



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

Evaluación de un inhibidor verde de corrosión para acero A36 a partir de cáscaras de mango en soluciones ácidas simuladas

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Saltos Avilez, César Enrique

Tutor:

Ing. Salazar Flores, Raúl Alexis. Mgs.

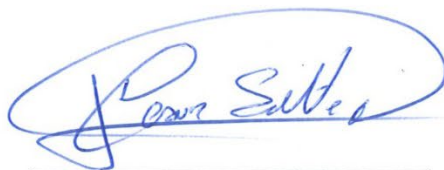
Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, César Enrique Saltos Avilez con cédula de ciudadanía 2350285132, autor del trabajo de investigación titulado: Evaluación de un inhibidor verde de corrosión para acero A36 a partir de cáscaras de mango en soluciones ácidas simuladas, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma 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 podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 14 de mayo de 2026



César Enrique Saltos Avilez

C.I: 2350285132

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 VERDE DE CORROSIÓN PARA ACERO A36 A PARTIR DE CÁSCARAS DE MANGO EN SOLUCIONES ÁCIDAS SIMULADAS, bajo la autoría de **César Enrique Saltos Avilez**; 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 14 días del mes de mayo 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 VERDE DE CORROSIÓN PARA ACERO A36 A PARTIR DE CÁSCARAS DE MANGO EN SOLUCIONES ÁCIDAS SIMULADAS**”, presentado por César Enrique Saltos Avilez, con cédula de identidad número 235028513-2, bajo la tutoría de **Ing. Mgs, 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 nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 14 de mayo del 2026.

PhD. Oscar Alfredo Cevallos Velasquez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



FIRMA

Mgs. Jennifer Elizabeth Pino Arguello
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



FIRMA

Mgs. Marcelo David Guerra Valladares
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



FIRMA



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

UNACH-RGF-01-04-08.05
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **SALTOS AVILEZ CÉSAR ENRIQUE**, con cédula de identidad número 2350285132, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado “Evaluación de un inhibidor verde de corrosión para acero A36 a partir de cáscaras de mango en soluciones ácidas simuladas”, cumple con el 7 % de similitud y 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, 24 de abril 2026

Ing. Raúl Salazar Flores MSc.

TUTOR

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso y a la Virgen de la Santísima Natividad, por ser la luz que ha guiado mi camino, por su infinita bondad, y por haberme brindado la salud, la sabiduría y la fortaleza para culminar esta etapa fundamental de mi vida.

A mis amados Padres, César Saltos Poveda y Mariana Avilez Velez:

Ustedes son el pilar fundamental de mi existencia. Les dedico este logro con el más profundo amor y respeto, pues su inquebrantable apoyo, sus sacrificios y sus interminables muestras de fe en mí han sido la verdadera fuerza impulsora de este proyecto. Este título es el fruto de su esfuerzo tanto como del mío.

A mi querida Abuelita Carmen Poveda:

Por su amor incondicional, sus oraciones y sus sabios consejos. Su presencia ha sido un apoyo en todo sentido y una constante fuente de inspiración. Gracias por ser una pieza tan valiosa en la construcción de este sueño.

A mis preciados Hermanos, Fernando, Andrea y Alfredo:

Para que vean en esta meta una prueba tangible de que, con perseverancia y dedicación, todo objetivo es alcanzable. Su cariño y su motivación constante hicieron la jornada más ligera.

Finalmente, dedico este triunfo a toda mi familia, pues sé que esta meta no es un logro individual, sino el reflejo de la unión, la perseverancia y el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

César Enrique Saltos Avilez

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis, requisito final para la obtención del título de Ingeniero Civil, representa la culminación de un proceso formativo de gran exigencia. Su realización no habría sido posible sin el valioso apoyo, la guía y el compromiso de diversas personas e instituciones, a quienes expreso mi más sincero reconocimiento.

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Chimborazo y a la Facultad de Ingeniería Civil, por ser el entorno académico que sentó las bases de mi desarrollo profesional. Extiendo mi gratitud a todos los profesores, cuya vasta de conocimiento y experiencia compartida moldeó mi conocimiento y vocación durante esta etapa formativa.

