/07	24/07
<i>SP10 RE1-001</i>	-1,525	-1,505	-1,505	-1,510	-1,505	-1,489	-1,492	-1,495	-1,501
<i>SP10 RE1-002</i>	-1,507	-1,499	-1,512	-1,508	-1,515	-1,519	-1,509	-1,514	-1,508
<i>SP10 RE1-003</i>	-1,509	-1,507	-1,510	-1,506	-1,507	-1,510	-1,505	-1,507	-1,506
<i>SP10 RE2-001</i>	-1,508	-1,498	-1,504	-1,504	-1,509	-1,495	-1,498	-1,502	-1,497
<i>SP10 RE2-002</i>	-1,503	-1,501	-1,513	-1,503	-1,502	-1,484	-1,486	-1,492	-1,487
<i>SP10 RE2-003</i>	-1,506	-1,508	-1,511	-1,513	-1,510	-1,491	-1,496	-1,491	-1,494

Tabla 3. 18*Datos de potencial eléctrico de SP210 / Semana 3 y 4*

Probetas	SP10								
	SEMANA 3				SEMANA 4				
	28/07	29/07	30/07	31/07	01/08	04/08	05/08	06/08	07/08
<i>SP10 RE1-001</i>	-1,490	-1,491	-1,495	-1,502	-1,475	-1,487	-1,492	-1,494	-1,501
<i>SP10 RE1-002</i>	-1,517	-1,507	-1,516	-1,508	-1,509	-1,517	-1,507	-1,516	-1,508
<i>SP10 RE1-003</i>	-1,511	-1,503	-1,509	-1,508	-1,505	-1,511	-1,504	-1,508	-1,507
<i>SP10 RE2-001</i>	-1,494	-1,498	-1,504	-1,504	-1,498	-1,494	-1,496	-1,501	-1,505
<i>SP10 RE2-002</i>	-1,486	-1,487	-1,492	-1,488	-1,485	-1,487	-1,485	-1,496	-1,489
<i>SP10 RE2-003</i>	-1,490	-1,497	-1,492	-1,494	-1,495	-1,491	-1,494	-1,492	-1,496

Tabla 3. 19*Datos de potencial eléctrico de SP210/ Semana 5*

Probetas	SP10			
	12/08	13/08	14/08	15/08
<i>SP10 RE1-001</i>	-1,490	-1,492	-1,497	-1,503
<i>SP10 RE1-002</i>	-1,515	-1,508	-1,512	-1,509
<i>SP10 RE1-003</i>	-1,510	-1,506	-1,505	-1,504
<i>SP10 RE2-001</i>	-1,495	-1,498	-1,501	-1,498
<i>SP10 RE2-002</i>	-1,484	-1,486	-1,490	-1,489
<i>SP10 RE2-003</i>	-1,491	-1,494	-1,491	-1,496

Figura 3. 17*Variación del Potencial Eléctrico SP10*

La evolución del potencial para las condiciones SP2 en la Figura 3.16 y SP17 en la Figura 3.13 evidenció el efecto del control potencioestático implementado: a diferencia de un sistema únicamente con ánodo de sacrificio, el potencial se mantuvo dentro de un intervalo objetivo con menor dispersión, especialmente en SP10, procurando en todo momento que los valores se mantuvieran lo más cercanos posible al potencial de protección catódica y evitando superar -1.5 V, ya que rebasar ese umbral conduciría a sobreprotección y podría alterar los resultados. En SP2 se registraron fluctuaciones iniciales y algunas desviaciones puntuales antes de converger hacia el nivel de consigna, mientras que en SP10 las curvas permanecieron más agrupadas y estables durante casi todo el periodo. Esta diferencia se atribuyó a que la preparación SP10 proporcionó un perfil de anclaje más uniforme y menor resistencia de contacto, reduciendo la demanda de corriente y las caídas óhmicas; en SP2, la mayor heterogeneidad superficial introdujo variaciones locales de demanda que explicaron dichas fluctuaciones.

3.3 Análisis económico

3.3.1 Optimización en la selección de materiales

Con el fin de evaluar la viabilidad económica y técnica de implementar un sistema de ensayos de desprendimiento catódico, se realizó una comparativa entre dos alternativas: la ejecución del diseño experimental en laboratorios externos y la creación de un laboratorio propio en la empresa. En la Tabla 3.20 se presenta la síntesis de este análisis, donde se contrastan criterios como la inversión inicial, los costos operativos, el nivel de control del proceso, el tiempo de respuesta, los resultados obtenidos y el beneficio estratégico de cada opción. La tabla evidencia que el diseño experimental externo implica menores costos iniciales y resultados ajustados a estándares internacionales, aunque con tiempos de entrega prolongados y menor capacidad de personalización. Por otro lado, la implementación de un laboratorio propio requiere una inversión considerable, tanto en infraestructura como en equipamiento especializado; sin embargo, ofrece

ventajas significativas a largo plazo, al permitir independencia operativa, adaptación a las condiciones locales de Guayaquil y el fortalecimiento de capacidades técnicas internas.

Tabla 3. 20

Comparativa de alternativas para la evaluación de recubrimientos.

Criterio	Diseño experimental de desprendimiento catódico.	Laboratorio propio de empresa.
Inversión inicial	Bajo [2]: materiales y quipos.	Alto [5]: infraestructura, equipo tecnificado.
Costos operativos	Bajo [1]: consumibles.	Alto [5]: calibración de equipos, mantenimiento, consumibles, salarios de técnicos, capacitación y acreditaciones.
Control del proceso	Bajo [2]: equipos de medición.	Alto [4]: permite definir protocolos propios, adaptar condiciones locales
Tiempo de respuesta	Largo: depende de agendas externas y tiempos de entrega de 30 a 60 días según la norma ASTM G8.	Corto: disponibilidad inmediata dentro de la organización.
Resultados	Estándar, con menor capacidad de personalización a entornos específicos.	Adaptados a distintas condiciones locales de Guayaquil (humedad, sales, conductividad elevada).
Beneficio estratégico	A corto plazo: menor costo inicial y resultados bajo normas internacionales.	A largo plazo: genera independencia, experiencia técnica y capacidad de innovación.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

Al completar las fases propuestas en este estudio y analizar los resultados obtenidos, se formulan las siguientes conclusiones.

4.1 Conclusiones

1. La celda y el circuito de control diseñados permitieron realizar ensayos de desprendimiento catódico con potencial estable en torno a $-1,5\text{ V}$, cumpliendo el objetivo de desarrollar un sistema de evaluación confiable.
2. La preparación superficial influyó decisivamente en la resistencia de los recubrimientos; superficies SP10 redujeron el área desprendida respecto de SP2, confirmando que una limpieza deficiente acelera el deterioro.
3. En condición SP10, el recubrimiento RE2 presentó la menor área y porcentaje de desprendimiento, superando a RE1 y confirmando que la preparación SP10 maximiza la resistencia al desprendimiento catódico.
4. Los ensayos de adherencia por tracción sobre sustratos SP10 alcanzaron un promedio de $8,95\text{ MPa}$ en ambos recubrimientos, en concordancia con las fichas técnicas, con valores de referencia entre 8 y 10 MPa , y mostraron falla predominantemente cohesiva del recubrimiento; por lo tanto, la adhesión recubrimiento–sustrato fue adecuada y el límite observado respondió a la resistencia interna de la capa del recubrimiento y a la preparación superficial lograda con SP10.
5. La evolución temporal de los potenciales mostró que los paneles preparados con SP10 mantuvieron variaciones menores y mayor estabilidad; cuantitativamente, la dispersión del potencial se redujo $\approx 39\%$ respecto de SP2, pasando de $\sim 51\text{ mV}$ a $\sim 31\text{ mV}$, lo que confirma que una mejor preparación superficial demanda menos ajuste de corriente y estabiliza el potencial.

6. Las curvas de polarización indicaron tasas de corrosión similares para ambos recubrimientos ($i_{corr} \approx 3,0 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$); RE2 mostró un E_{corr} ligeramente más noble, sin reducir de forma relevante la velocidad de corrosión. El control potencioestático mantuvo el potencial dentro de la ventana de protección y con menor dispersión en SP10, evidenciando mayor estabilidad bajo esta preparación.

4.2 Recomendaciones

Una vez alcanzadas las metas de la investigación y analizados los hallazgos, se identifican varias acciones que podrían ampliar o perfeccionar el conocimiento generado. Las recomendaciones que se presentan a continuación

1. Verificar en futuros ensayos el uso de adhesivos con mayor resistencia a la tracción y perfeccionar la preparación del sustrato para asegurar fallas en el recubrimiento, con el fin de cuantificar la adherencia real.
2. Ampliar el estudio a otros tipos de recubrimientos y tiempos de exposición para evaluar la durabilidad bajo diferentes condiciones de potencial y temperatura.
3. Incorporar herramientas estadísticas como ANOVA en futuro para fortalecer las diferencias entre las preparaciones superficiales y recubrimientos.
4. En futuros ensayos, reportar E_{corr} , i_{corr} y pendientes de Tafel con las condiciones de barrido; incluir un indicador de estabilidad del potencial y aplicar corrección IR cuando corresponda; mantener el nivel de consigna próximo a $-1,5 \text{ V}$ sin sobrepasarlo para evitar sobreprotección y facilitar comparaciones entre SP2 y SP10.

