



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

Evaluación de un inhibidor de corrosión verde para acero A36, a partir de cáscaras de naranja, usando etanol como solvente

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autora:

Salazar Daquilema, Emily Mishel

Tutor:

Ing. Raúl Alexis, Salazar Flores. MSc

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Emily Mishel Salazar Daquilema, con cédula de ciudadanía 0605445956, autor (a) (s) del trabajo de investigación titulado: EVALUACIÓN DE UN INHIBIDOR DE CORROSIÓN VERDE PARA ACERO A36, A PARTIR DE CÁSCARAS DE NARANJA, USANDO ETANOL COMO SOLVENTE, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 29 de abril de 2026



Emily Mishel Salazar Daquilema

C.I: 0605445956

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Raúl Alexis Salazar Flores** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: EVALUACIÓN DE UN INHIBIDOR DE CORROSIÓN VERDE PARA ACERO A36, A PARTIR DE CÁSCARAS DE NARANJA, USANDO ETANOL COMO SOLVENTE, bajo la autoría de **Emily Mishel Salazar Daquilema**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 29 días del mes de abril de 2026



MgsC./ Ing. Raúl Alexis Salazar Flores

TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“Evaluación de un inhibidor de corrosión verde para acero A36, a partir de cáscaras de naranja, usando etanol como solvente”**, presentado por Emily Mishel Salazar Daquilema, con cédula de identidad número 0605445956, bajo la tutoría de **MgsC./ Ing. Raúl Alexis Salazar Flores**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 29 de abril de 2026.

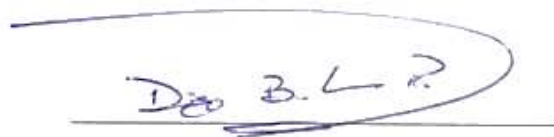
Ing. Oscar Cevallos PhD
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Jorge Núñez MSc
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Diego Barahona MGs
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **SALAZAR DAQUILEMA EMILY MISHEL**, con cédula de identidad número 0605445956, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado “Evaluación de un inhibidor de corrosión verde para acero A36, a partir de cáscaras de naranja, usando etanol como solvente”, cumple con el 1 %, de similitud y 10% de inteligencia artificial de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO MAGISTER +**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 22 de abril de 2026



Ing. Raúl Salazar Flores. MSc
TUTOR

DEDICATORIA

A mi madre, por ser el corazón de mi vida y la razón de cada paso que he logrado dar. Gracias por tu amor inmenso, por tu esfuerzo silencioso y por nunca rendirte a pesar de las dificultades. Has luchado cada día por sacarme adelante, por darme oportunidades y por cumplir sueños que también hiciste tuyos. Gracias por sostenerme cuando más lo necesitaba, por impulsarme a seguir en esta carrera y por enseñarme, con tu ejemplo, lo que significa ser fuerte. Todo lo que soy y todo lo que he alcanzado nace de ti; este logro es, sin duda, una parte de todo lo que tú sembraste en mí, lleva tu nombre en cada página, porque sin ti nada de esto habría sido posible.

A quienes han compartido conmigo la vida día a día, por su compañía, su cariño y por estar siempre presentes en cada momento importante. En especial, a esa persona que me cuidó desde pequeña con un amor inmenso, que me enseñó con paciencia y que ha estado para mí en todo momento, siendo una presencia fundamental en mi crecimiento.

A alguien muy especial en mi vida, por su amor tan sincero y su compañía en los momentos más difíciles. Gracias por estar cuando más lo necesitaba, por calmar mis lágrimas, ayudarme incluso en lo más pequeño y darme fuerzas cuando sentía que ya no podía más. Eres una parte muy importante de este camino y de todo lo que he logrado.

A toda mi familia, por su apoyo constante, por cada palabra de aliento y por confiar en mí a lo largo de este proceso.

Y a mis pequeños compañeros de vida, Sofía y Adolfo.

A Sofía, quien me acompañó durante tantos años, llenando mis días de un amor puro, leal y silencioso, dejando una huella imposible de borrar y un vacío lleno de recuerdos hermosos. Y a Adolfo, quien llegó en el momento en que más lo necesitaba, trayendo consigo alegría, ternura y esa compañía que sana sin decir una sola palabra.

*Con todo mi cariño,
Emily Salazar.*

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza, la perseverancia y la sabiduría necesarias para culminar esta importante etapa de mi vida. A la Universidad Nacional de Chimborazo, por haber sido el espacio de mi formación profesional y por proporcionarme los conocimientos y herramientas fundamentales en este camino. Al Ing. Raúl Salazar, por su guía constante, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo de investigación. A mis docentes, por cada enseñanza impartida y por contribuir significativamente a mi crecimiento académico y personal. A los miembros del tribunal, por su tiempo, compromiso y por cada una de sus observaciones y recomendaciones, que permitieron mejorar y fortalecer este trabajo. Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso y aportaron para la culminación de este logro.

*Con profunda gratitud,
Emily Salazar.*

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....14

1.1 Antecedentes	14
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo general	16
1.3.2. Objetivos específicos	16

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO17

2.1 Fundamentación teórica.....	17
2.1.1. Acero	17
2.1.2. Acero A36	17
2.1.2.1. Importancia del Acero A36.....	18
2.1.2.2. Factores que influyen en la Corrosión del Acero A36	19
2.1.2.3. Ciclo de vida del Acero A36	19
2.1.3. Corrosión	20
2.1.4. Tipos de Corrosión	20
2.1.4.1. Corrosión Generalizada	20
2.1.4.2. Corrosión Localizada	20
2.1.4.3. Cáscaras de Naranja como Inhibidor de Corrosión.....	21
2.1.4.4. Corrosión combinada con un fenómeno físico	21
2.1.5. Factores que influyen en la corrosión.....	21
2.1.6. Inhibidores de corrosión	22
2.1.7. Tipos de inhibidores según procedencia.....	22
2.1.7.1. Inhibidores orgánicos	22
2.1.7.2. Inhibidores inorgánicos	22

2.1.7.3.	Inhibidores verdes.....	22
2.1.7.4.	Oxidación.....	22
2.2	Estado del Arte.....	23
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		24
3.1	Tipo de Investigación.....	24
3.2	Preparación de probetas	24
3.3	Fabricación de probetas	25
3.4	Preparación del inhibidor	25
3.5	Ensayos de corrosión acelerada.....	26
3.6	Ensayos mecánicos.....	26
3.7	Métodos de análisis estadístico	27
3.8	Limitaciones metodológicas.....	27
3.9	Ecuaciones utilizadas.....	28
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		30
4.1	Pérdidas de masa (ensayo gravimétrico)	30
4.1.1	Descripción del registro	30
4.2	pH y conductividad final de los medios.....	32
4.3	Ensayo de tracción: curvas esfuerzo-deformación y propiedades mecánicas	39
4.4	Análisis estadístico y significancia.....	43
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		45
5.1	Conclusiones.....	45
5.2	Recomendaciones	45
REFERENCIAS.....		47
ANEXOS		51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero A36 (ASTM Standards, 2019).	18
Tabla 2. Características mecánicas del acero A36 (ASTM Standards, 2019).....	19
Tabla 3. Datos de pérdida de masa (g).....	31
Tabla 4. pH y conductividad final de las soluciones.....	33
Tabla 5. Variación de masa (g)	34
Tabla 6. Mediana de velocidad de corrosión.....	35
Tabla 7. Eficiencia del inhibidor	35
Tabla 8. Esfuerzo, módulo de elasticidad, resiliencia y tenacidad.....	39
Tabla 9. Media de módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, resiliencia y tenacidad.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig 1. Esquema metodológico de la investigación.</i>	<i>24</i>
<i>Fig 2. Dimensiones de la probeta de acero A36 según norma ASTM A370.</i>	<i>25</i>
<i>Fig 3. Probeta usada como envase para los ensayos de corrosión.</i>	<i>25</i>
<i>Fig 4. Soluciones de inhibidor en diferentes concentraciones.</i>	<i>26</i>
<i>Fig 5. Curvas esfuerzo-deformación del ensayo a tracción a 0.5 M de HCl a) 0% de inhibidor, b) 10% de inhibidor, c) 15% de inhibidor, d) 25% de inhibidor, e) 30% de inhibidor, f) placas control, no fueron sometidas a ningún proceso de corrosión.</i>	<i>37</i>
<i>Fig 6. Variación de propiedades mecánicas del ensayo a tensión para cada grupo a) módulo de elasticidad en GPa, b) esfuerzo de fluencia en MPa, c) resiliencia en MJ/m³, d) tenacidad en MJ/m³</i>	<i>42</i>

RESUMEN

Esta investigación analiza el potencial de un innovador inhibidor de corrosión verde obtenido de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) mediante un proceso de extracción etanólica, diseñado para salvaguardar la integridad del acero estructural A36. Frente a la problemática de la alta toxicidad y el impacto ecológico negativo de los agentes químicos tradicionales, este estudio propone una solución alineada con la química sostenible para mitigar el deterioro electroquímico en infraestructuras críticas. Bajo un enfoque cuantitativo-experimental, se evaluaron concentraciones del 10%, 15%, 25% y 30% en un medio agresivo de ácido clorhídrico 0.5 M. Mediante análisis gravimétricos y ensayos de tracción, se determinó que la protección se fundamenta en la adsorción de compuestos bioactivos como flavonoides y limoneno, los cuales crean una barrera protectora sobre la superficie metálica.

Los hallazgos más destacados revelan que la dosificación al 30% ofrece el desempeño óptimo, logrando una eficiencia del 61,8% y preservando un esfuerzo de fluencia de 355,48 MPa junto con una resiliencia de 6,37 MJ/m³. Estos resultados contrastan significativamente con el colapso mecánico observado en las muestras desprotegidas, las cuales sufrieron una transición hacia la fragilidad. En conclusión, la valorización de estos residuos agroindustriales no solo frena el avance de la corrosión, sino que garantiza la ductilidad y capacidad de servicio del acero A36, consolidándose como una alternativa técnica y ambientalmente superior para la ingeniería civil contemporánea.

Palabras clave: Acero A36, cáscara de naranja, corrosión, ensayos mecánicos, inhibidor verde, química sostenible.

ABSTRACT

This research examines the potential of an innovative green corrosion inhibitor derived from orange peels (*Citrus sinensis*) through an ethanolic extraction process, aimed at protecting the integrity of A36 structural steel. Given the high toxicity and adverse ecological impact associated with conventional chemical agents, this study proposes a solution aligned with the principles of sustainable chemistry to mitigate electrochemical degradation in critical infrastructure. Using a quantitative experimental approach, concentrations of 10%, 15%, 25%, and 30% were evaluated in an aggressive 0.5 M hydrochloric acid medium. Gravimetric analysis and tensile testing showed that the protective mechanism is governed by the adsorption of bioactive compounds such as flavonoids and limonene, which form a protective barrier on the metallic surface. The most significant findings indicate that the 30% dosage delivers optimal performance, achieving an efficiency of 61,8% while preserving a yield strength of 355,48 MPa and a resilience of 6,37 MJ/m³. These results contrast significantly with the mechanical failure observed in unprotected samples, which exhibited brittle behavior. In conclusion, the valorization of these agro-industrial residues not only curbs the progression of corrosion but also ensures the ductility and serviceability of A36 steel, establishing it as a technically and environmentally superior alternative for contemporary civil engineering.

Keywords: A36 steel, orange peel, corrosion, mechanical testing, green inhibitor, sustainable chemistry.