A la Dra. Nancy Orozco y MSc. Raúl Salazar, por sus invaluable disposiciones, gestión de recursos y apoyo logístico durante el desarrollo experimental de esta investigación. Sus colaboraciones fueron fundamental y decisivo para la correcta ejecución de los ensayos de laboratorio y desarrollo de todo el estudio. Al final del trabajo se puede ver la calidad requerida en este proyecto final.

Extiendo mi gratitud a mi núcleo familiar por ser el sostén emocional y logístico indispensable.

- A mis Padres, por el amor incondicional, el sacrificio y el aliento constante que aseguraron la continuación de mis estudios.
- A mi Abuelita Carmen, por su generosidad y el apoyo vital que me permitió dedicarme plenamente a la investigación y a la culminación de mi profesión.
- A mis Hermanos, por su apoyo práctico, comprensión y solidaridad, que hicieron el camino más llevadero y comfortable.
- A mis Amigos y Compañeros, por acompañarme en toda esta gran etapa de aventuras y emociones que perduraran en mis recuerdos siempre.

Con gratitud,

César Enrique Saltos Avilez

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR.....	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL.....	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTO.....	
RESUMEN.....	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Planteamiento del problema.....	16
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos.....	18
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Acero A36.....	19
2.2 Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A36.....	19
2.3 Propiedades químicas del acero estructural A36.....	20
2.4 Corrosión y Afectación al acero A36	20
2.5 Tipos de Corrosión	21
2.6 Diferencia conceptual entre oxidación y corrosión en metales	22
2.7 Ambientes agresivos simulados para corrosión	22
2.7.1 Ácido clorhídrico (HCl) como medio agresivo:.....	22

2.7.2	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) como simulante de lluvia ácida:.....	23
2.8	Efecto de Fragilización por hidrógeno	23
2.9	Inhibidores de corrosión	24
2.9.1	Definición:	24
2.9.2	Inhibidores Verdes:	24
2.9.3	Cáscara de mango como inhibidor:	25
2.10	Estado del Arte	25
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		27
3.1	Tipo de Investigación	27
3.2	Diseño de la Investigación.....	28
3.2.1	Variables consideradas:.....	29
3.2.2	Normativa técnica aplicada.....	29
3.3	Materiales y Equipos.....	30
3.3.1	Materiales:.....	30
3.3.2	Equipos:	30
3.4	Procedimiento Experimental.....	31
3.4.1	Preparación del inhibidor a base de cáscara de mango:	32
3.4.2	Preparación de las probetas de acero A36:	34
3.4.3	Preparación de las soluciones ácidas	37
3.4.4	Inmersión de las probetas en soluciones ácidas:	38
3.4.5	Ensayo gravimétrico – pérdida de masa	39
3.4.6	Metodología ensayo de Tracción en acero A36:	41
3.5	Análisis Estadístico	45
3.6	Limitaciones.....	46
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		47