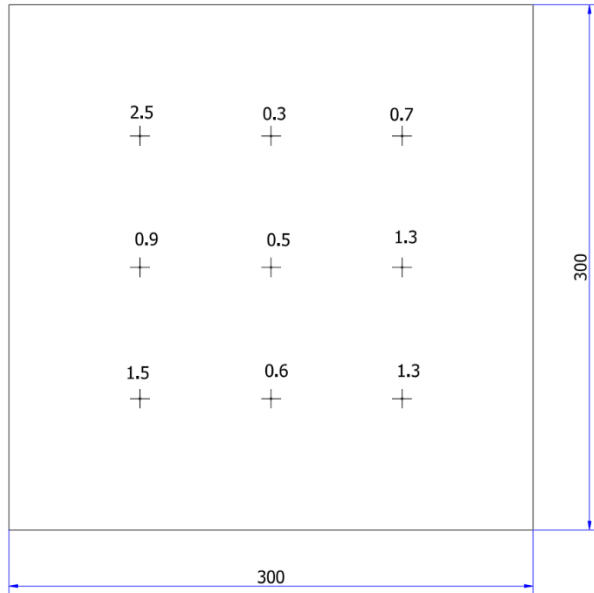
Referencias

- [1] M. G. Fontana, “Corrosion,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 39, no. 12, pp. 91 A-92 A, 1947, doi: 10.1021/ie50456a786.
- [2] E. Mohammed and S. Hammad, “External Corrosion Control of the Underground Steel Pipelines Using Cathodic Protection Systems,” vol. 8, no. 2, pp. 123–143, 2015.
- [3] Interagua, “Sistema de Agua Potable.” [Online]. Available: <https://www.interagua.com.ec/servicios/sistema-de-agua-potable>
- [4] G. Wranglen, “An introduction to corrosion and protection of metals,” vol. 19, no. 11, p. 5, 1972.
- [5] J. Avila Mendoza and J. Genescá Llongueras, “Más allá de la herrumbre,” 1986, p. 110.
- [6] Julio Carlos de Lama Agramonte, “Corrosión en concreto ante la presencia de iones cloruros,” Universidad de Piura, 2002.
- [7] A. Soufi, A. Aït-Mokhtar, P. Y. Mahieux, and A. Ouali, “Investigation of the Protection Efficiency of Repair Mortar Against Chloride Corrosion in Repaired Zones of Reinforced Concrete,” *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 10, pp. 1709–1724, 2023, doi: 10.1007/s40999-023-00859-9.
- [8] Luis Guillermo Navarrete Valles, “Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero,” Universidad de Piura, 2008.
- [9] C. A. Giudice *et al.*, *Tecnología De Pinturas Y Recubrimientos Componentes, Formulación, Manufactura Y Control De Calidad*. Buenos Aires, 2009.
- [10] C. M. SA, “Preparación de Superficie - Norma SSPC.”
- [11] E. Limited, “Pull-Off Adhesion Testing of Coatings,” 2015.
- [12] A. M. P. Carlos A. Giudice, “Control de calidad de películas de pintura.”
- [13] M. C. M. Co, “Analog Resistance Meter Part#44500 User’s manual.”
- [14] Defelsko, “PosiTest HHD y HHDC,” p. 4, 2023.

Apéndices

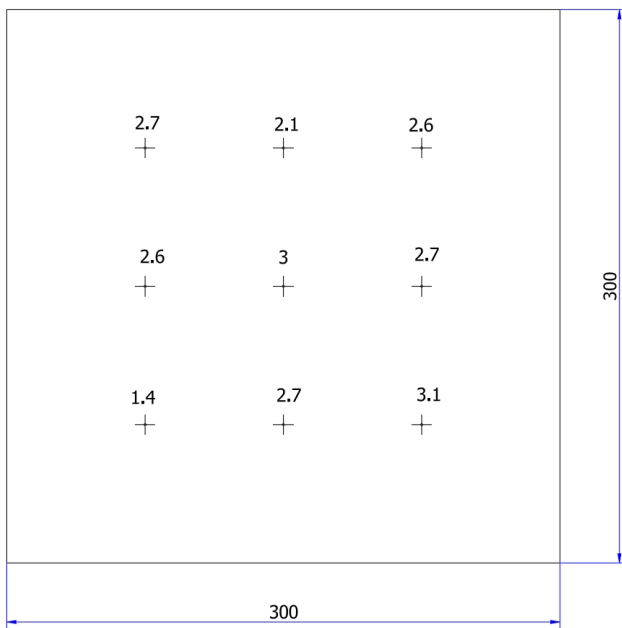
Apéndice A. Valores de rugosidad SP2 RE1

SP2 RE1-001



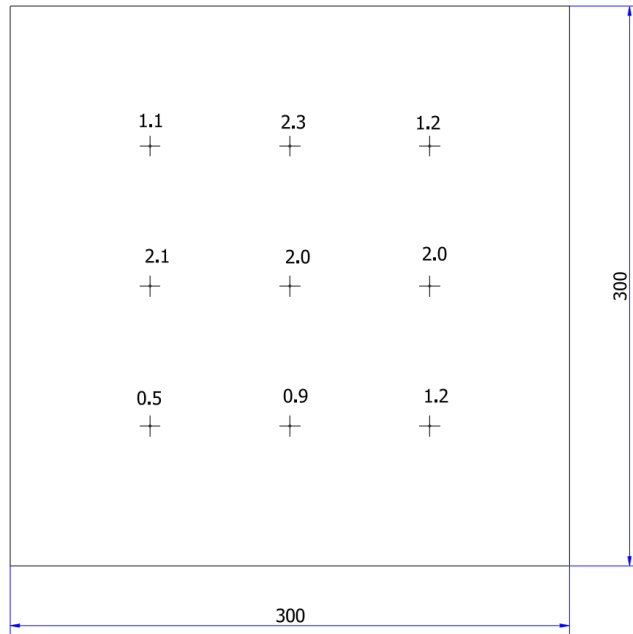
Nº	Rugosidad (mils)
1	2,5
2	0,3
3	0,7
4	0,9
5	0,5
6	1,3
7	1,5
8	0,6
9	1,3
Promedio	1,07

SP2 RE1-002



Nº	Rugosidad (mils)
1	2,7
2	2,1
3	2,6
4	2,6
5	3,0
6	2,7
7	1,4
8	2,7
9	3,1
Promedio	2.68

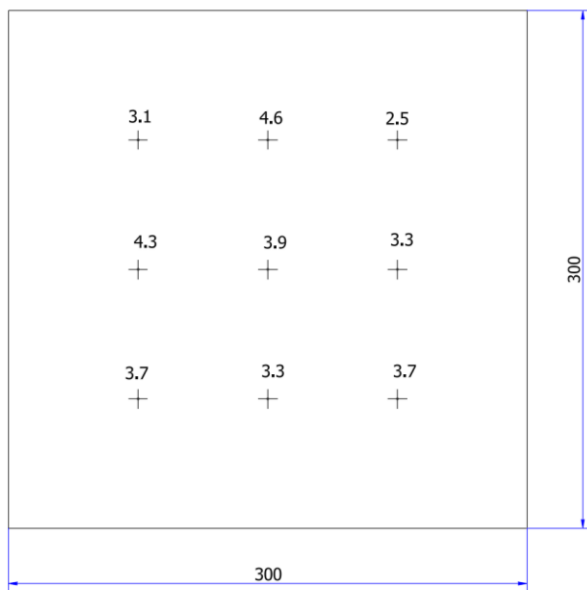
SP2 RE1-003



Nº	Rugosidad (mils)
1	1.1
2	2.3
3	1.2
4	2.1
5	2.0
6	2.0
7	0.5
8	0.9
9	1.2
Promedio	1.48

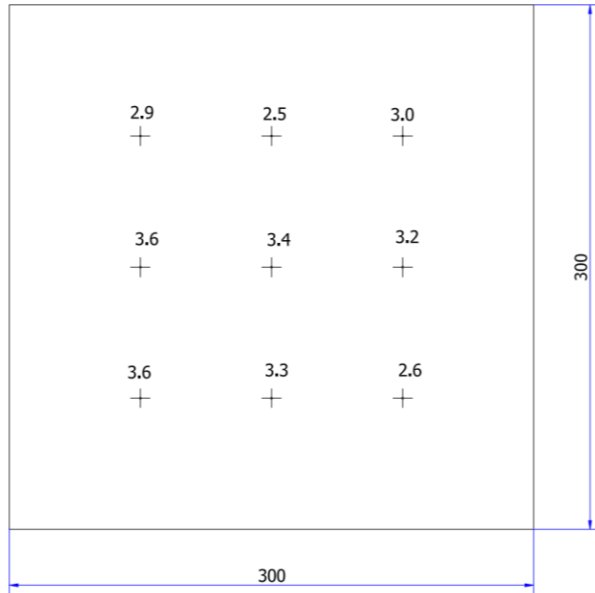
Apéndice B. Valores rugosidad SP10 RE1.