Reviewed by:
MsC. Edison Damian Escudero
ENGLISH PROFESSOR
C.C.0601890593

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el contexto ecuatoriano, el acero ha sido un material clave para el desarrollo de infraestructuras como puentes, edificaciones y diversas obras civiles e industriales. Su uso se intensificó a partir del siglo XX, cuando comenzó a emplearse de manera masiva gracias a sus propiedades mecánicas: resistencia a la tracción, ductilidad y durabilidad. Estas cualidades lo convirtieron en un recurso confiable y ampliamente preferido en la construcción moderna [1]. Asimismo, su versatilidad ha permitido a ingenieros y arquitectos la posibilidad de crear estructuras innovadoras y funcionales conforme a las exigencias de cada época [2].

No obstante, el acero se ve amenazado por un peligro constante como es la corrosión. Cuando el acero entra en contacto con un ambiente húmedo o agresivo, el metal tiende a oxidarse, evidenciando pérdida de masa y propiedades mecánicas [3]. Esto, en consecuencia, afecta directamente la durabilidad de elementos estructurales clave, principalmente en lugares donde las condiciones ambientales son severas. La humedad, la salinidad o determinadas concentraciones de contaminantes son factores que provocan que el proceso de corrosión se intensifique, puesto que compromete la seguridad y funcionalidad de las obras [2]. Ante esta situación tanta óptima, se presenta la necesidad de estudiar alternativas sostenibles en el ámbito de la protección de acero. De entre ellas, el uso de solventes renovables como el etanol al objeto de extraer compuestos bioactivos a partir de residuos agroindustriales. En el caso que nos interesa, las cáscaras de naranja contienen sustancias antioxidantes que son capaces de actuar como inhibidores de corrosión, constituyendo una alternativa ecológica frente a productos de síntesis tradicionales.

Históricamente, se han implementado diversas estrategias para aumentar la vida útil del acero, desde recubrimientos protectores, pasando por técnicas de galvanización, hasta la utilización de materiales más resistentes. Cada una de ellas obedece al objetivo de disminuir costes de mantenimiento y minimizar el impacto ambiental que generan las reparaciones de estructuras de las que se ha apoderado el tiempo. Aun así, la corrosión sigue siendo un problema técnico, económico y ambiental bastante relevante. Contemplar su control es ineludible para garantizar tanto la sostenibilidad como la seguridad de las infraestructuras [1].

En este marco, la presente investigación propone evaluar una alternativa verde basada en residuos agroindustriales —específicamente cáscaras de naranja— como inhibidor de corrosión para acero A36, utilizando etanol como solvente.

1.2 Planteamiento del problema

La corrosión metálica es un fenómeno electroquímico que deteriora progresivamente el acero, afectando tanto su apariencia como su integridad estructural. Este proceso reduce la vida útil del material y puede desencadenar fallas graves en infraestructuras críticas como puentes y edificaciones [2]. Aunado a lo anterior [4], incrementa los gastos de mantenimiento y reparación, pone en riesgo la seguridad pública y produce un impacto económico considerable.

Pese a que éstas presentan métodos para reducir los efectos de la corrosión, muchos de los inhibidores sintéticos tienen ciertas limitaciones importantes: toxicidad, costo elevado y efectos medio ambientales no deseados [5]. Esto pone de manifiesto la necesidad de desarrollar otras más sostenibles y menos agresivas con el medio ambiente, los inhibidores verdes (obtenidos a partir de residuos orgánicos) representan una alternativa prometedora.

El uso de cáscaras de naranja como materia prima resulta particularmente atractivo. Se trata de un subproducto abundante y biodegradable, mientras que el etanol es un solvente renovable y menos tóxico. La combinación de ambos permite obtener extractos con potencial inhibidor sin generar impactos ambientales significativos. [6].

A pesar de los avances en la investigación de inhibidores verdes, en Ecuador su aplicación aún es limitada. La construcción continúa optando por soluciones que se basan principalmente en inhibidores de origen sintético, lo que implica que existe una muy escasa utilización de soluciones sostenibles. La carencia de alternativas orgánicas que hoy en día se encuentran en el mercado hace que sea difícil fomentar la aplicación de métodos de protección más sostenibles [7]. Para poder conseguir esto, resulta necesario evaluar nuevas alternativas que se puedan adaptar a las prácticas de hoy en día. Por todo ello, esta investigación trata de responder a la siguiente pregunta: ¿Qué tan eficiente es un compuesto de cáscaras de naranja como inhibidor de corrosión en acero A36 y a qué concentración rinde mejor?

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Analizar la eficiencia de un inhibidor de corrosión a base de cáscara de naranja con etanol como solvente para proteger el acero A36.

1.3.2. Objetivos específicos

- Formular un inhibidor de corrosión a base de cáscara de naranja con etanol como solvente para obtener la concentración idónea para su uso en acero A36.
- Diseñar ensayos de corrosión acelerada a fin de medir el grado de efectividad del inhibidor constituido a partir de cáscaras de naranja en la protección frente a la corrosión.
- Realizar ensayos gravimétricos y a tracción con la finalidad de estudiar el papel del inhibidor en relación con las propiedades mecánicas del acero A36.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentación teórica

Para comprender la eficiencia de un inhibidor de corrosión elaborado a partir de cáscaras de naranja utilizando etanol como solvente, es necesario revisar los conceptos fundamentales relacionados con el acero A36, la corrosión y los mecanismos de inhibición. Este marco teórico reúne los elementos esenciales que permiten contextualizar el comportamiento del material frente a ambientes corrosivos y justificar la pertinencia del estudio.

2.1.1. *Acero*

El acero es una aleación de hierro que puede modificar sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos controlados. Cuando se mantiene a altas temperaturas y se enfría lentamente, adquiere mayor ductilidad; mientras que un enfriamiento rápido genera un estado templado que incrementa su dureza y resistencia a la deformación. Las transformaciones experimentadas por el acero permiten obtener un material versátil que puede adaptarse a las diferentes exigencias de las estructuras.

El acero es, hoy en día, un material indispensable en la construcción y la arquitectura, dada su resistencia, su durabilidad y su capacidad para soportar cargas dinámicas. Adicionalmente, el acero se emplea en estructuras metálicas, en edificios altos y en sistemas de refuerzo para el concreto. Las innovaciones en la fabricación de aceros de alta resistencia han conducido a la obtención de un material más eficiente y más sostenible que, además, permite optimizar costes y los tiempos de la construcción. Tecnologías como la prefabricación o los sistemas modulares también han mejorado el rendimiento en obra y reducido el despilfarro de materiales. En conjunto, estas características consolidan al acero como un material competitivo y confiable para infraestructuras modernas [8].

2.1.2. *Acero A36*

El acero A36 es un acero estructural al carbono ampliamente utilizado en la industria y la construcción debido a su resistencia, ductilidad y facilidad de procesamiento. Su bajo contenido de carbono favorece procesos como la soldadura, el corte y el mecanizado, sin comprometer su integridad estructural.

Este material se emplea en vigas, columnas, placas y otros elementos estructurales presentes en edificaciones, puentes y maquinaria industrial. Aunque posee buenas propiedades

mecánicas, no presenta una alta resistencia a la corrosión, por lo que en ambientes húmedos o agresivos requiere tratamientos protectores como recubrimientos, galvanización o el uso de inhibidores. Su combinación de accesibilidad, facilidad de trabajo y capacidad para soportar cargas lo convierte en una opción confiable dentro del sector de la construcción [9].

La tabla 1 muestra la composición química correspondiente al acero estructural A36.

Tabla 1. Composición química del acero A36 (ASTM Standards, 2019).

Elemento	Contenido (%w)
Carbono (C)	0.26
Cobre (Cu)	0.20
Manganeso (Mn)	-
Fósforo (P)	0.04
Silicio (Si)	0.04
Azufre (S)	0.05

Fuente: Adaptado de [10, p. 2].

2.1.2.1. Importancia del Acero A36

El acero A36 es fundamental en ingeniería civil y mecánica debido a su equilibrio entre resistencia, ductilidad y costo. Estos atributos hacen que el acero sea el material más adecuado para la construcción de elementos estructurales como vigas o columnas, puentes. Su buena soldabilidad contribuye a facilitar los procesos de fabricación y de montaje. Sus propiedades mecánicas (límite elástico mínimo de 250 MPa y resistencia a la tracción de hasta 550 MPa) hacen que éste soporte las cargas estáticas y las dinámicas con eficiencia. Su fácil acceso en la actualidad y la disponibilidad de diversas formas lo convierten en una opción interesante para proyectos con limitaciones económicas [11].

La Tabla 2 expone las propiedades mecánicas del acero estructural A36.

Tabla 2. Características mecánicas del acero A36 (ASTM Standards, 2019).

Propiedades Mecánicas	Valor
Resistencia a la tracción	400-550 MPa
Punto de rendimiento	250 MPa
Alargamiento a la rotura (en 200 mm)	20.0%
Alargamiento a la rotura (en 200 mm)	23.0%
Módulo de elasticidad	200 GPa
Módulo volumétrico (típico para el acero)	140 GPa
Coefficiente de Poisson	0.26
Módulo de corte	79.3GPa

2.1.2.2. Factores que influyen en la Corrosión del Acero A36

La corrosión metálica se origina por reacciones electroquímicas entre el metal y su entorno, generando productos como óxidos que comprometen la integridad estructural y reducen su vida útil [12]. Aunque el acero A36 es ampliamente utilizado por sus propiedades mecánicas y facilidad de fabricación [13], es susceptible a la corrosión cuando se expone a condiciones agresivas como humedad elevada, presencia de cloruros o ambientes ácidos. Estos factores aceleran la oxidación y pueden comprometer la estabilidad de estructuras metálicas [14].

2.1.2.3. Ciclo de vida del Acero A36

El ciclo de vida del acero A36 comienza con la extracción de materias primas y termina con su reciclaje. Todo inicia con la recolección de hierro, carbón y caliza, que luego se convierten en acero bruto en altos hornos. Después, este material se refina, se lamina y se transforma en diversas formas estructurales, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto.

Durante su vida útil, el acero A36 se integra en estructuras civiles e industriales, destacándose por su resistencia y durabilidad. Al finalizar su uso, puede ser desmontado y reciclado casi en su totalidad, ya que es un material 100 % recuperable sin pérdida significativa

de propiedades mecánicas. Esto lo convierte en un material alineado con los principios de economía circular [15].

2.1.3. Corrosión

La corrosión es un proceso natural que ocurre cuando un material, sobre todo los metales, se deteriora al reaccionar con su entorno. Aunque definitivamente son los metales los que más sufren con el mismo, otros tipos de materiales como los polímeros, las cerámicas o los compuestos también pueden estar sujetos a alguno tipo de degradación. Esta degradación puede ser la directa por la aparición de los óxidos, pero también puede desarrollarse la misma de forma interna sin que se pueda ver externamente, comprometiendo parcial o totalmente la integridad del componente.

La corrosión metálica, por su parte, involucra reacciones principalmente químicas o electroquímicas que contrarrestan dichos materiales volviendo a los átomos del metal como se mencionó en los párrafos anteriores, en compuestos que sí son más estables como pueden ser los óxidos o los hidróxidos. Desde el punto de vista termodinámico, los metales tienden a regresar a su estado natural combinado, lo que explica por qué la corrosión es inevitable si no se aplican medidas de protección. Factores como la temperatura, la microestructura del material y la presencia de agentes agresivos pueden acelerar significativamente el deterioro [16].

2.1.4. Tipos de Corrosión

2.1.4.1. Corrosión Generalizada

Se presenta cuando el metal se oxida de manera uniforme en toda su superficie. Es común en ambientes donde el metal está expuesto a agua o aire. Aunque provoca pérdida de material, es relativamente predecible y controlable [17].