4.1	Datos Pérdidas de masa	47
4.2	Cálculo de pérdida de masa y Velocidad de Corrosión	50
4.3	Eficacia de Inhibidor	55
4.4	Ensayo de Tracción a probetas de Acero A36.....	59
4.4.1	Curvas de esfuerzo – deformación de placas A36.....	61
4.4.2	Propiedades mecánicas medias por grupo de exposición	62
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN.....		65
5.1	Análisis de pérdida de masa y eficacia del inhibidor	65
5.2	Velocidad de corrosión y eficacia del inhibidor.....	66
5.3	Análisis del ensayo a tracción y eficacia del inhibidor.....	67
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
6.1	Conclusiones	70
6.2	Recomendaciones.....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		72
ANEXOS.....		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de acero estructural A36.....	19
Tabla 2. Composición química del acero A36.....	20
Tabla 3. Tipos de corrosión en acero estructural	21
Tabla 4. Estudios comparativos de inhibidores verdes en aceros.....	26
Tabla 5. Distribución experimental de probetas	28
Tabla 6. Materiales empleados en el proceso experimental	30
Tabla 7. Equipos utilizados en el desarrollo experimental.....	30
Tabla 8. Reactivos concentrados — datos y molaridad calculada.....	37
Tabla 9. Volumen de concentrado requerido por 1 L de solución.....	37
Tabla 10. Volumen de concentrado por tubo PVC ($V_{\text{tubo}} = 1800 \text{ mL}$)	37
Tabla 11. Seguimiento de pH en el sistema de inmersión.....	39
Tabla 12. Datos de pérdida de masa Grupo 1	47
Tabla 13. Datos de pérdidas de masa Grupo 2	48
Tabla 14. Variación de masa del Grupo 1.....	50
Tabla 15. Variación de masa del Grupo 2.....	51
Tabla 16. Pérdida total de masa de las probetas de acero A36 (15 días)	52
Tabla 17. Prueba de kruskal-wallis para la variable pérdida de masa	53
Tabla 18. Comparaciones por pares mediante el método (DSCF).....	54
Tabla 19. Velocidad de corrosión promedio del acero a36.....	55
Tabla 20. Eficacia del inhibidor de cáscara de mango sobre acero A36.....	56
Tabla 21. Esfuerzo, módulo de elasticidad, elongación, resiliencia y tenacidad.....	60
Tabla 22. Promedio de propiedades mecánicas del acero a36 en medio ácido	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema Metodológico de la Investigación	27
Fig. 2. Flujo general del procedimiento experimental.....	31
Fig. 3 Placas de Acero A36 e= 5mm	35
Fig. 4. Pérdidas de masa 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 y Pérdidas de masa a 0.01M H ₂ SO ₄ con f) inhibidor 25 %.....	49
Fig. 5 Eficiencia según concentración del inhibidor	57
Fig. 6 Eficacia de inhibidor las primeras 48 horas	58
Fig. 7. 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 % y f) 25 % a 0.01 H ₂ SO ₄ (Lluvia ácida)	61

RESUMEN

La Corrosión del acero al carbono resulta fundamental para la durabilidad de las estructuras en condiciones del ambiente agresivo. El propósito de esta experimentación fue analizar el comportamiento corrosivo y las propiedades mecánicas del acero A36 al ser tratado con un inhibidor de la corrosión verde, el cual proviene de las cáscaras de mango. Este estudio se llevó a cabo mediante ensayos experimentales, donde se sometieron probetas a soluciones de HCl 0.5 M y H₂SO₄ 0.01 M (lluvia ácida simulada), donde se aplicaron concentraciones de inhibidor del 0 %, 10 %, 15 %, 25 % y 30 %. La corrosión fue medida mediante ensayos gravimétricos (pérdida de masa o velocidad de corrosión), por su parte el comportamiento mecánico, fue determinado mediante ensayos de tracción, donde se midieron el módulo de elasticidad, la fluencia, el alargamiento, la resiliencia y la tenacidad. Los descubrimientos indicaron que la máxima actividad corrosiva se da en el transcurso de las primeras 48 h, a partir de las cuales los ensayos en muestras sin tratamiento y bajo un medio ácido son los que ofrecen los mayores valores de pérdida, pero también las muestras de almacenamiento seguro, es decir, en las condiciones del inhibidor, presentaron muy buenos resultados al mostrar una reducción de la degradación del material incluso a concentraciones superiores o iguales al 10 %. En medios ácidos, el inhibidor resulta efectivo, además de que en una simulación con lluvia ácida se confirma las bajas velocidades de corrosión. Todo ello viene avalado por los ensayos mecánicos, donde se comprobó que este medio induce una reducción en la ductilidad y en la absorción de energía en las probetas no tratadas. Las probetas tratadas, por el contrario, mostraron buenas características de ductilidad y, por tanto, de tenacidad que las hacía estar relativamente intactas tras el ensayo. Es así como se puede considerar que el inhibidor de cáscara de mango puede considerarse como una alternativa técnica y respetuosa con el medio ambiente capaz de mitigar la degradación del acero A36, además de poder permitir que este mantenga sus propiedades mecánicas en un medio corrosivo.

Palabras clave:

Corrosión, acero A36, inhibidor verde, cáscara de mango, ensayo a tracción.