SP10 RE1 - 001



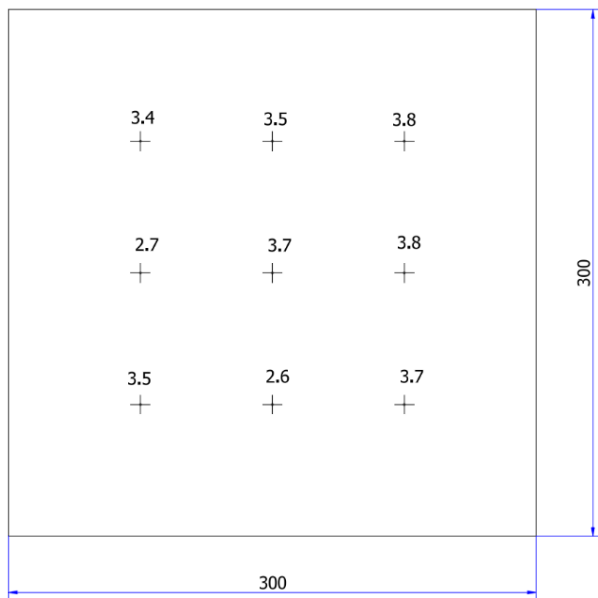
Nº	Rugosidad (mils)
1	3.1
2	4.6
3	2.5
4	4.3
5	3.9
6	3.3
7	3.7
8	3.3
9	3.7
Promedio	3.6

SP10 RE1-002



Nº	Rugosidad (mils)
1	2.9
2	2.5
3	3.0
4	3.6
5	3.4
6	3.2
7	3.6
8	3.3
9	2.6
Promedio	3.12

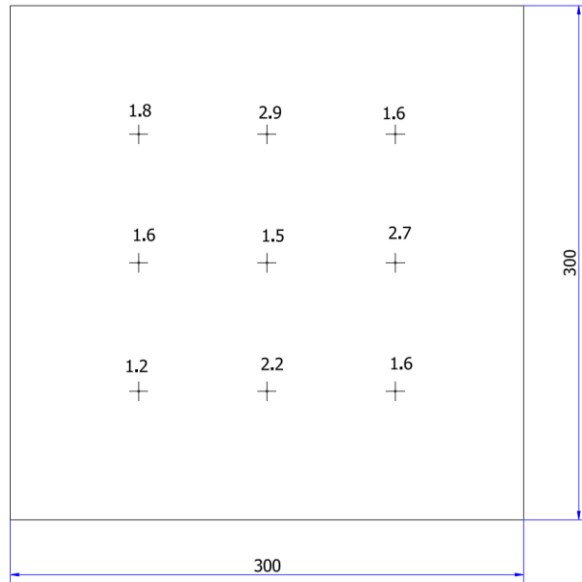
SP10 RE1- 003



Nº	Rugosidad (mils)
1	3.4
2	3.5
3	3.8
4	2.7
5	3.7
6	3.8
7	3.5
8	2.6
9	3.7
Promedio	3.41

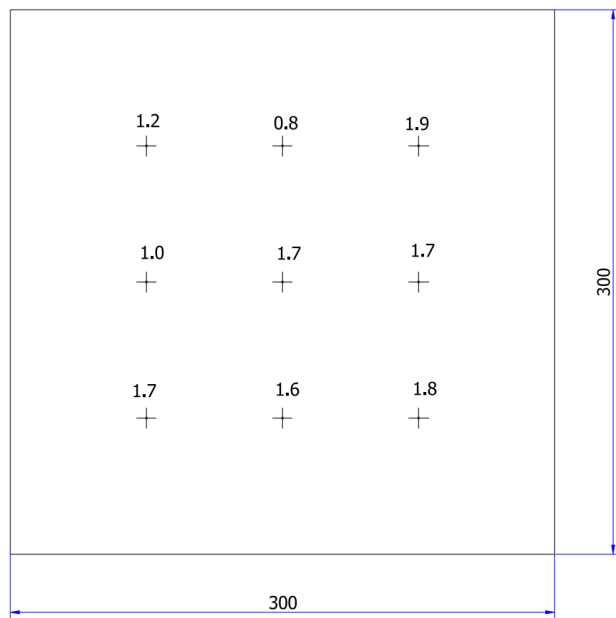
Apéndice C. Valores rugosidad SP2 RE2.

SP2 RE2-001



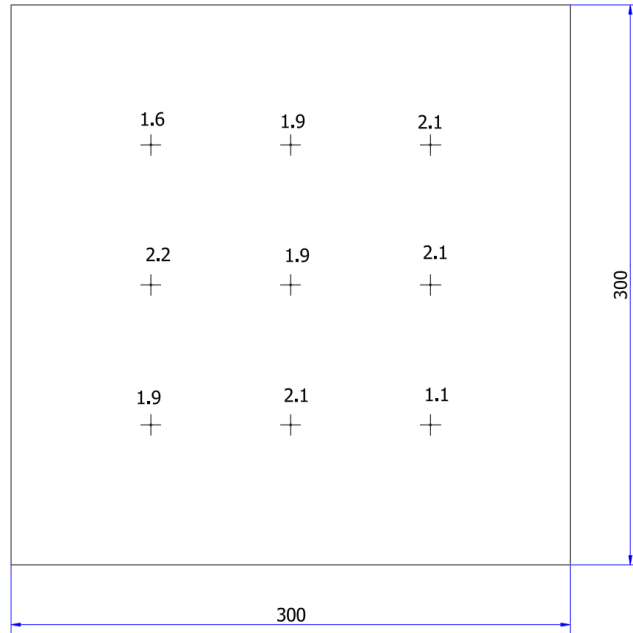
Nº	Rugosidad (mils)
1	1.8
2	2.9
3	1.6
4	1.6
5	1.5
6	2.7
7	1.2
8	2.2
9	1.6
Promedio	1.9

SP2 RE2-002



Nº	Rugosidad (mils)
1	1.2
2	0.8
3	1.9
4	1.0
5	1.7
6	1.7
7	1.7
8	1.6
9	1.8
Promedio	1.49

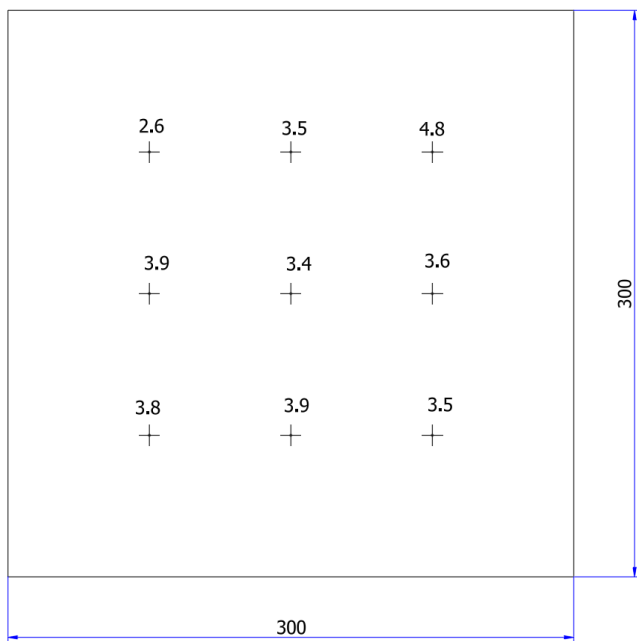
SP2 RE2-003



Nº	Rugosidad (mils)
1	1.6
2	1.9
3	2.1
4	2.2
5	1.9
6	2.1
7	1.9
8	2.1
9	1.1
Promedio	1.88

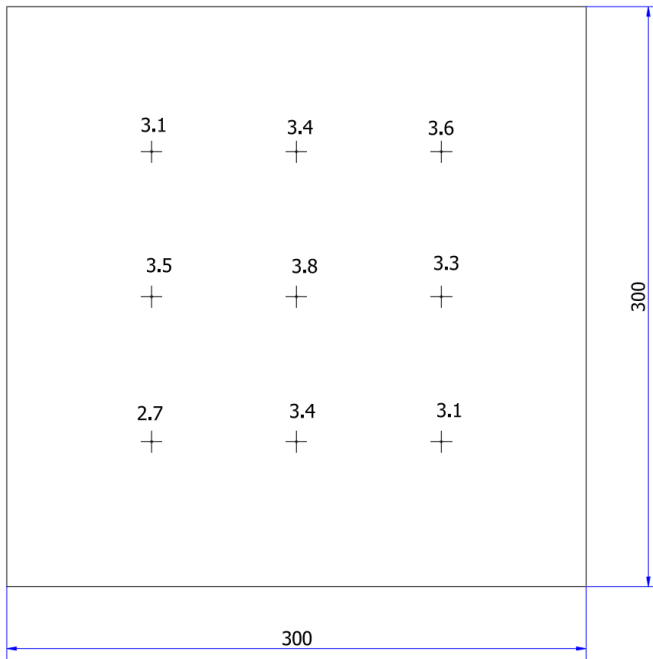
Apéndice D. Valores rugosidad SP10 RE2.