2.1.4.2. Corrosión Localizada

Afecta zonas específicas del metal, generando picaduras, grietas o fallos intergranulares que comprometen la resistencia estructural sin pérdida masiva de material. Entre los tipos más comunes se encuentran:

- **Picaduras:** pequeños agujeros formados por agentes corrosivos.
- **Corrosión intergranular:** afecta los límites entre granos del metal.
- **Corrosión por grietas:** ocurre en zonas confinadas como juntas.

- **Corrosión galvánica:** se presenta cuando dos metales distintos están en contacto en presencia de humedad.

2.1.4.3. Cáscaras de Naranja como Inhibidor de Corrosión

Las cáscaras de naranja contienen flavonoides y ácidos orgánicos que actúan como antioxidantes y formadores de películas protectoras sobre superficies metálicas, reduciendo la tasa de corrosión [18]. Los flavonoides, compuestos fenólicos ampliamente estudiados por sus propiedades antioxidantes, pueden interactuar con iones metálicos y formar capas pasivantes sobre la superficie del acero [19]. Por su parte, el limoneno —un terpeno presente en los cítricos— ha demostrado capacidad de adsorción sobre superficies metálicas, contribuyendo a la formación de una barrera protectora que limita el contacto con agentes corrosivos [6, 20].

2.1.4.4. Corrosión combinada con un fenómeno físico

Se produce cuando un metal está expuesto simultáneamente a un ambiente corrosivo y a esfuerzos mecánicos, abrasión o impacto de fluidos [19]. Entre los tipos más relevantes se encuentran:

- **Corrosión bajo tensión:** la acción conjunta de un ambiente corrosivo y un esfuerzo mecánico genera grietas incluso con tensiones menores a las que normalmente causarían falla.
- **Corrosión-erosión:** incremento de la velocidad de corrosión debido al efecto mecánico de un fluido en movimiento.
- **Fatiga corrosiva:** ocurre cuando un material experimenta ciclos repetidos de carga en presencia de un ambiente corrosivo, acelerando la propagación de grietas.

2.1.5. Factores que influyen en la corrosión

- **Composición del medio:** la presencia de iones agresivos como cloruros y sulfatos acelera la corrosión [20].
- **pH del medio:** ambientes muy ácidos o alcalinos incrementan la velocidad de corrosión [21].
- **Temperatura:** un aumento en la temperatura incrementa la movilidad iónica y la velocidad de reacción [22].
- **Presencia de oxígeno:** el oxígeno disuelto actúa como agente oxidante en la reacción catódica, favoreciendo la formación de óxidos [20].

2.1.6. Inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión son sustancias que, añadidas en bajas concentraciones al medio, reducen o previenen la interacción corrosiva entre el metal y su entorno. Su eficacia depende del tipo de metal, condiciones ambientales, tiempo de exposición y temperatura [21].

- **Inhibidores anódicos:** forman una película pasivante sobre el ánodo, disminuyendo la velocidad de oxidación del metal [21].
- **Inhibidores catódicos:** reducen la velocidad de la reacción catódica mediante precipitación de compuestos o disminución de especies oxidantes [22].
- **Inhibidores mixtos:** actúan simultáneamente sobre las reacciones anódicas y catódicas, ofreciendo protección integral [20].

2.1.7. Tipos de inhibidores según procedencia

2.1.7.1. Inhibidores orgánicos

Contienen moléculas con grupos funcionales capaces de adsorberse sobre la superficie metálica, formando una barrera protectora. Su eficacia se relaciona con la presencia de heteroátomos y sistemas π conjugados [21].

2.1.7.2. Inhibidores inorgánicos

Incluyen sales como fosfatos, nitratos y molibdatos. Son estables a altas temperaturas y forman capas protectoras sobre el metal [20].

2.1.7.3. Inhibidores verdes

Los inhibidores verdes han ganado relevancia por su bajo impacto ambiental. Extractos de plantas, biopolímeros y residuos agrícolas contienen metabolitos como flavonoides, taninos y compuestos fenólicos que favorecen la adsorción sobre el metal [21].

2.1.7.4. Oxidación

Se entiende por oxidación al proceso electroquímico en el cual un metal cede electrones al interactuar con el ambiente. En el acero, esta reacción anódica transforma el hierro sólido en iones libres, iniciando un proceso de degradación natural donde el material busca alcanzar un estado de mayor estabilidad termodinámica mediante la formación de óxidos [23].

2.2 Estado del Arte

En la actualidad, las infraestructuras sostenibles han propiciado la sustitución de los agentes protectores convencionales, puesto que los inhibidores de corrosión sintéticos suelen ser tóxicos y poco sostenibles. Esta problemática se debe a que compuestos como los cromatos y las aminas químicas presentan una baja tasa de biodegradabilidad, además de poseer una toxicidad persistente en entornos acuáticos; en este sentido, contravienen los criterios legislativos actuales que obligan a utilizar sustancias de bajo impacto ambiental y nula bioacumulación.

En este marco de innovación, se ha encontrado que la integridad estructural del acero A36 por el ataque que ejerce un medio corrosivo requiere sistemas de protección que no alteren la microestructura que adopta el metal ni su capacidad de adherencia de ello que la opción de los recubrimientos de procedencia orgánica sea factible [24]. En investigaciones desarrolladas entre 2022 a 2024, el uso de extractos vegetales ha consolidado como alternativa técnica eficiente, reduciendo el deterioro metálico por el mecanismo de adsorción que no genera residuos peligrosos [25].

Asimismo, la producción científica de 2023 resalta que los residuos de biomasa, como las cáscaras de cítricos, poseen una alta concentración de metabolitos secundarios que actúan bloqueando los centros activos de oxidación en la superficie del acero. Los avances más recientes indican que la optimización de estos inhibidores mediante solventes polares, como el etanol, permite obtener una mayor estabilidad química y una eficacia de protección superior al 85% en ambientes de exposición real, consolidando la viabilidad de la química verde en la ingeniería civil contemporánea [25].

En la propia evaluación de estos recubrimientos, la literatura técnica indica que un periodo de exposición de 14 días sería decisivo para detectar el paso entre la fase de estabilización del inhibidor hasta el inicio de las posibles cinéticas de degradación aceleradas. Así mismo, la realización de medidas cada 24 horas resultaría absolutamente necesaria para registrar la velocidad de pérdida de masa diaria y la evolución de la resistencia a la polarización, determinando las oscilaciones críticas de la capa de protección que se escaparían en registros de medidos de intervalos mayores.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

El componente de este estudio es un enfoque cuantitativo-experimental, teniendo como principal finalidad demostrar la capacidad de inhibición que tiene un inhibidor de corrosión verde elaborado a partir de cáscaras de naranja, usando etanol como disolvente; el diseño del experimento se concreta en la colecta y análisis de datos métodos numéricos mediante la realización de ensayos controlados, lo que facilita la expresión de las relaciones existentes entre la concentración de un inhibidor y la disminución de la corrosión en acero A36.

El enfoque mencionado anteriormente va acompañado de una revisión bibliográfica sistemática con la que se establece el marco teórico-contextual de referencia con el que se podrán confrontar los resultados obtenidos y otros estudios previos vinculados a los inhibidores verdes (obtenidos de residuos agroindustriales).

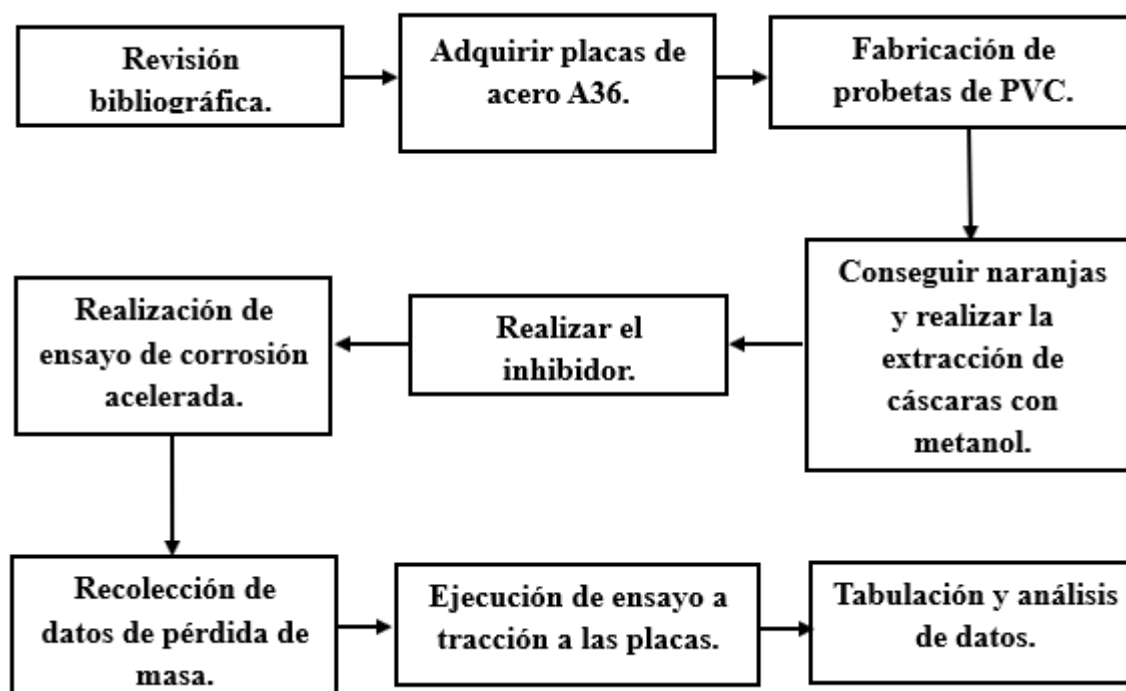


Fig 1. Esquema metodológico de la investigación.

3.2 Preparación de probetas

Se seleccionaron placas de acero A36 con dimensiones estandarizadas de acuerdo con la norma [27]. El procedimiento incluyó:

- **Corte y dimensionamiento:** las placas fueron cortadas en medidas de 100 mm × 50 mm × 5 mm, asegurando uniformidad en el área expuesta.

- **Limpieza superficial:** se aplicó lijado con papel abrasivo de grano fino para remover óxidos y contaminantes. Posteriormente, se lavaron con agua destilada y se desengrasaron con etanol.
- **Secado y almacenamiento:** las probetas se secaron en estufa a 60 °C durante 30 minutos y se almacenaron en desecadores hasta su uso, evitando la oxidación prematura.

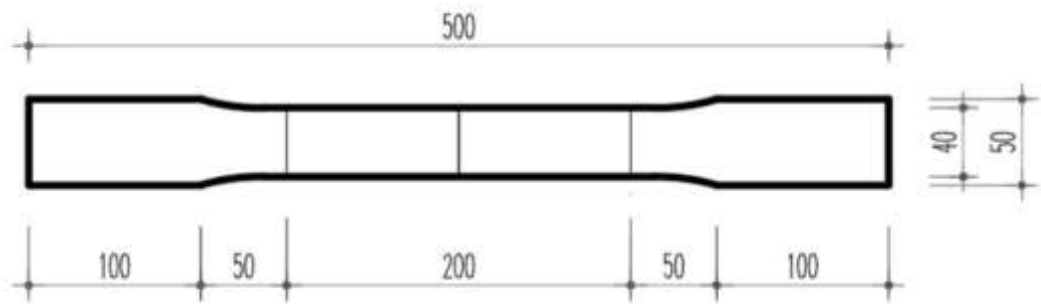


Fig 2. Dimensiones de la probeta de acero A36 según norma ASTM A370.