ABSTRACT

Carbon steel corrosion is fundamental to the durability of structures under aggressive environmental conditions. The purpose of this research was to analyze the corrosive behavior and mechanical properties of A36 steel when treated with a green corrosion inhibitor derived from mango peels. This study was conducted through experimental tests, in which specimens were subjected to 0.5 M HCl and 0.01 M H₂SO₄ (simulated acid rain) solutions, with inhibitor concentrations of 0%, 10%, 15%, 25%, and 30%. Corrosion was measured using gravimetric tests (weight loss and corrosion rate), while mechanical behavior was determined through tensile tests, measuring the modulus of elasticity, yield strength, elongation, resilience, and toughness. The findings indicated that maximum corrosive activity occurs during the first 48 hours. During this period, untreated samples in acidic media exhibited the greatest loss. In contrast, samples stored under "safe storage" conditions (with the inhibitor) yielded excellent results, showing reduced material degradation even at concentrations >10%. The inhibitor proved effective in acidic media, and simulated acid rain confirmed low corrosion rates. These results are supported by mechanical testing, which showed that the corrosive environment reduces ductility and energy absorption in untreated specimens. Conversely, treated specimens exhibited favorable ductility and tough characteristics, remaining relatively intact after testing. Consequently, mango peel inhibitors can be considered a technical and environmentally friendly alternative capable of mitigating A36 steel degradation while preserving its mechanical properties in corrosive environments.

Keywords:

Corrosion, A36 steel, green inhibitor, mango peel, tensile test.

Translation Reviewed by:

MSc. Elizabeth Diaz



ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0603277765

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El acero, a partir de su masiva introducción a principios del siglo XX, se ha posicionado como uno de los materiales estructurales con más uso en la construcción civil e industrial en el país debido a sus favorables propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y a la deformación, lo que lo convierte en un material fundamental de la construcción moderna [1], [2]. De entre los diversos aceros al carbono que se utilizan en la construcción, el acero ASTM A36 destaca por su amplia disponibilidad y excelentes propiedades de manufactura y soldabilidad. Estos atributos resultan determinantes en estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos o variables, así como en proyectos que exigen procesos de montaje acelerado [3].

No obstante, su contacto con entornos agresivos les provoca corrosión electroquímica, con una pérdida de sección, una reducción de la resistencia y fallas prematuras durante el servicio. Su interacción con la humedad, el oxígeno y agentes contaminantes aceleran la formación de óxidos, especialmente en infraestructuras como puentes en condiciones ambientales severa[4],[5]. La deposición de compuestos generados por la lluvia ácida potenciará este deterioro e influirá en la vida útil del acero, llevándolo a incrementar los costos de mantenimiento y de rehabilitación [6].

Las alternativas clásicas de protección son los revestimientos sintéticos, los inhibidores químicos y la protección catódica. Las limitaciones de estas opciones vienen ligadas a la toxicidad, el precio o la preparación técnica [7]. Por lo tanto, se han promovido los inhibidores orgánicos de biomasa residual, los cuales son altamente eficaces mediante procesos de adsorción y con menor carga de contaminación [8].

Bajo este contexto, la cáscara de mango, agrícola muy abundante en Ecuador [9], presenta en sus contenidos algunos compuestos bioactivos como taninos, polifenoles y flavonoides, compuestos que ya habían sido previamente identificados con capacidad inhibidora en aceros expuestos a medios ácidos [10]. Este estudio investiga la eficiencia del extracto de cáscara de mango como inhibidor verde aplicado al acero A36 en a diferentes soluciones ácidas simuladas para determinar su eficacia anticorrosiva y su posibilidad de ser una alternativa sustentable al uso de inhibidores sintéticos.

1.2 Planteamiento del problema

La corrosión de los aceros es un proceso de naturaleza electroquímica y progresiva que degrada las propiedades mecánicas del acero en servicio e incluso puede llegar a afectar a su rendimiento estructural [11]. Este deterioro afecta a los distintos elementos metálicos empleados en estructuras que garantizan la infraestructura como puentes, edificios, sistemas productivos, provocando su fallo prematuro y comportando una disminución considerable de la vida útil de los elementos estructurales [12]. La existencia de contaminantes desde la atmósfera pone en exposición directa con agentes que proceden de las precipitaciones, y favorecen la velocidad de corrosión en los aceros al carbono, aumentando la corrosión sobre aceros como el ASTM A36, el acero más aplicado en las estructuras civiles [7].