SP10 RE2 - 001



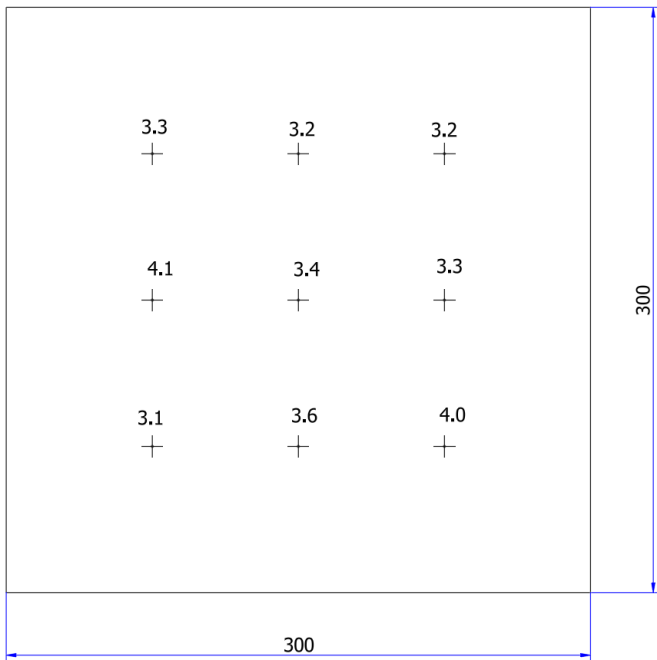
Nº	Rugosidad (mils)
1	2.6
2	3.5
3	4.8
4	3.9
5	3.4
6	3.6
7	3.8
8	3.9
9	3.5
Promedio	3.67

SP10 RE2- 002



Nº	Rugosidad (mils)
1	3.1
2	3.4
3	3.6
4	3.5
5	3.8
6	3.3
7	2.7
8	3.4
9	3.1
Promedio	3.32

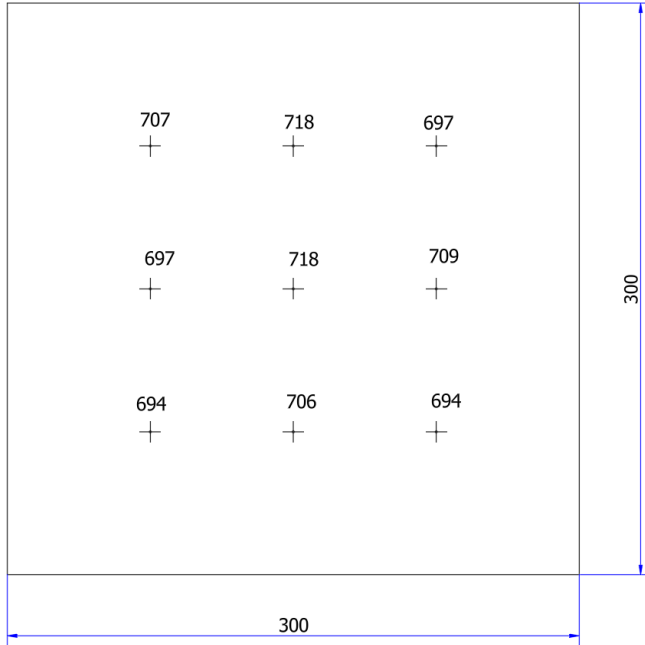
SP10 RE2 - 003



Nº	Rugosidad (mils)
1	3.3
2	3.2
3	3.2
4	4.1
5	3.4
6	3.3
7	3.1
8	3.6
9	4.0
Promedio	3.47

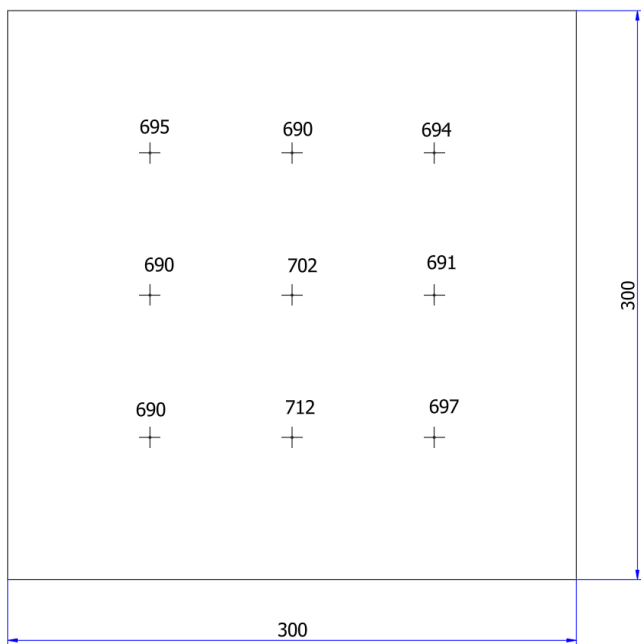
Apéndice E. Espesor de capa Húmeda SP2 RE1.

SP2 RE1-001



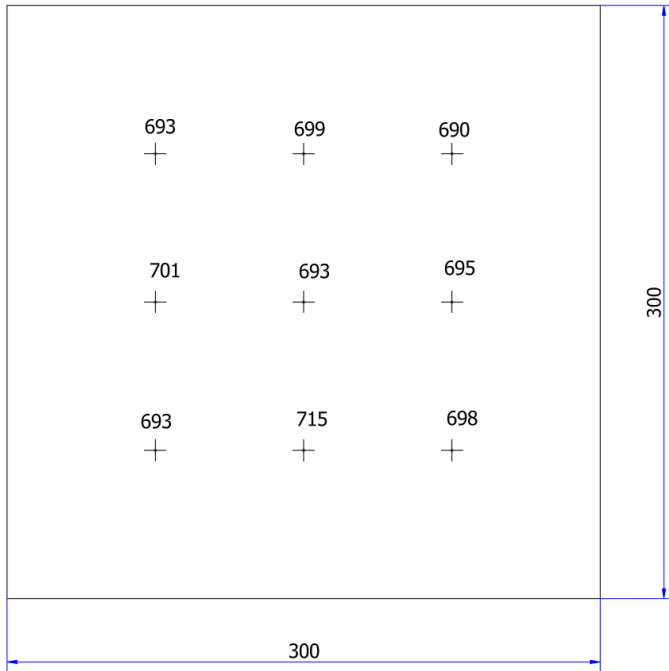
Nº	Espesor C.H (micras)
1	707
2	718
3	697
4	697
5	718
6	709
7	694
8	706
9	694
Promedio	704.44

SP2 RE1-002



Nº	Espesor C.H (micras)
1	695
2	690
3	694
4	690
5	702
6	691
7	690
8	712
9	697
Promedio	695.67

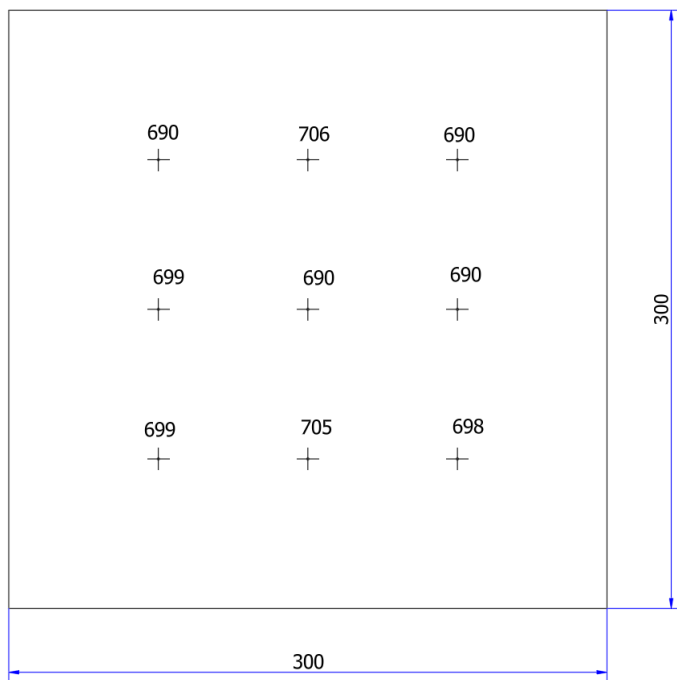
SP2 RE1-003



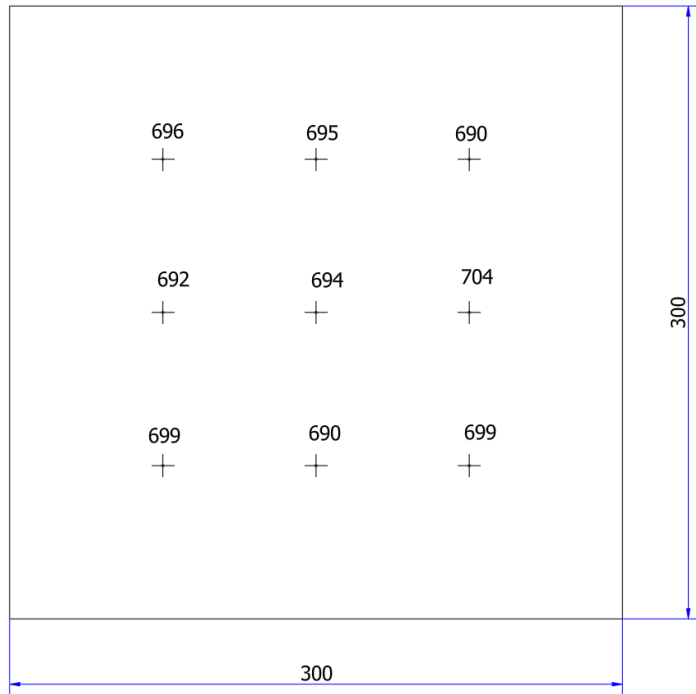
Nº	Espesor C.H (micras)
1	693
2	699
3	690
4	701
5	693
6	695
7	693
8	715
9	698
Promedio	697.44

Apéndice F. Espesor de capa Húmeda SP10 RE1.