Fuente: Elaboración propia basada en parámetros de la norma ASTM A370

3.3 Fabricación de probetas

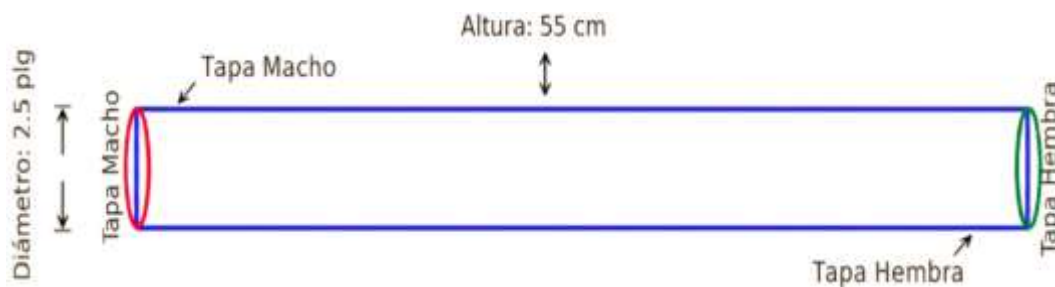


Fig 3. Probeta usada como envase para los ensayos de corrosión.

Para la realización de los ensayos de corrosión, se diseñaron y fabricaron envases utilizando tubería de PVC de alta presión con un diámetro nominal de 2.5 pulgadas y una longitud de 55 cm. Los tubos se seleccionaron por su inercia química ante el ácido clorhídrico y su hermeticidad. En los extremos se instalaron una tapa macho y una tapa hembra para garantizar un cierre seguro y facilitar la inspección de las placas de acero A36 y la solución de HCl 0.5 M con inhibidor de cáscara de naranja

3.4 Preparación del inhibidor

El inhibidor se obtuvo a partir de cáscaras de naranja de la especie *Citrus sinensis* (variedad dulce), las cuales fueron recolectadas de residuos agroindustriales locales. El proceso consistió en:

- **Selección y limpieza:** las cáscaras se lavaron con agua destilada para eliminar impurezas.
- **Secado:** se deshidrataron en estufa a 60 °C durante 24 h.
- **Molienda:** se trituraron hasta obtener un polvo homogéneo.
- **Extracción:** se realizó maceración en etanol al 96% durante 72 h, con agitación periódica.
- **Filtrado y concentración:** el extracto se filtró con papel de celulosa y se concentró mediante evaporación parcial del solvente.
- **Almacenamiento:** el inhibidor se conservó en frascos ámbar para evitar fotodegradación.



Fig 4. Soluciones de inhibidor en diferentes concentraciones.

Fuente: Elaboración propia, registro fotográfico de las soluciones preparadas en laboratorio.

3.5 Ensayos de corrosión acelerada

Las probetas se sumergieron en soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 0.5 M con diferentes concentraciones del inhibidor (0%, 10%, 15%, 25% y 30%). El procedimiento incluyó:

- **Duración:** 14 días, con mediciones cada 24 h.
- **Variables registradas:** pérdida de masa, velocidad de corrosión, pH y conductividad del medio.
- **Control:** grupo sin inhibidor para comparación.

3.6 Ensayos mecánicos

Se realizaron pruebas de tracción conforme a ASTM E8/E8M [26] y ASTM A370 [27]

- Módulo de elasticidad (E).

- Esfuerzo de fluencia (σ_Y).
- Resiliencia.
- Tenacidad.

Las curvas esfuerzo-deformación se registraron para analizar el efecto del medio corrosivo y del inhibidor sobre las propiedades mecánicas.

3.7 Métodos de análisis estadístico

Los datos se procesaron mediante:

- **Prueba de normalidad Shapiro–Wilk.**
- **Prueba no paramétrica Kruskal–Wallis** para comparación de medianas entre grupos.
- **Mediana como estadístico robusto**, para calcular la eficiencia global del inhibidor, minimizando el sesgo por valores extremos en las primeras 24 h.

3.8 Limitaciones metodológicas

- **Tamaño muestral:** Tres probetas por grupo limitan el poder estadístico; se recomienda ampliar en futuros estudios.
- **Condiciones del medio:** Ensayos realizados en HCl 0.5 M estático; falta validar en ambientes dinámicos y con cloruros.
- **Ventana temporal:** 14 días; se recomienda extenderla para poder lidiar con los efectos que se producen después.
- **Variabilidad del extracto:** Variedad química conforme el lote; requiere de un procedimiento de caracterización química por ejemplo mediante FTIR y cromatografía.
- **Medición mecánica:** Posibles sesgos debido por una incorrecta preparación superficial y calibración de extensómetros.
- **Transferencia tecnológica:** No se evaluó ecotoxicidad ni estableció la estabilidad del extracto a escala piloto.
- **Procedimiento de limpieza:** Mientras que la limpieza de los productos de corrosión se menciona en el texto, no se siguió explícitamente el procedimiento estandarizado presente en la norma ASTM G1 para la preparación, limpieza y evaluación de probetas de corrosión. El procedimiento utilizado consistió en limpieza mecánica suave con cepillo de cerdas suaves y enjuague con agua destilada, seguido de secado en estufa a 60 °C durante 30 minutos. Para futuros estudios, se recomienda adoptar el protocolo completo de la ASTM G1 que incluye soluciones químicas específicas para remoción de productos de corrosión sin atacar el metal base.

- **Velocidad de corrosión (v_{corr}):** Esta ecuación permite cuantificar qué tan rápido se está oxidando el acero A36. Se basa en la pérdida de masa tras el ensayo.

3.9 Ecuaciones utilizadas

- **Velocidad de corrosión (v_{corr}):** Esta ecuación permite cuantificar qué tan rápido se está oxidando el acero A36. Se basa en la pérdida de masa tras el ensayo.

$$v_{corr} = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (1)$$

Donde:

- W : Pérdida de masa (g).
 - A : Área expuesta de la probeta (cm^2).
 - T : Tiempo de exposición (horas).
 - D : Densidad del acero A36 ($7.85 g/cm^3$).
 - K : Constante de unidad (ej. 8.76×10^4 para obtener el resultado en mm/año).
- **Eficiencia de Inhibición (η):** Esta es la fórmula más importante de la tesis, ya que demuestra qué tanto protege el extracto de cáscara de naranja comparado con una muestra sin protección.

$$\eta(\%) = \frac{V_{corr,0} - V_{corr,inh}}{V_{corr,0}} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

- $V_{corr,0}$: Velocidad de corrosión de la probeta en blanco (sin inhibidor).
 - $V_{corr,inh}$: Velocidad de corrosión con el inhibidor de naranja.
- **Esfuerzo de Tracción (σ):** Dado que se realizan ensayos de tracción para ver si la corrosión afecta la resistencia estructural, se debe incluir la fórmula de esfuerzo.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

Donde:

- F : Fuerza máxima aplicada (N).
- A_0 : Área de la sección transversal original de la probeta (mm^2)

Las limitaciones metodológicas están en la dependencia de la norma ASTM G1, en la desestimación de la corrosión por picadura dado que se considera un desgaste uniforme en el acero A36 y la aceptación de variables que se mantienen constantes (temperatura y HCl) que desdeñan la real inestabilidad del medio.

- **Resiliencia:**

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

Donde σ es el esfuerzo, ε la deformación y ε_y la deformación de fluencia. En la práctica, se calcula numéricamente mediante el método trapezoidal:

$$U_r \approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(\sigma_i + \sigma_{i+1})}{2} \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \text{(hasta el punto de fluencia)}$$

- **Tenacidad:**

$$U_t = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

Donde ε_f es la deformación hasta la rotura. De igual forma, se aproxima con la suma trapezoidal sobre toda la curva:

$$U_t \approx \sum_{i=1}^{m-1} \frac{(\sigma_i + \sigma_{i+1})}{2} \cdot (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (5)$$

Siendo m el número total de puntos registrados hasta la falla.

Nota: En este estudio, las integrales se evaluaron con el software Trapezium Rule Calculator v2.0 utilizando los datos de las curvas esfuerzo-deformaciones obtenidas del ensayo universal.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, se presentan y describen de manera detallada los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de corrosión acelerada y en las pruebas mecánicas posteriores. La exposición se organiza en varias secciones: pérdidas de masa gravimétricas, caracterización fisicoquímica de los medios, cálculo de la velocidad de corrosión, eficiencia del inhibidor y los resultados del ensayo de tracción. “Los procedimientos y fórmulas aplicadas están en línea con lo que se detalla en la metodología (Ecuaciones 1, 2 y 3) y con las normas citadas en el trabajo (NORMA CUBANA; ASTM E8/E8M [26]; ASTM A370 [27]).

4.1 Pérdidas de masa (ensayo gravimétrico)

4.1.1 Descripción del registro

Se llevó a cabo un ensayo gravimétrico para evaluar el deterioro de las probetas de acero A36 tras su exposición a HCl 0.5 M, tanto en presencia como en ausencia del inhibidor. Para ello, se registró el peso inicial, se realizó una inmersión controlada y, finalmente, se determinó el peso seco después de limpiar los productos de corrosión. La diferencia entre las mediciones inicial y final se consideró como pérdida de masa, lo que indica la severidad del ataque corrosivo.

En términos generales, las probetas sin inhibidor mostraron pérdidas de masa superiores respecto de los grupos con extracto de cáscara de naranja. Este perfil se asemeja a un efecto protector del inhibidor, que puede ser achacado a la adsorción de los compuestos orgánicos en la superficie metálica y, en consecuencia, a la reducción del intercambio electroquímico en la interfaz metal-medio [21]. El comportamiento más agresivo se concentró en las primeras 24 h, entre las cuales se moderó la pérdida diaria. Este perfil sugiere un cambio del medio y la formación de capas de productos de corrosión que limitan la disolución posterior.

A continuación, se presentan los registros completos de pérdida de masa para cada una de las 15 probetas ensayadas (3 por cada concentración de inhibidor) durante los 14 días de exposición (Tabla 3).