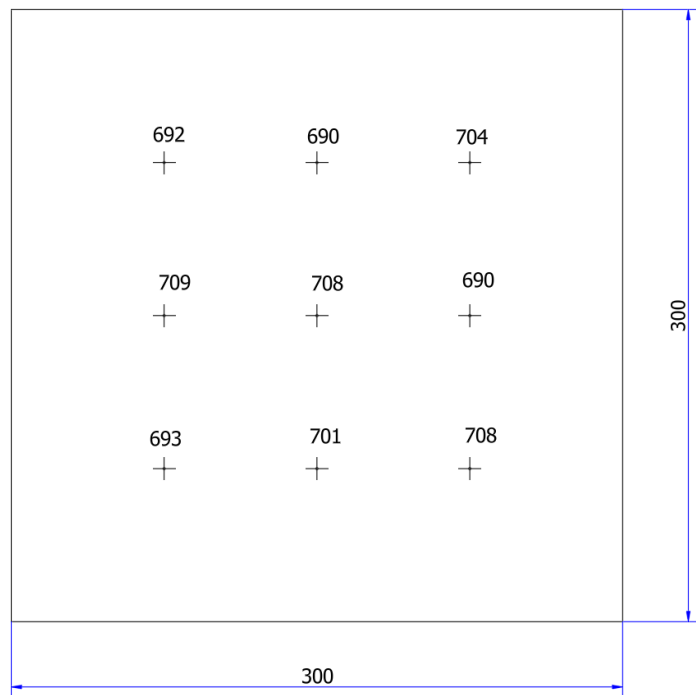
SP10 RE1 - 001



Nº	Espesor C.H (micras)
1	690
2	706
3	690
4	699
5	690
6	690
7	699
8	705
9	698
Promedio	696.33

SP10 RE1 – 002

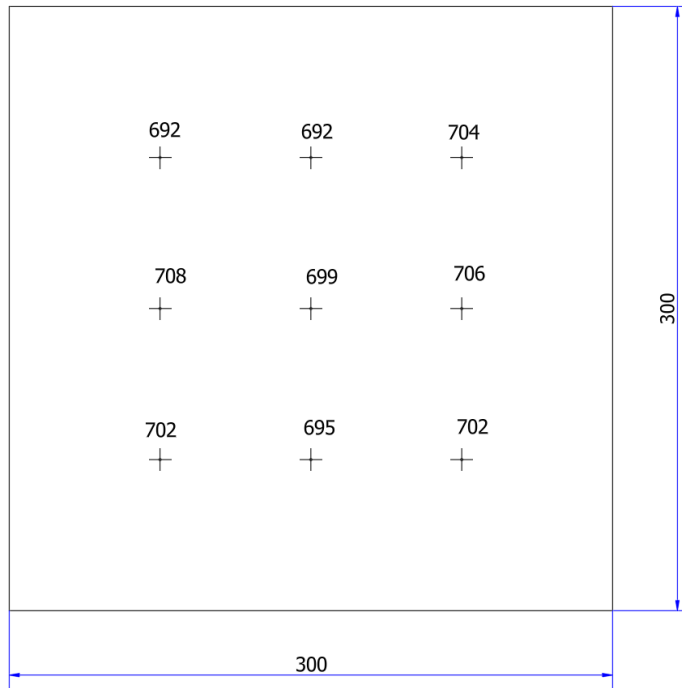
Nº	Espesor C.H (micras)
1	696
2	706
3	690
4	699
5	690
6	690
7	699
8	705
9	698
Promedio	696.33

SP10 RE1 – 003

Nº	Espesor C.H (micras)
1	692
2	690
3	704
4	709
5	708
6	690
7	693
8	701
9	708
Promedio	699.44

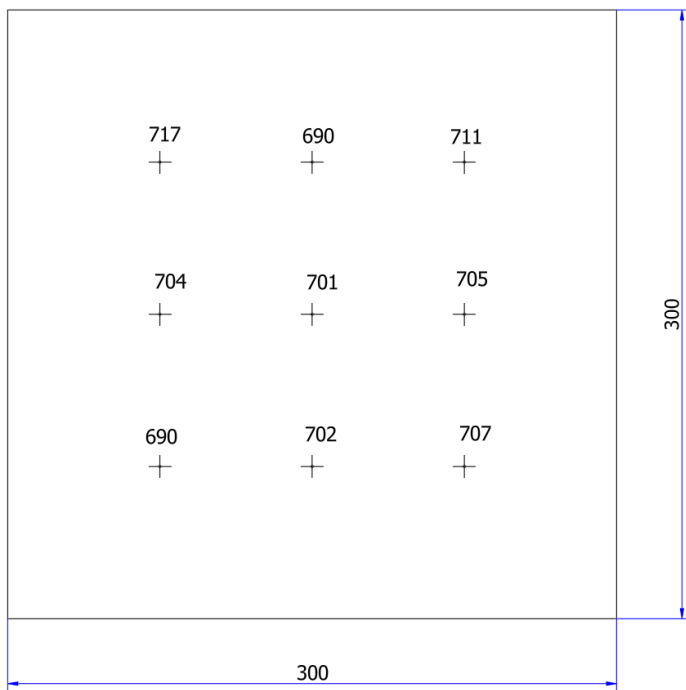
Apéndice G. Espesor de capa Húmeda SP2 RE2.

SP2 RE2-001



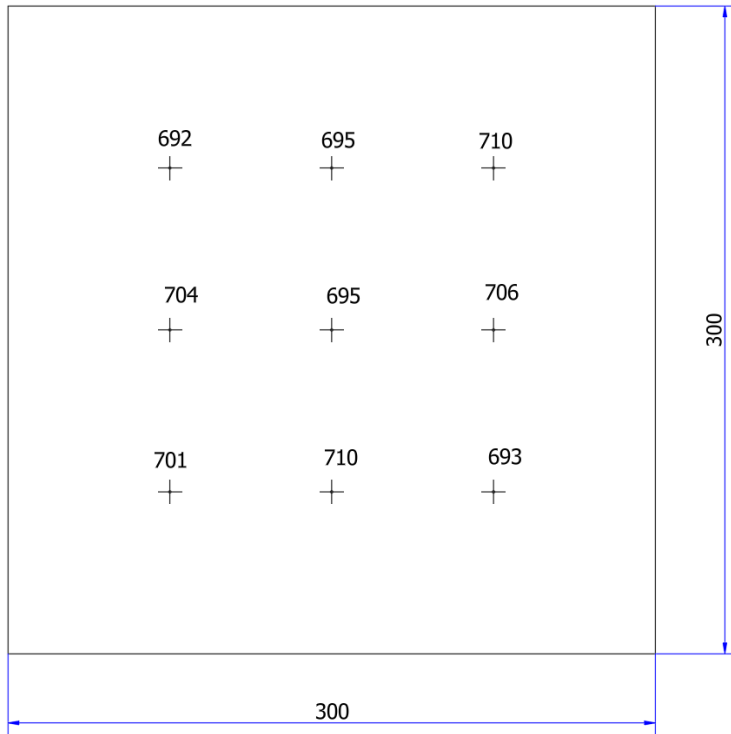
Nº	Espesor C.H (micras)
1	692
2	692
3	704
4	708
5	699
6	706
7	702
8	695
9	702
Promedio	700

SP2 RE2-002



Nº	Espesor C.H (micras)
1	717
2	690
3	711
4	704
5	701
6	705
7	690
8	702
9	707
Promedio	703

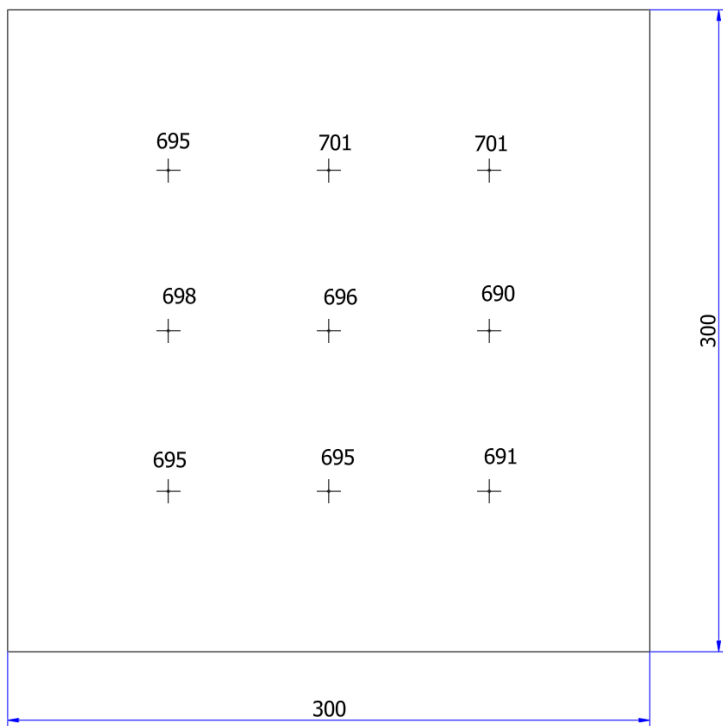
SP2 RE2-003



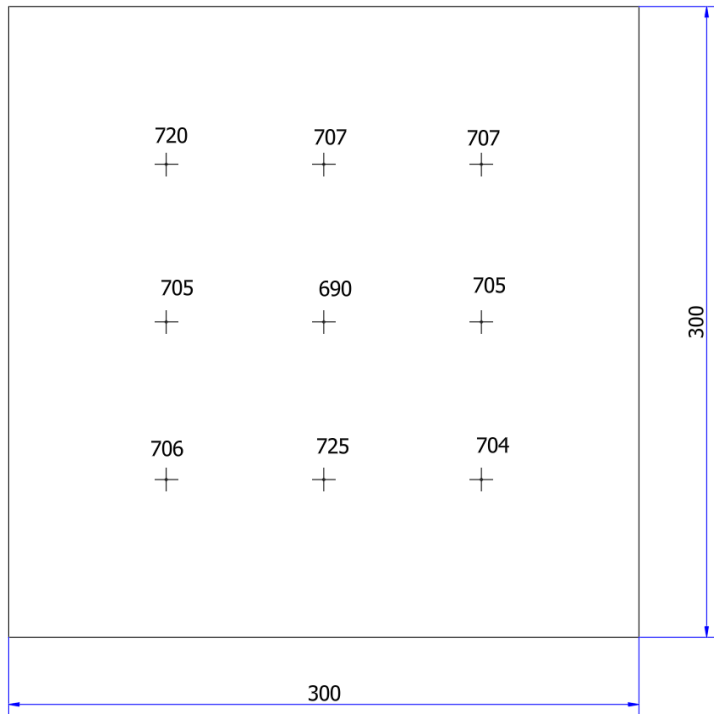
Nº	Espesor C.H (micras)
1	692
2	695
3	710
4	704
5	695
6	706
7	701
8	710
9	693
Promedio	700.67

Apéndice H. Espesor de capa Húmeda SP10 RE2.

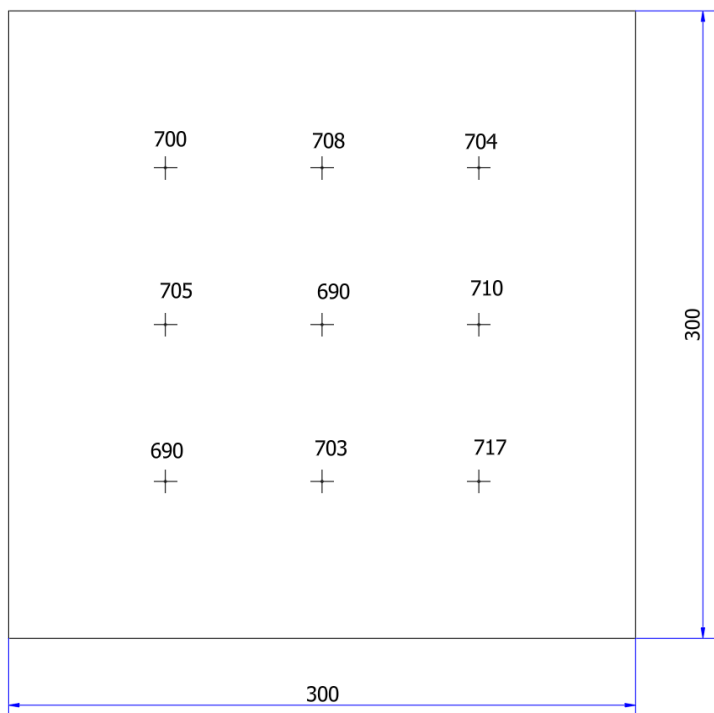
SP10 RE2 – 001



Nº	Espesor C.H (micras)
1	695
2	701
3	701
4	698
5	696
6	690
7	695
8	695
9	691
Promedio	695.78

SP10 RE2 – 002

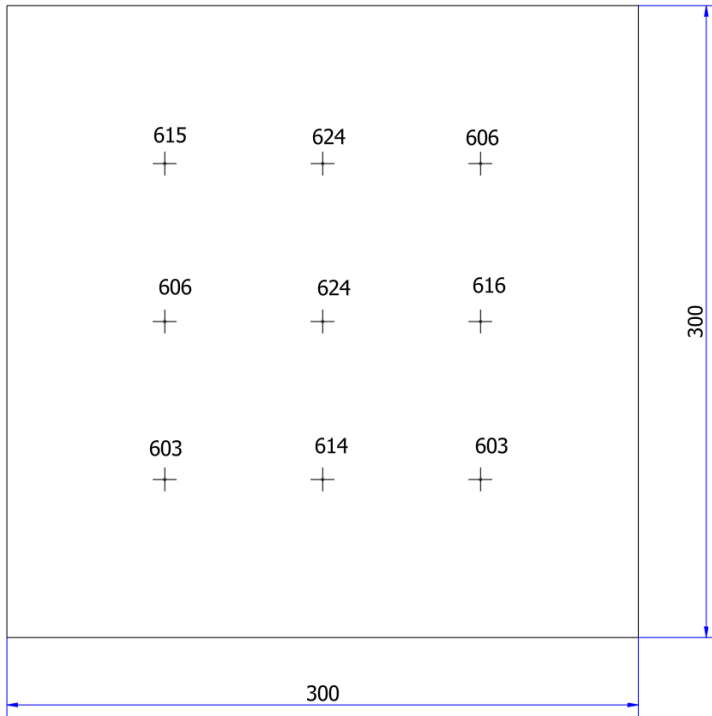
Nº	Espesor C.H (micras)
1	720
2	707
3	707
4	705
5	690
6	705
7	706
8	725
9	704
Promedio	707.67

SP10 RE2– 003

Nº	Espesor C.H (micras)
1	700
2	708
3	704
4	705
5	690
6	710
7	690
8	703
9	717
Promedio	703

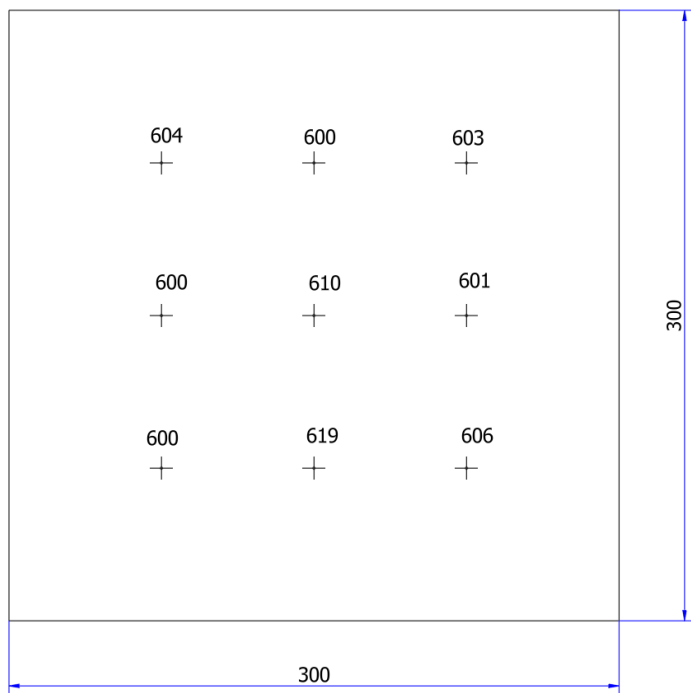
Apéndice I. Espesor de Capa Seca SP2 RE1.