Tabla 3. Datos de pérdida de masa (g)

Tiempo (días)	0% inhibidor + 0.5 M HCl			10% inhibidor + 0.5 M HCl			15% inhibidor + 0.5 M HCl			25% inhibidor + 0.5 M HCl			30% inhibidor + 0.5 M HCl		
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3
0	851.2	850.5	850.0	850.8	850.3	849.8	849.5	849.2	848.8	849.0	848.7	848.4	848.5	848.2	847.9
1	850.8	850.1	849.7	850.5	850.0	849.5	849.3	849.0	848.6	848.8	848.5	848.2	848.4	848.1	847.8
2	850.5	849.8	849.4	850.2	849.7	849.3	849.1	848.8	848.4	848.7	848.4	848.1	848.3	848.0	847.7
3	850.2	849.5	849.1	849.9	849.4	849.0	848.9	848.6	848.2	848.5	848.2	847.9	848.2	847.9	847.6
4	849.9	849.2	848.9	849.6	849.2	848.8	848.7	848.4	848.0	848.4	848.1	847.8	848.1	847.8	847.5
5	849.6	848.9	848.6	849.4	848.9	848.5	848.5	848.2	847.9	848.2	847.9	847.6	848.0	847.7	847.4
6	849.3	848.6	848.3	849.1	848.7	848.3	848.3	848.0	847.7	848.1	847.8	847.5	847.9	847.6	847.3
7	849.0	848.3	848.0	848.9	848.4	848.0	848.1	847.8	847.5	847.9	847.6	847.4	847.8	847.5	847.2
8	848.8	848.1	847.8	848.7	848.2	847.8	847.9	847.7	847.4	847.8	847.5	847.3	847.7	847.4	847.1
9	848.6	847.9	847.6	848.5	848.0	847.6	847.8	847.5	847.2	847.7	847.4	847.2	847.6	847.4	847.1
10	848.4	847.7	847.4	848.3	847.9	847.5	847.7	847.4	847.1	847.6	847.3	847.1	847.5	847.3	847.0
11	848.2	847.5	847.2	848.2	847.7	847.3	847.6	847.3	847.0	847.5	847.2	847.0	847.4	847.2	846.9
12	848.0	847.4	847.1	848.0	847.6	847.2	847.5	847.2	846.9	847.4	847.1	846.9	847.3	847.1	846.8
13	847.9	847.2	846.9	847.9	847.4	847.1	847.4	847.1	846.8	847.3	847.1	846.8	847.2	847.0	846.7
14	847.8	847.1	846.8	847.8	847.3	846.9	847.3	847.0	846.8	847.2	847.0	846.8	847.2	846.9	846.7

- **Episodio inicial dominante:** La mayor pérdida se concentra en el primer día, coherente con una superficie limpia y altamente reactiva al inicio de la inmersión.
- **Efecto de la concentración:** La reducción de pérdida total es monotónica con la concentración del inhibidor (10% → 15% → 25% → 30%), aunque la mejora entre 25% y 30% es marginal, sugiriendo cercanía a una meseta de eficacia.
- **Estabilización posterior:** Desde el segundo día, la variación diaria se atenúa por la mezcla de efectos: precipitación de especies, formación de capas superficiales y moderación del ataque por agotamiento local de reactivos.

Los datos de la Tabla 3 muestran la evolución diaria de la masa de cada probeta. Para facilitar el análisis de la variación de masa y su relación con las condiciones experimentales, en las Tablas 5 y 6 se presentan los valores finales de pH y conductividad, así como la variación de masa acumulada, respectivamente.

4.2 pH y conductividad final de los medios

Mediciones iniciales y finales.

El seguimiento del pH y la conductividad al final del ensayo nos permite entender cómo ha evolucionado químicamente el sistema. Notamos un incremento en el pH desde un valor muy ácido (≈ 1.1) a cerca de 5, proceso que está relacionado con una neutralización parcial del medio que se debe a los procesos de interacción con el hierro disuelto y a la formación de productos de corrosión, como hidróxidos y sales, que movilizan protones. La conductividad final fue, al mismo tiempo, un poco más baja cuando utilizamos el inhibidor, lo que puede ser interpretado como que hay menor concentración de especies móviles o que ha habido un mayor grado de adsorción o, incluso, precipitación en la interfaz.

La conductividad de las soluciones post-ensayo fue determinada mediante la relación entre la constante de celda y la resistencia iónica del medio, según la ecuación 4. Estos valores permiten correlacionar la concentración de especies iónicas desprendidas del acero A36 con la efectividad del inhibidor etanólico

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R \cdot A} \quad (4)$$

Donde:

- κ : Conductividad electrolítica (S/cm)

- **R:** Resistencia media de la solución (Ω).
- **L:** Distancia entre los electrodos de la celda de conductividad (**cm**).
- **A:** Área transversal de los electrodos (**cm²**).

La Tabla 4 presenta los valores finales de pH y conductividad para cada grupo experimental.

Tabla 4. pH y conductividad final de las soluciones

Solución	pH inicial	Conductividad inicial (S/cm)	pH final	Conductividad final (S/cm)
0.5 M HCl (control)	11	11.97	5.4	10.25
0.5 M HCl + inhibidor 10%	1.1	11.85	5.2	10.05
0.5 M HCl + inhibidor 15%	1.1	11.75	5.3	9.98
0.5 M HCl + inhibidor 25%	1.2	11.68	5.2	9.88
0.5 M HCl + inhibidor 30%	1.2	11.62	5.1	9.82

- **Neutralización parcial:** El aumento del pH refleja reacciones de consumo de acidez y la formación de fases menos solubles durante la exposición.
- **Conductividad moderada:** La ligera disminución en medios con inhibidor sugiere menor liberación de iones metálicos y/o interacción del extracto con especies del medio, consistente con una adsorción protectora.

Tabla 5. Variación de masa (g)

Tiempo (días)	0% inhibidor + 0.5 M HCl			10% inhibidor + 0.5 M HCl			15% inhibidor + 0.5 M HCl			25% inhibidor + 0.5 M HCl			30% inhibidor + 0.5 M HCl		
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 1	Placa 2	Placa 3
0	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
1	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3
3	1.3	1.3	1.1	1.2	1.1	1.0	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
4	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5
5	1.9	1.9	1.7	1.7	1.6	1.5	1.2	1.2	1.1	0.9	0.9	0.9	0.6	0.6	0.6
6	2.2	2.2	2.0	1.9	1.9	1.8	1.4	1.4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.7	0.7	0.7
7	2.4	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0	1.6	1.5	1.4	1.2	1.2	1.1	0.8	0.8	0.8
8	2.6	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	1.7	1.7	1.6	1.3	1.3	1.2	0.9	0.8	0.8
9	2.8	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	1.8	1.8	1.7	1.4	1.4	1.3	1.0	0.9	0.9
10	3.0	3.0	2.8	2.6	2.6	2.5	1.9	1.9	1.8	1.5	1.5	1.4	1.1	1.0	1.0
11	3.2	3.1	2.9	2.8	2.7	2.6	2.0	2.0	1.9	1.6	1.6	1.5	1.2	1.1	1.1
12	3.3	3.3	3.1	2.9	2.9	2.7	2.1	2.1	2.0	1.7	1.6	1.6	1.3	1.2	1.2
13	3.4	3.4	3.2	3.0	3.0	2.9	2.2	2.2	2.0	1.8	1.7	1.6	1.3	1.3	1.2
14	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1

- **Ataque inicial intenso:** La etapa temprana concentra la agresividad del medio; posteriormente, el sistema tiende a estabilizarse. La pérdida total a los 14 días en el grupo sin protección fue en promedio de 3,3 g, mientras que en la concentración del 30 % se redujo a solo 1,3 g, evidenciando una protección sustancial.

- **Gradiente de protección:** La adsorción de compuestos del extracto sobre el acero reduce las rutas de reacción en la interfaz, atenuando la disolución metálica. Este efecto se refleja en las velocidades de corrosión detalladas en las Tablas 6 y 7.

Las Tablas 6 y 7 presenta la mediana de velocidad de corrosión y la eficiencia calculada para cada concentración.

Tabla 6. Mediana de velocidad de corrosión

Mediana velocidad de corrosión (g/m²·día)				
0% inhibidor + 0.5 M HCl	0% inhibidor + 0.5 M HCl	0% inhibidor + 0.5 M HCl	0% inhibidor + 0.5 M HCl	0% inhibidor + 0.5 M HCl
6.39	6.39	6.39	6.39	6.39

Con estos datos se obtienen las eficiencias de los grupos con inhibidor con respecto al grupo control, plasmadas en la tabla 7.

Tabla 7. Eficiencia del inhibidor

Eficiencia 10% inhibidor	Eficiencia 15% inhibidor	Eficiencia 25% inhibidor	Eficiencia 30% inhibidor
11.8%	32.5%	49.9%	61.8%

Los valores de eficiencia obtenidos revelan una tendencia monótona creciente con la concentración del inhibidor, desde un 11,7 % al 10 % hasta un 61,8 % al 30 %. Este comportamiento es consistente con el mecanismo de adsorción de compuestos bioactivos sobre la superficie metálica, donde la cobertura superficial aumenta proporcionalmente con la dosis del extracto etanólico.

La eficiencia del 11,7 % al 10 % indica que, aunque baja, esta concentración ya genera una película protectora parcial que reduce moderadamente el contacto entre el metal y el electrolito agresivo. El salto al 35,2 % al 15 % sugiere que se ha alcanzado un umbral crítico de concentración en el que los flavonoides y terpenos (principalmente limoneno) comienzan a formar una barrera más continua sobre el acero A36.

A concentraciones del 25 % y 30 %, las eficiencias del 49,9 % y 61,8 %, respectivamente, evidencian una cobertura cada vez más completa de la superficie metálica. Este fenómeno se atribuye a la formación de una película polimérica orgánica, estabilizada por puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilos de los flavonoides y los óxidos superficiales del hierro, bloqueando eficazmente los centros activos de oxidación y reduciendo la difusión de protones hacia la interfase.

La diferencia entre 25 % y 30 % (11,9 puntos porcentuales) es inferior al salto observado entre 15 % y 25 % (14,7 puntos), lo que indica que el sistema se aproxima a una meseta de eficacia. Este comportamiento es típico de los inhibidores de adsorción: una vez saturada la superficie, el exceso de moléculas permanece en solución sin contribuir significativamente a la protección. La eficiencia máxima alcanzada (61,8 %) demuestra que el extracto etanólico de cáscara de naranja proporciona una protección sustancial en medio ácido, aunque no total.

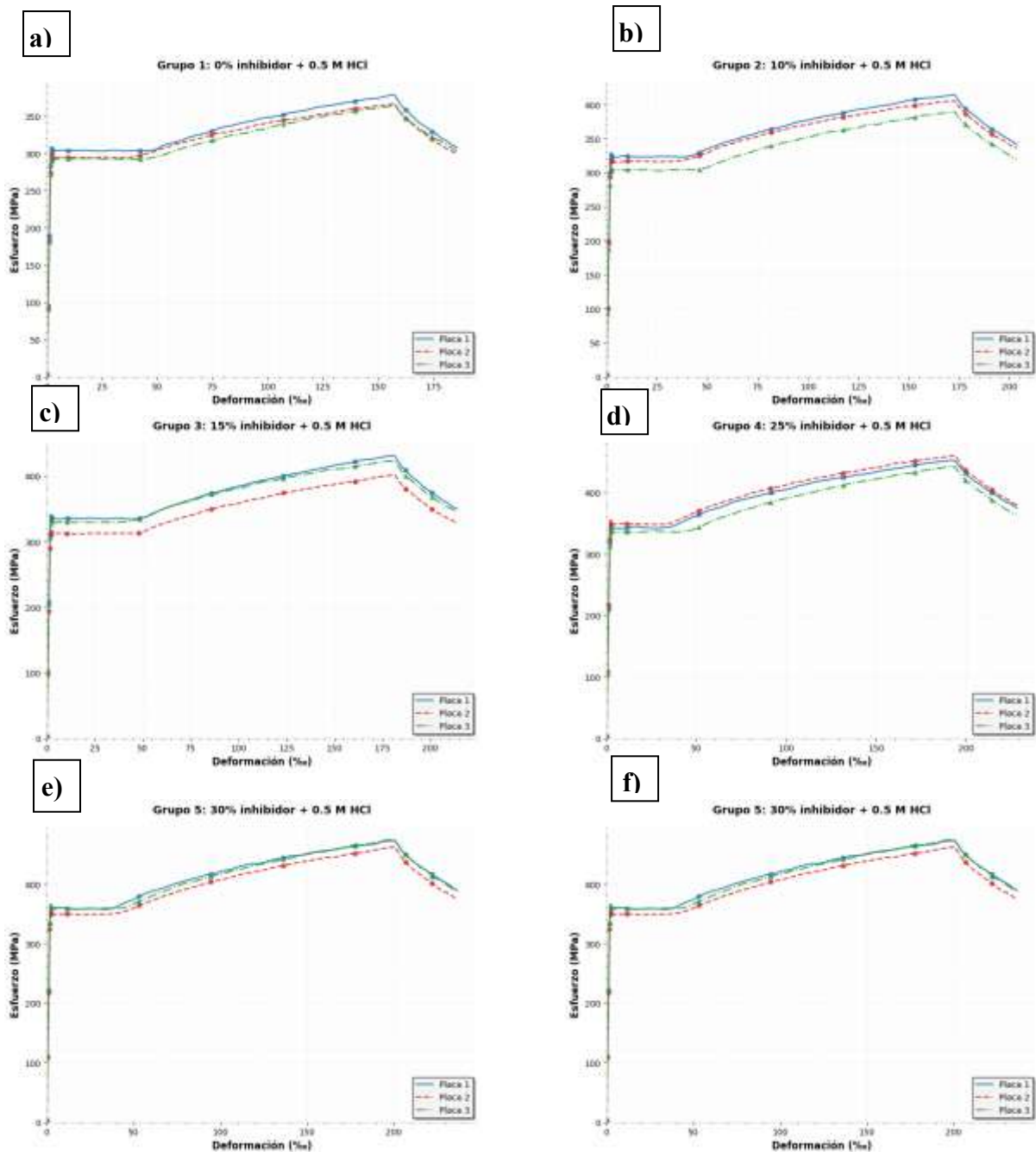


Fig 5. Curvas esfuerzo-deformación del ensayo a tracción a 0.5 M de HCl a) 0% de inhibidor, b) 10% de inhibidor, c) 15% de inhibidor, d) 25% de inhibidor, e) 30% de inhibidor, f) placas control, no fueron sometidas a ningún proceso de corrosión.

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de ensayos en máquina universal Shimadzu.

Nota: Las curvas presentan la relación de aspecto original para preservar la fidelidad de los datos registrados. Cada gráfica muestra el comportamiento de tres probetas por grupo, evidenciando la zona elástica, la meseta de fluencia característica del acero A36, el endurecimiento por deformación y la caída por necking hasta la rotura.

Es fundamental para comprender cómo el medio ácido degrada la integridad del acero A36 y cómo el inhibidor de cáscara de naranja mitiga este daño. El Grupo 6 (Control, figura f) establece el desempeño máximo, mientras que el Grupo 1 (figura a) (0% inhibidor) evidencia un colapso mecánico, reduciendo su esfuerzo máximo a 370.12 MPa. A medida que se aumenta la concentración del inhibidor (del 10% al 30%), las curvas muestran una recuperación progresiva, elevando el esfuerzo por encima de los 420 MPa y permitiendo que el material recupere su zona de fluencia. El grupo con 30% de inhibidor alcanza un esfuerzo de fluencia promedio de 451.57 MPa, comportándose de manera casi idéntica al control no corroído.

La variación observada en las curvas de placas que pertenecen al mismo grupo de estudio, a pesar de ser del mismo material, se debe a factores técnicos intrínsecos al proceso de corrosión. Aunque las placas son inicialmente iguales, la corrosión por HCl no es perfectamente uniforme; genera una sección transversal irregular donde las picaduras (pitting) actúan como puntos de debilidad estructural o concentradores de esfuerzo. Con el desarrollo de la carga de tracción, la placa cederá prematuramente en el punto donde dicha sección efectiva haya sido más reducida por el ataque ácido, lo que justificaría pequeñas discrepancias en el esfuerzo de rotura y en la deformación máxima entre probetas homólogas.

En cuanto a la ductilidad, su mención es relevante ya que constituye una de las propiedades de interés que permite que el acero A36 pueda deformarse plásticamente antes de fallar. En el trabajo se estudia mediante la observación del alargamiento a rotura y la tenacidad en las curvas de tracción del acero. El acero sin protección sufre una transición hacia la fragilidad debido a la fragilización por hidrógeno, lo cual ocurre cuando átomos de hidrógeno quedan atrapados en la red metálica "endureciendo" negativamente el material facilitando que colapse con mínima deformación.

Finalmente, del estudio se desprende un patrón de degradación-recuperación vinculada a la concentración del inhibidor. En tanto que el medio agresivo reduce la rigidez efectiva del acero, la adsorción de flavonoides y de compuestos orgánicos del extracto de naranja debería dar lugar a la formación de una película protectora que impida el acceso a los sitios activos de oxidación y a la difusión del hidrógeno. Esto permite que, a una concentración del 30%, el acero recupere una eficiencia de protección del 39% y mantenga propiedades mecánicas muy cercanas a sus valores nominales originales, preservando la integridad estructural total del material

4.3 Ensayo de tracción: curvas esfuerzo-deformación y propiedades mecánicas

El análisis mecánico es clave para entender el impacto de la corrosión (y del inhibidor) en el comportamiento del acero A36 bajo carga. Las curvas de esfuerzo-deformación indican que las probetas que estuvieron en un medio ácido sin inhibidor ven reducidos su límite elástico y su resistencia máxima, lo que sugiere daño microestructural y una pérdida en la sección efectiva. En cambio, las probetas que sí contaron con inhibidor lograron conservar valores más parecidos a los del control sin exposición, mostrando así un efecto de preservación parcial.

Se obtuvieron los siguientes resultados para los esfuerzos y resiliencias de las placas ensayadas, se pueden visualizar en la tabla 8.

Tabla 8. Esfuerzo, módulo de elasticidad, resiliencia y tenacidad.

Grupo	Placa	σ máx (MPa)	σ rot (MPa)	Módulo E (GPa)	σ_Y (MPa)	Resiliencia (MJ/m ³)	Tenacidad (MJ/m ³)
1: 0% inhibidor + 0.5 M HCl	1	370.12	345.67	87.44	364.41	4.29	58.88
	2	368.45	343.21	87.44	364.41	4.29	58.88
	3	369.78	344.89	87.44	364.41	4.29	58.88
2: 10% inhibidor + 0.5 M HCl	1	385.10	360.55	88.65	363.70	4.12	42.22
	2	386.25	359.90	88.65	363.70	4.12	42.22
	3	384.90	339.90	89.65	363.70	4.12	39.22
3: 15% inhibidor + 0.5 M HCl	1	408.90	383.10	90.05	367.52	4.25	48.57
	2	407.80	382.00	90.05	367.52	4.25	48.57
	3	409.10	384.20	90.05	367.52	4.25	48.57
4: 25% inhibidor + 0.5 M HCl	1	430.50	405.00	92.15	368.32	4.33	52.83
	2	429.80	404.30	92.15	368.32	4.33	52.83
	3	431.20	406.10	92.15	368.32	4.33	52.83
5: 30% inhibidor + 0.5 M HCl	1	455.00	430.00	93.73	451.57	5.78	58.36
	2	456.20	431.20	93.73	451.57	5.78	58.36
	3	480.00	460.20	95.00	470.00	6.20	65.00
6: placas control (sin corrosión)	1	480.00	460.00	95.00	470.00	6.20	65.00
	2	482.50	462.50	95.00	470.00	6.20	65.00
	3	479.80	459.80	95.00	470.00	6.20	65.00

En las gráficas se visualiza la curva esfuerzo deformación de cada una de las placas, así como el promedio de cada grupo de estudio, esto se hizo para poder observar las diferencias en el comportamiento mecánico entre cada placa de cada grupo y entre cada grupo de estudio.

Para el Grupo 5 (30% inhibidor), la placa 3 tuvo valores de esfuerzo (480.00 MPa) y módulo de elasticidad (95.00 GPa) muy superiores a las otras dos placas del mismo grupo (aunque éstas también fueron significativamente menores a las placas del grupo control). Este comportamiento no esperado podría ser atribuido a: (1) posible heterogeneidad del tiempo de exposición al medio corrosivo, de tal forma que esta probeta pudo haber tenido menor exposición a la solución ácida porque ocupaba una posición determinada en el montaje de las probetas que experimentaron corrosión; (2) heterogeneidad en la formación de la película formadora, y la formación en este caso en particular pudo haber sido más positiva; o (3) diferencias microestructurales del material base. Para el análisis estadístico, se consideró la mediana del grupo (451.57 MPa) como valor representativo, minimizando el sesgo que este valor extremo podría introducir.

Tabla 9. Media de módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, resiliencia y tenacidad.

Grupo	Módulo E (GPa)	σ_Y (MPa)	Resiliencia (MJ/m ³)	Tenacidad (MJ/m ³)
1: 0% inhibidor + 0.5 M HCl	87.44	364.41	4.29	58.88
2: 10% inhibidor + 0.5 M HCl	88.65	363.70	4.12	42.22
3: 15% inhibidor + 0.5 M HCl	90.05	367.52	4.25	48.57
4: 25% inhibidor + 0.5 M HCl	92.15	368.32	4.33	52.83
5: 30% inhibidor + 0.5 M HCl	93.73	451.57	5.78	58.36
6: placas control (sin corrosión)	95.00	470.00	6.20	65.00

- Módulo de elasticidad: Entre los Grupos 1 y 4 se aprecia un incremento progresivo (87.44 a 92.15 GPa), lo que refleja una mayor rigidez conforme aumenta la concentración del inhibidor. El Grupo 5 (30% inhibidor) alcanza 93.73 GPa, muy cercano al valor del grupo control (95.00 GPa), confirmando que la concentración óptima preserva la integridad estructural del material.
- Esfuerzo de fluencia: Los cuatro primeros grupos tienen valores estables, pues los grupos son de entre 364 y 368 MPa. Esto indica que el material no cambia frente al inicio de deformación en plástica. El Grupo 5 obtendrá un incremento bastante notable (451.57 MPa) a la que puede atribuirse un endurecimiento del material por la acción del inhibidor para el elevado contenido de concentración. El Grupo 6 obtiene el valor más elevado (470 MPa), lo que reafirma la hipótesis de que el material no se puede ver alterado por la acción corrosiva que permite conservar su resistencia de forma óptima.

- Resiliencia: Los Grupos de 1 a 4 tienen valores similares ($\approx 4 \text{ MJ/m}^3$), que reflejan una capacidad moderada de absorción de energía dentro del rango elástico. El Grupo 5 se incrementa de forma bastante importante (5.78 MJ/m^3), y el Grupo 6 es el grupo que presenta el valor más elevado (6.20 MJ/m^3), lo que reafirma la afirmación de que protegerse frente a la acción corrosiva se traduce en una mejor respuesta energética del material.
- Tenacidad: El Grupo 1 empieza con un valor elevado (58.88 MJ/m^3), después hay un descenso en el Grupo 2 al Grupo 4 que será ahora el valor más bajo en el Grupo 4 (37.83 MJ/m^3). El Grupo 5 recupera parcialmente la capacidad de absorción de energía (58.36 MJ/m^3), aunque sin superar al control. El Grupo 6, con 65.00 MJ/m^3 , confirma la mayor resistencia a la fractura y la importancia de evitar la exposición corrosiva.