SP2 RE1-001

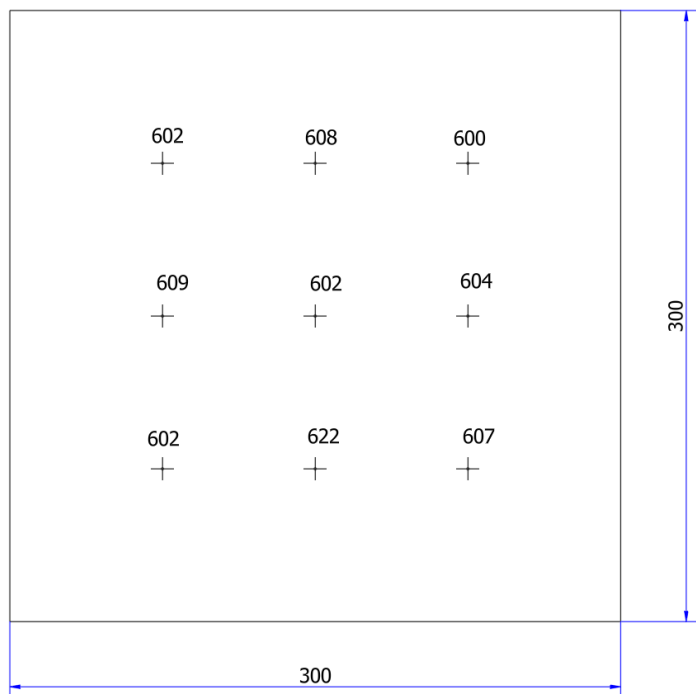


Nº	Espesor C.S (micras)
1	615
2	624
3	606
4	606
5	624
6	616
7	603
8	614
9	603
Promedio	612.33

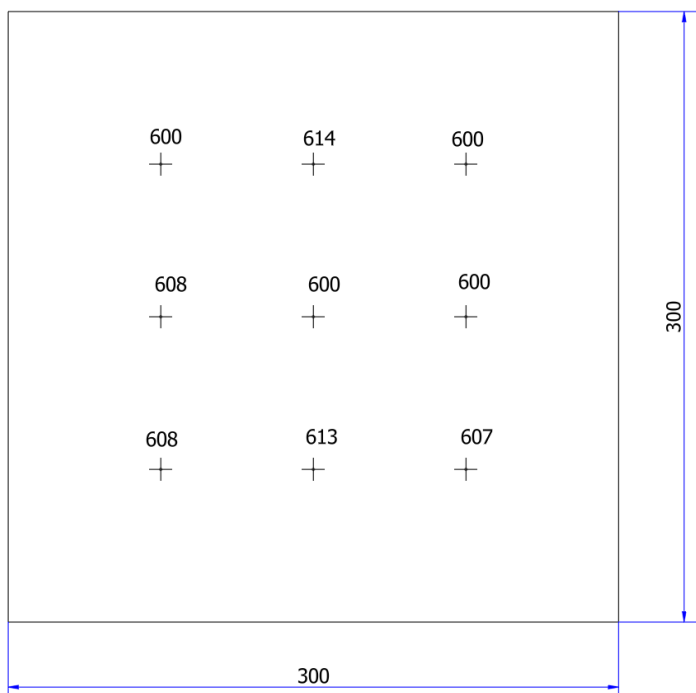
SP2 RE1-002



Nº	Espesor C.S (micras)
1	604
2	600
3	603
4	600
5	610
6	601
7	600
8	619
9	606
Promedio	604.78

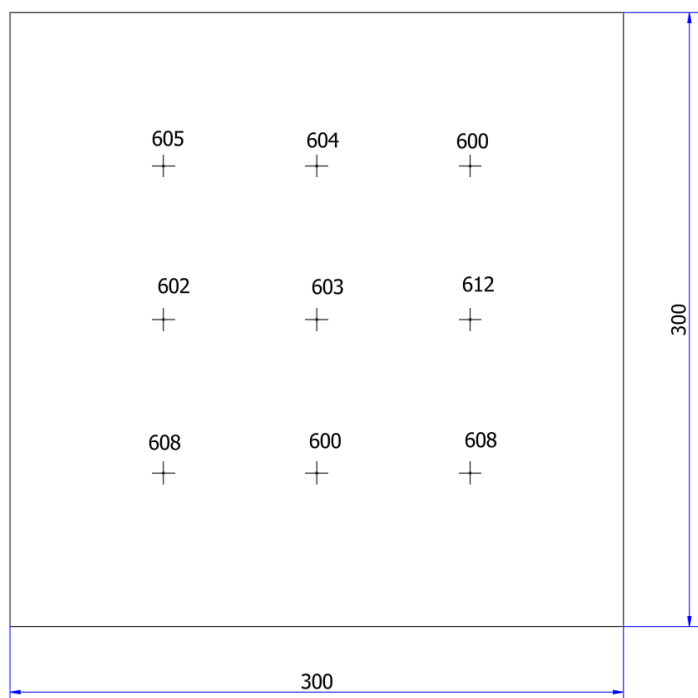
SP2 RE1-003

Nº	Espesor C.S (micras)
1	602
2	608
3	600
4	609
5	602
6	604
7	602
8	622
9	607
Promedio	606.22

Apéndice J. Espesor de Capa Seca SP10 RE1.*SP10 RE1-001*

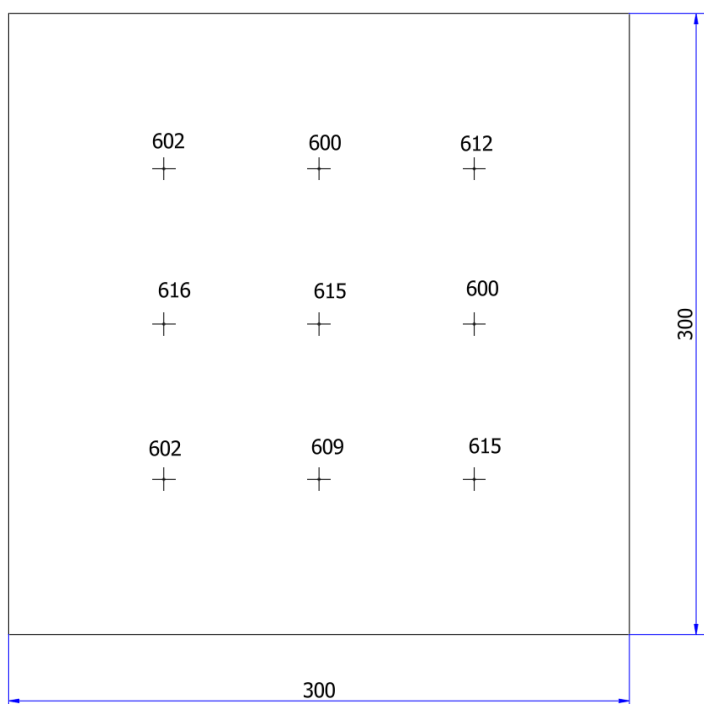
Nº	Espesor C.S (micras)
1	600
2	614
3	600
4	608
5	600
6	600
7	608
8	613
9	607
Promedio	605.56

SP10 RE1-002



Nº	Espesor C.S (micras)
1	605
2	604
3	600
4	602
5	603
6	612
7	608
8	600
9	608
Promedio	604.67

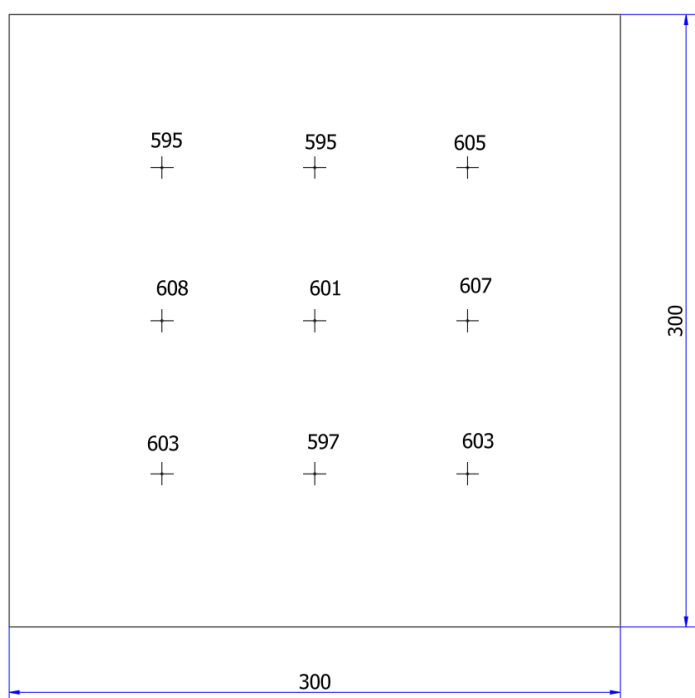
SP10 RE1-003



Nº	Espesor C.S (micras)
1	602
2	600
3	612
4	616
5	615
6	600
7	602
8	609
9	615
Promedio	607.89

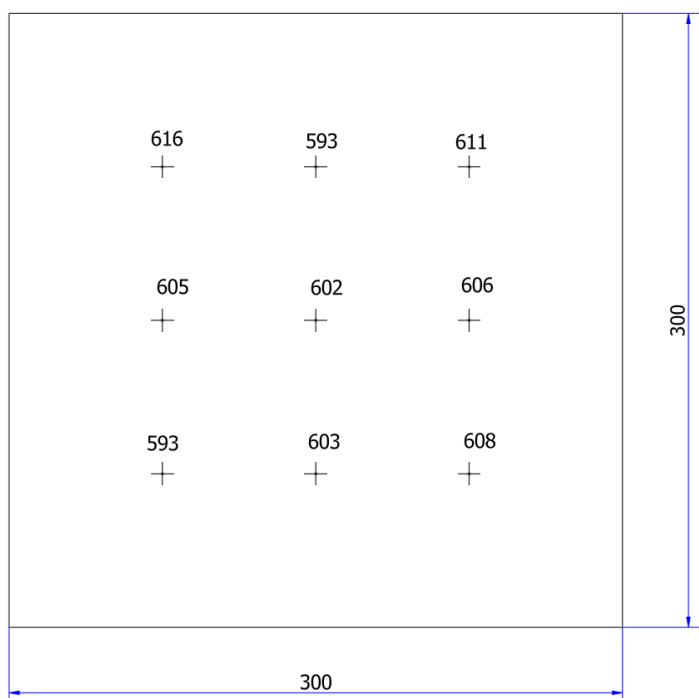
Apéndice K. Espesor de Capa Seca SP2 RE2.