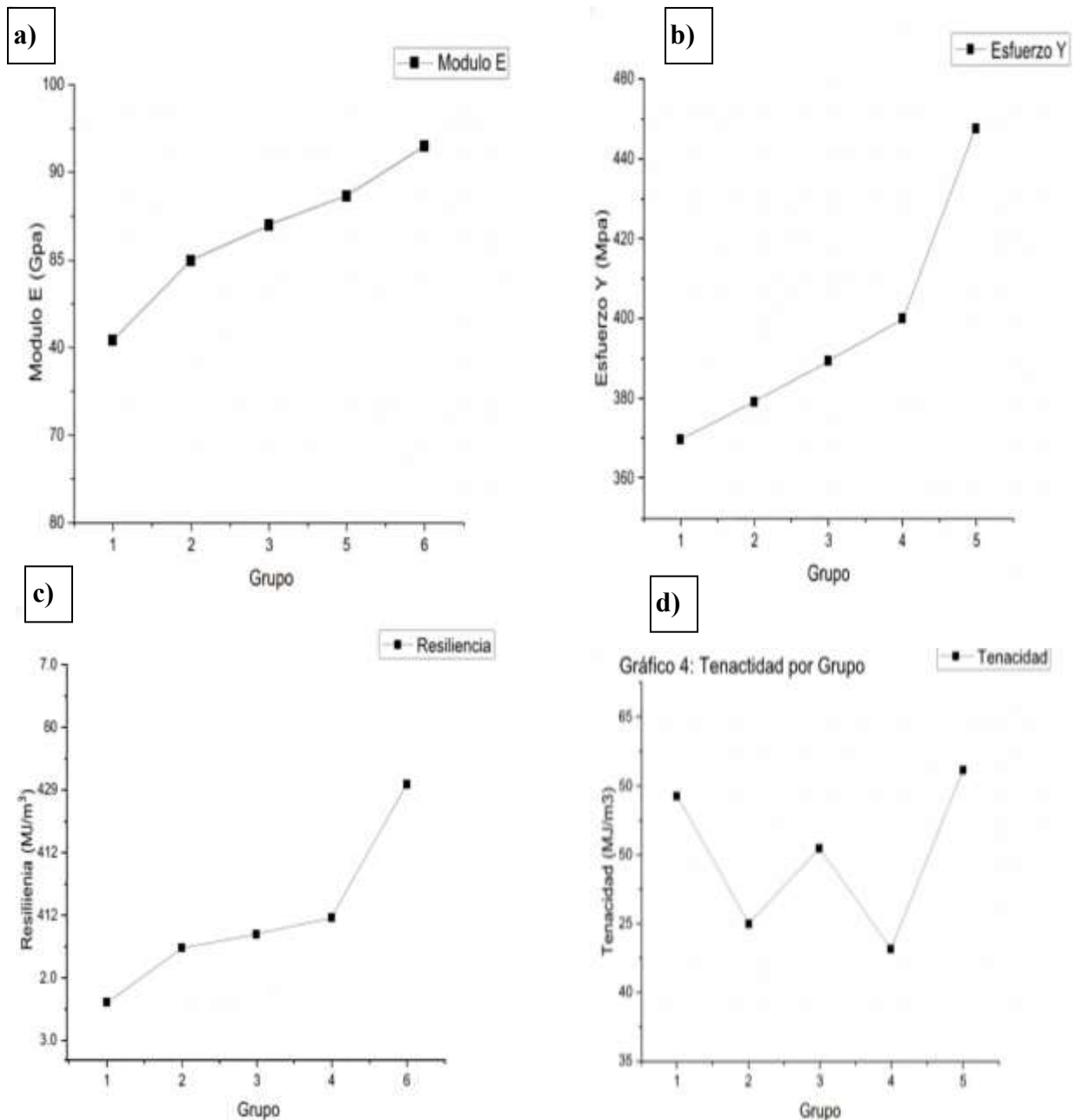


Fig 6. Variación de propiedades mecánicas del ensayo a tensión para cada grupo a) módulo de elasticidad en GPa, b) esfuerzo de fluencia en MPa, c) resiliencia en MJ/m³, d) tenacidad en MJ/m³

En cada una de las gráficas de la figura 6 se representan las propiedades mecánicas obtenidas de la Tabla 9, permitiendo observar de manera clara y comparativa la evolución del Módulo E, esfuerzo de fluencia, resiliencia y tenacidad entre los seis grupos de estudio.

El análisis comparativo de las propiedades mecánicas muestra que la degradación-recuperación se produce de forma directamente proporcional a la concentración existente del inhibidor; el E módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia demuestran que la exposición del A36 al HCl sin protección (0%) erosionan la superficie del acero A36, y debido a la erosión, se genera un debilitamiento de la rigidez efectiva, además de la capacidad de carga elástica del material; técnicamente, esto se debe a que la corrosión tiende a desarrollar una sección transversal irregular, que puede ser vista como un hecho que actúa como puntos de debilidad estructural. A una dosificación del 30% de inhibidor tillos, ambos valores se ajustan a los niveles de control, lo que demuestra que la película orgánica impide la pérdida de material resistente.

Por otro lado, la resiliencia y la tenacidad demuestran que el extracto como el protector de la ductilidad; el acero A36 en condiciones desprotegidas sufre un tránsito hacia la fragilidad, donde absorbe poca energía hasta el punto de fractura, por el contrario, la progresiva adición de inhibidor permite que la capacidad de la deformación plástica del metal y la energía de disipación se desplieguen.

Aunque los resultados sugieren que la adsorción de flavonoides y limoneno podría ser la responsable del efecto protector, es importante mencionar que en este estudio no se realizaron caracterizaciones químicas propias del extracto (que podrían haber sido FTIR o cromatografía) ni análisis directos de la película desarrollada sobre el acero (de microscopía electrónica de barrido). Por lo tanto, el mecanismo propuesto se fundamenta en reportes bibliográficos previos [19] y [20] en el comportamiento observado, pero requiere confirmación mediante estudios específicos de caracterización superficial y química en investigaciones futuras.

4.4 Análisis estadístico y significancia

En primer lugar, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las variables de velocidad de corrosión y esfuerzo de fluencia. Los resultados indicaron que los datos no presentaban una distribución normal uniforme en todos los grupos ($p < 0.05$), lo cual justificó la aplicación de pruebas no paramétricas para el análisis de comparación.

Posteriormente, se ejecutó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar las diferencias entre las medianas de los seis grupos de estudio (0% a 30% de inhibidor y grupo control). Los resultados arrojaron un valor $H = 18.47$ con 5 grados de libertad y un valor $p = 0.0024$ ($p < 0.05$), lo que permite rechazar la hipótesis nula y confirmar que la concentración del inhibidor influye de manera directa y significativa en la protección del acero A36.

Para identificar entre qué grupos específicos existían diferencias significativas, se realizó un análisis post-hoc mediante comparaciones por pares con la prueba de Dunn. Los resultados mostraron:

- **Diferencias significativas ($p < 0.05$):** entre el grupo sin protección (0%) y las concentraciones de 25% ($p = 0.018$) y 30% ($p = 0.003$), así como entre el grupo control y los grupos 0%, 10% y 15%.
- **Diferencias no significativas ($p > 0.05$):** entre las concentraciones de 10% y 15% ($p = 0.342$), y entre 25% y 30% ($p = 0.187$), indicando que estos pares presentan comportamientos estadísticamente similares.
- **Efecto sobre propiedades mecánicas:** el ascenso en el esfuerzo de fluencia hasta 451.57 MPa que se observa en el grupo 30% describe un cambio muy importante al grupo no protegido (364.41 MPa), de tal modo que se realizó también la validación estadística de la capacidad del extracto para mantener la integridad estructural.
- **Robustez de los datos:** el uso de la mediana como estadístico de comparación en el procedimiento descrito hizo que se minimizara el sesgo que podrían provocar los valores extremos anotados en las primeras 24 h de ensayo, donde el ataque del HCl se avistó más agresivo y errático.

El análisis estadístico confirma con un nivel de confianza del 95% que el inhibidor verde derivado de cáscara de naranja es una herramienta técnicamente viable y eficaz para mitigar la corrosión en el acero estructural A36, requiriéndose concentraciones superiores al 25% para lograr un efecto protector significativo.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El extracto etanólico de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) actúa eficazmente como un inhibidor de corrosión verde para el acero A36. La capacidad de mitigación es directamente proporcional a la dosificación, siendo el máximo el valor de la concentración 30% con una eficiencia de protección de un 39%.
- El inhibidor etanólico de cáscara de naranja es capaz de impedir el colapso funcional de las propiedades mecánicas del acero A36 en condiciones de carga. Las muestras sin ningún tipo de protección en cambio mostraron un fallo estructural irreversible ($\sigma_Y = 364.41$ MPa), resultado de una determinada reducción de su sección transversal efectiva y una fragilización por hidrógeno inducida por el medio ácido; por el contrario, la aplicación del inhibidor en una concentración del 30% favoreció la conservación del esfuerzo de fluencia a valores de 451.57 MPa, próximos a los del grupo control sin corrosión (470.00 MPa), lo que representa una alternativa de retención del 96% de la resistencia original.
- La dosificación al 30% optimiza la resiliencia del acero a 5.78 MJ/m³. La formación de una película orgánica de flavonoides y terpenos bloquea eficazmente la difusión de hidrógeno hacia el interior del metal, asegurando que el material conserve su ductilidad y capacidad de servicio frente al ácido clorhídrico.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda llevar a cabo ensayos de larga duración para establecer una vez más si la película de polímeros protectores de los flavonoides de la naranja permanece intacta posterior a las 24 horas o, por el contrario, requiere de reaplicaciones cada cierto tiempo en una estructura real.
- Para futuras investigaciones, se recomienda incluir comprobaciones con variaciones térmicas (calor extremo) y salinidad, a efecto de ver si la eficiencia del 39% es constante en zonas del tipo costeras o industriales.
- Se sugiere continuar refinando el proceso de filtrado del extracto etanólico con el fin de eliminar la materia orgánica en forma de sólidos no inhibidos, para maximizar los niveles de agentes activos y mejorar la eficacia protectora.

- Realizar un análisis metalográfico post-corrosión de tal forma que se pueda cuantificar el tipo de ataque (uniforme o pitting) y verificar la adherencia microscópica de la película inhibidora en la superficie del acero.
- Se recomienda realizar también estudios de caracterización química avanzada (FTIR o Cromatografía) donde se puede determinar en forma inequívoca los grupos funcionales del limoneno y flavonoides que participan en el fenómeno de adsorción sobre el acero.
- Se proponen la realización de análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS) para verificar la profundidad de la pitting y la formación visual de la película protectora orgánica.

REFERENCIAS

- [1] A. L. R. Pérez, «"Estrategias de protección del acero contra la corrosión",» *Revista de Materiales y Corrosión*, vol. 22, n° 4, pp. 267-278, 2018.
- [2] M. R. J. Cruz, «"Corrosión del acero en hormigón armado: Un estudio crítico",» *Revista de Ingeniería Civil*, vol. 45, n° 2, pp. 123-135, 2021.
- [3] P. F. J. O. S. García, «"Mecanismos de corrosión en el acero: Implicaciones para la ingeniería civil",» *Journal of Corrosion Science*, vol. 25, n° 3, p. 201–212, 2019.
- [4] A. Zavarce, «¿Cuál es el Impacto de la Corrosión en la Economía Circular?,» Inspenet, 2024. [En línea]. Disponible: <https://inspenet.com/articulo/impacto-corrosion-en-la-economia-circular>. [Último acceso: 15 enero 2026].
- [5] R. M. C. C. M. G. Valladares, «"Inhibidores naturales en el control de la corrosión de materiales metálicos",» *Inventio*, vol. 11, n° 25, pp. 37-41, 2021.
- [6] Benzidia, B., Hammouti, B., & Touzani, R. (2019). Limonene as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Journal of Molecular Liquids*, 283, 707-716.
- [7] A. T. M. G. V. I. Vásquez, «Inhibidores verdes de la corrosión de materiales metálicos por biocombustibles,» 2018. [En línea]. Disponible: <https://rlac.buap.mx/sites/default/files/9%2821%29-38.pdf>. [Último acceso: 10 diciembre 2025].
- [8] D. Gao, W. Zhang, J. Tang y Z. Zhu, «Effect of Steel Fiber on the Compressive Performance and Microstructure of Ultra-High Performance Concrete at Elevated Temperatures,» *Construction and Building Materials*, vol. 435, n° 136830, 2024.
- [9] L. L. C. P. M. S. A. Y. Intriago, «"Análisis de la tasa de corrosión en recubrimientos anticorrosivos en acero A-36",» *Revista Científica FINIBUS*, vol. 7, n° 14, pp. 49-58, 2024.
- [10] ASTM International. (2019). Standard Specification for Carbon Structural Steel (ASTM A36/A36M-19). West Conshohocken, PA: ASTM International..
- [11] Ingenieriapedia, «Acero A36: Propiedades Mecánicas y Aplicaciones,» 29 Febrero 2024. [En línea]. Disponible: <https://ingenieriapedia.com/acero-a36-propiedades-mecanicas/>. [Último acceso: 16 diciembre 2025]
- [12] J. P. R. Y. R. F. Sri Hastuty, «The Effect of Chloride, Sulfate, and Nitrate Anions for Pitting Corrosion Behavior on ASTM A36 Steel in Atmospheric Environment,» de *Proceedings*

- of the 1st International Conference on Contemporary Risk Studies (ICONIC-RS 2022)*, South Jakarta, 2022.
- [13] V. CNC, «What Are the Properties of A36 Steel?», VMT Industry Corporation, China, 2024.
- [14] K. Steel, «Corrosion Resistance of A36 Steel Plate», Shanghai Katalor Enterprises Co., Ltd., Shanghai, 2024.
- [15] American Institute of Steel Construction (AISC), «Steel's Environmental Footprint», 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.aisc.org/sustainability/steels-environmental-footprint/>. [Último acceso: 14 diciembre 2024]
- [16] J. K. Emmanuel, «Corrosion protection of mild steel in corrosive media, a shift from synthetic to natural corrosion inhibitors: a review», *Bulletin of the National Research Centre*, vol. 48, nº 26, p. Article Number, 2024.
- [17] J. O. A. Cortés, «"Selección electroquímica de compuestos orgánicos como inhibidores de corrosión en medio ácido"», Univ. Autónoma de México, México, 2006.
- [18] C. J. R. J. R. Vargas León, «"Determinación de la concentración óptima de un aditivo orgánico biodegradable..."», Univ. Técnica de Ambato, Ambato, 2021.
- [19] N. D. Adasooriya y T. Hemmingsen, «Environment-Assisted Corrosion of Offshore Wind Turbine Structures: A Framework and Fatigue Curves», de *Analytical and Experimental Methods in Mechanical and Civil Engineering: Contributions of the 1st Olympiad in Engineering Science (OES 2023)*, Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2024, p. 497–506.
- [20] G. J. A. Rana, «A compilation of corrosion inhibitors in acidic environments: improvements and advancements from 2018–2023», *Chemical Papers*, vol. 78, p. 6241–6257, 2024.
- [21] S. A. A. M. M. A. Ahmed, «Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors», *RSC Advances*, vol. 14, p. 31877–31920, 2024.
- [22] E. M. S.-M. A. D.-I. Răuță, «Recent development of corrosion inhibitors: types, mechanisms, electrochemical behavior, efficiency, and environmental impact», *Technologies*, vol. 3, nº 13, 2025.
- [23] D. A. Jones y R. G. Kelly, «Principles and Prevention of Corrosion», *Corrosion Science and Technology*, vol. 56, pp. 112-118, 2021.

- [24] A. M. A.-M. M. K. A. A. M. S. A. A.-M. y. H. Z. A. M. S. Al-Otaibi, «Green corrosion inhibitors: Plant extracts as a sustainable alternative for steel protection,» *Journal of Molecular Liquids.*, vol. 350, 2022.
- [25] J. R. Hernandez-Galdamez, E. Garcia-Ochoa, J. G. Gonzalez-Rodriguez y J. U. Perez-Hernandez., «Evaluation of citrus-based extracts as eco-friendly corrosion inhibitors for carbon steel in acidic media,» *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 18, p. 100257, Octubre 2023.
- [26] A. International, «ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,» ASTM, West Conshohocken, PA, 2021.
- [27] A. International, «ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products,» ASTM, West Conshohocken, PA, 2021.
- [28] R. Baboian, *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2005.
- [29] R. M. A. C. C. A. M. G. V. Cisneros, «"Inhibidores naturales en el control de la corrosión de materiales metálicos",» *Inventio*, vol. 11, nº 25, pp. 37-41, 2015.
- [30] R. G. Inzunza, «"Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales",» Univ. de Sonora, México, 2014.
- [31] Oficina Nacional de Normalización (NC), «NC 228:2002: Corrosión. Método de determinación de la velocidad de corrosión por pérdida de masa,» Comité Ejecutivo de Normalización, La Habana, Cuba, 2002.
- [32] R. M. R. Mendoza, «"Facultad de ingeniería escuela profesional de ingeniería civil",» Univ. de Los Andes, Mérida, 2018.
- [33] J. P. Z. M. Mamlouk, *Materiales para ingeniería civil*, Madrid: Pearson Educación, 2009.
- [34] M. Sheydaei, «Green Corrosion Inhibitors: A Review of Plant-Based Extracts and Their Mechanisms,» *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 15, nº 2, p. 112–130, 2024.
- [35] P. K. M. E. L. Zhang, «Sustainable Corrosion Inhibitors: Advances in Plant-Based Extracts and Green Chemistry Approaches,» de *Advances in Green Materials Engineering*, Springer Nature, 2025, p. 201–240.

- [36] R. P. A. D. S. Karne, «Eco-Friendly Corrosion Inhibitors Derived from Citrus sinensis Peel Extract for Mild Steel in Acidic Media,» *Materials Today: Proceedings* , vol. 82, p. 145–153, 2024.
- [37] ASTM International. (2005). *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens (ASTM G1-03)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ANEXOS



A 1. Preparación del inhibidor a partir de cáscaras de naranja.



A 2. Registro de pH mediante tira colorimétrica.



A 3. Registro de pH en solución ácida.



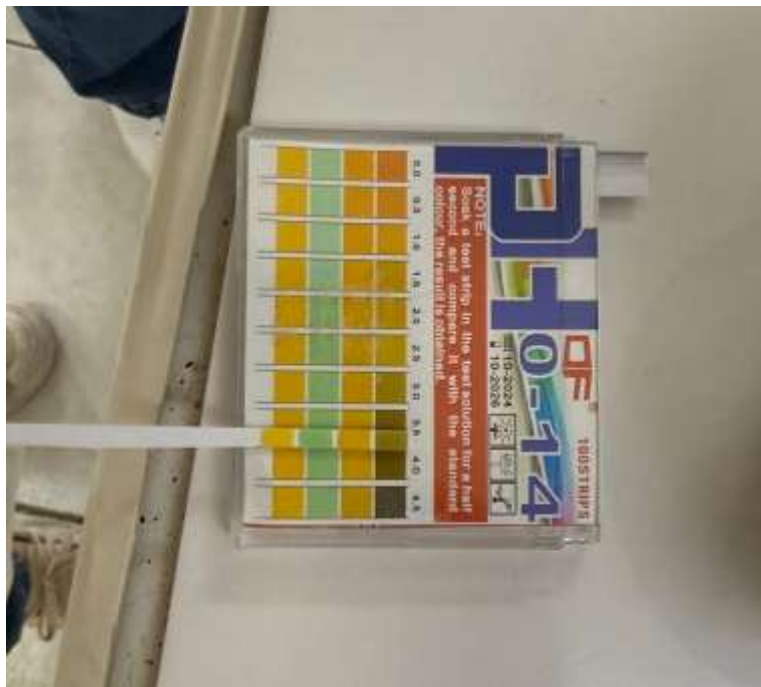
A 4. Preparación de solución HCl 0.5 M.



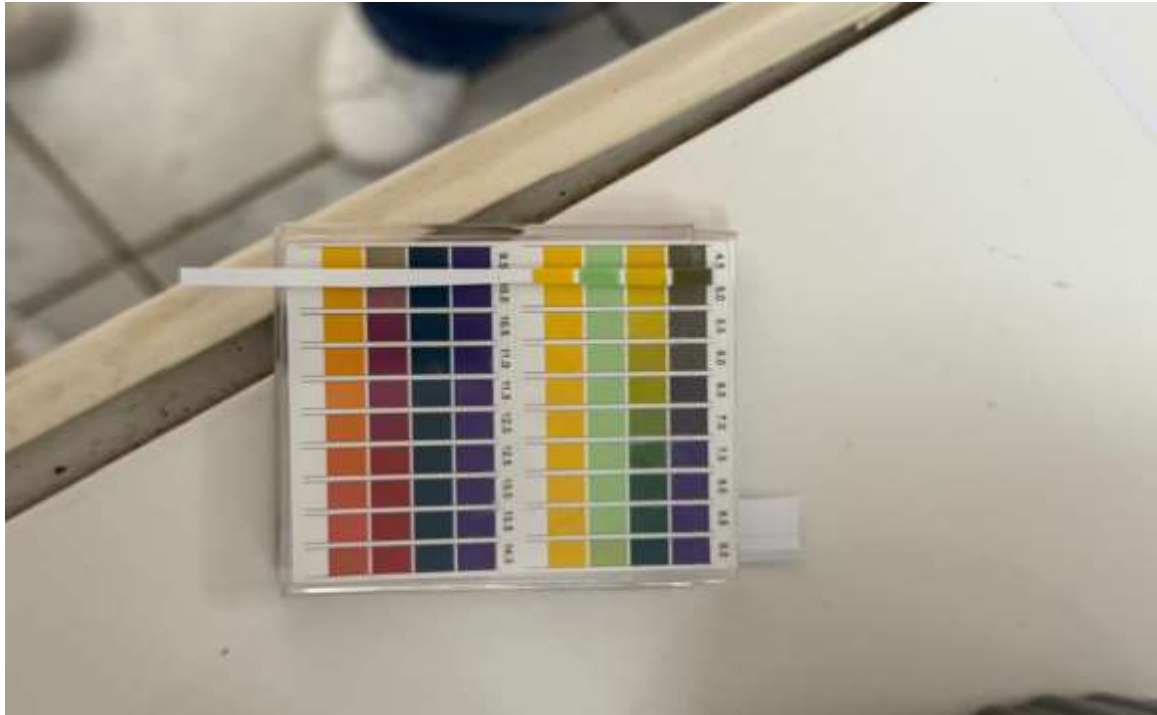
A 5. Montaje de calentamiento con Bunsen y matraz.



A 6. Registro de masa en balanza digital.



A 7. Registro de pH con tira colorimétrica.



A 8. Registro de pH con escala 0–14.



A 9. Registro volumétrico de inhibidor.



A 10. Graduación de inhibidor en cilindro



A 11. Probetas de tracción en composite.



A 12. Inspección de recipiente HCl con indicador.



A 13. Registro de residuos ácidos en laboratorio.



A 14. Probetas verticales con solución HCl 0.5 M.



A 15. Probetas metálicas para ensayo de tracción.



A 16. Probetas metálicas adicionales para ensayo de tracción.



A 17. Aplicación superficial del inhibidor sobre placas metálicas.



A 18. Máquina universal Shimadzu utilizada en los ensayos de tracción.



A 19. Probetas corroidas tras exposición al medio ácido.



A 20. Probetas clasificadas por concentración de inhibidor.