SP2 RE2-001



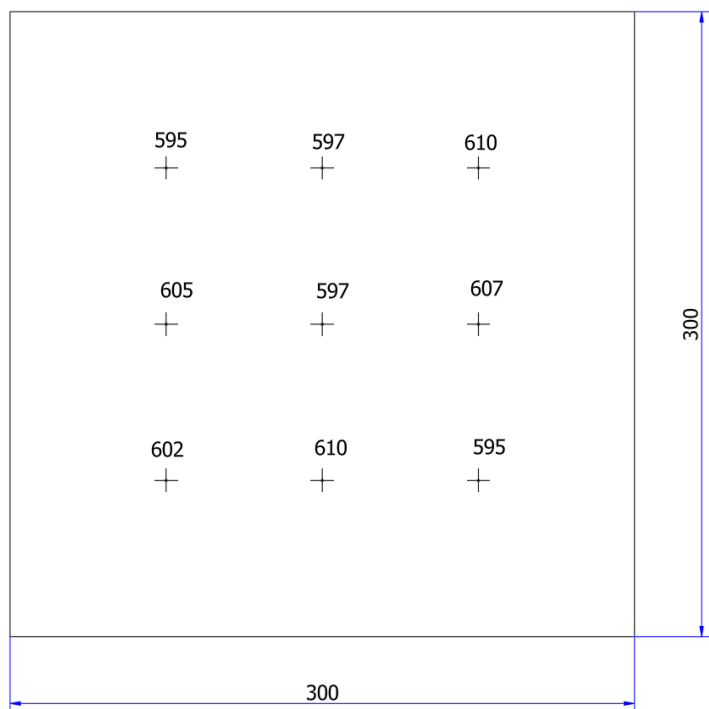
Nº	Espesor C.S (micras)
1	595
2	595
3	605
4	608
5	601
6	607
7	603
8	597
9	603
Promedio	601.56

SP2 RE2-002



Nº	Espesor C.S (micras)
1	616
2	593
3	611
4	605
5	602
6	606
7	593
8	603
9	608
Promedio	604.11

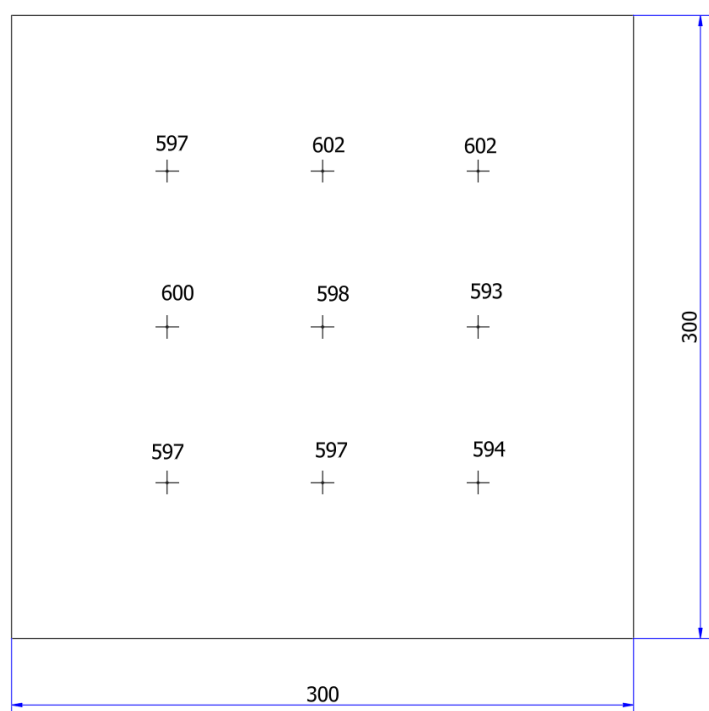
SP2 RE2-003



Nº	Espesor C.S (micras)
1	595
2	597
3	610
4	605
5	597
6	607
7	602
8	610
9	595
Promedio	602

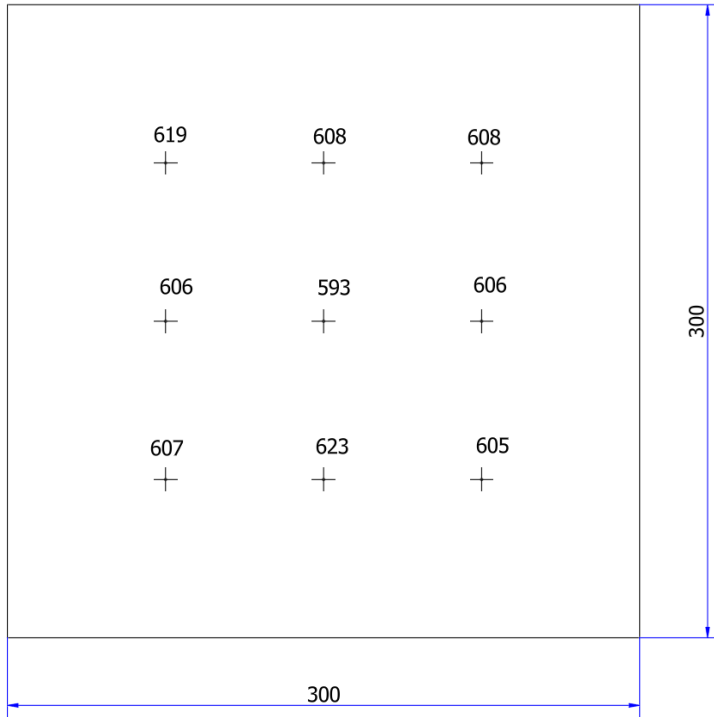
Apéndice L. Espesor de Capa Seca SP10 RE2.

SP10 RE2 – 001



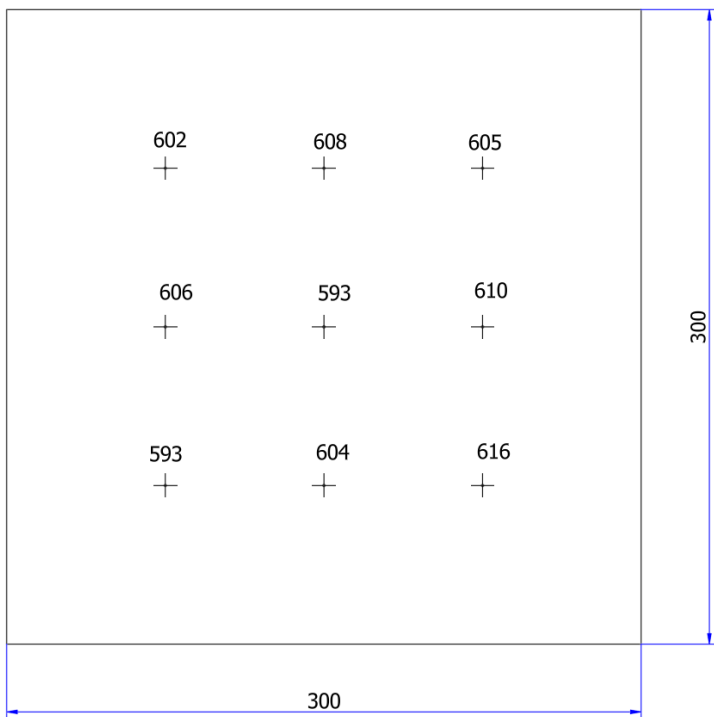
Nº	Espesor C.S (micras)
1	597
2	602
3	602
4	600
5	598
6	593
7	597
8	597
9	594
Promedio	597.78

SP10 RE2 – 002



Nº	Espesor C.S (micras)
1	619
2	608
3	608
4	606
5	593
6	606
7	607
8	623
9	605
Promedio	608.33

SP10 RE2 – 003



Nº	Espesor C.S (micras)
1	602
2	608
3	605
4	606
5	593
6	610
7	593
8	604
9	616
Promedio	604.11