Este proceso es una preocupación tanto técnica como económica para las entidades encargadas de la operación y del mantenimiento debido al aumento de costos en rehabilitaciones, en protección superficial y en la sustitución de los elementos estructurales deteriorados [13]. Por otro lado, desde el punto de vista normativo e institucional, el empeoramiento de las condiciones por corrosión se asocia a una disminución de la seguridad pública, a aspectos funcionales de la infraestructura y a la sostenibilidad de los sistemas constructivos [14].

En este marco, la cáscara de mango *Mangifera indica* L. Proaño es un residuo agroindustrial abundante en Ecuador [9]. Además, contiene compuestos bioactivos como taninos, polifenoles y flavonoides, vinculados a mecanismos de inhibición basados en adsorción y formación de capas protectoras superficiales frente a medios ácidos [10]. No obstante, pese a su potencial inhibidor, persiste la necesidad de cuantificar su eficacia frente a ambientes corrosivos simulados, particularmente aquellos asociados a lluvia ácida, y determinar el efecto de sus concentraciones de acción sobre acero A36.

Por lo tanto, se plantea el siguiente problema de investigación: establecer la efectividad del extracto de cáscara de mango como inhibidor de corrosión del acero ASTM A36 expuesto a soluciones ácidas simuladas y determinar la concentración de dicho inhibidor que resulta de mayor efectividad en dicha solución. La presente investigación tiene como propósito aportar evidencia científica que respalde el uso de inhibidores verdes como una alternativa de tipo sostenible frente a inhibidores sintéticos convencionales.

1.3 Justificación

En el caso en concreto del acero ASTM A36, material comúnmente utilizado en la infraestructura civil, la pérdida de sección provocada por la corrosión responde con su alteración de las propiedades mecánicas y químicas del acero, alterando su serviciabilidad [6]. Es por esto que se emplea el uso de inhibidores sintéticos, para combatir este fenómeno, aunque tienen diversas limitaciones caracterizadas por su toxicidad, los requerimientos para manipulación, la generación de residuos peligrosos y sus efectos sobre el medio ambiente [7]. El contexto actual ha propiciado la aparición de alternativas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental, que disminuyan la utilización de los productos industriales y que optimicen los costes de mantenimiento en el mundo de la construcción [6].

La cáscara de mango *Mangifera Indica* L. como subproducto agroindustrial de carácter abundante dentro del Ecuador [9]. Propicia una utilización para proteger la superficie del metal que está en contacto con los medios ácidos generando una capa protectora. Cuya superficie disminuye la velocidad de propagación de los residuos corrosivos. Por otro lado, otra de las maneras propuestas de inhibidor verde, supondría una alternativa técnica no sólo viable, sino que también se amolda a los modelos de economía circular como reducción de residuos en la cadena de residuos orgánicos que provienen de la producción agrícola [8].

Es por esto que, el desarrollo de una formulación de inhibidor basado en cáscara de mango favorecerá a disminuir el uso de productos sintéticos no biodegradables, que refuerza y promueve los principios de sostenibilidad que se encuentran en los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) centrados en producción responsable y el impacto ambiental que conlleva [15].

En este contexto, la eficacia de un inhibidor verde ante la corrosión puede favorecer la vida útil del acero, optimizando la gestión de recursos sobre infraestructuras metálicas algunas a una exposición ambiental [16]. Por lo anterior expuesto, la investigación que se presenta justifica su pertinencia al ofrecer una alternativa anticorrosiva ecológica y técnicamente evaluable, para que, por asidero de la cáscara de un residuo orgánico, el mismo procurase la progresiva sustitución del uso de la formulación sintética convencional por una de un residuo orgánico y disponible en la industria nacional.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la eficacia de un inhibidor verde, esto a partir de cáscaras de mango en la prevención de la corrosión del acero A36 expuesto a diferentes soluciones ácidas simuladas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- 1) Formular un inhibidor verde de corrosión a base de cáscara de mango y evaluar el efecto de diferentes concentraciones en la protección del acero A36 expuesto a soluciones ácidas.
- 2) Analizar la influencia de exposición a una solución de H_2SO_4 0.01M, utilizada para simular condiciones de lluvia ácida, sobre el comportamiento del acero A36 tratado con el inhibidor de cáscaras de mango.
- 3) Desarrollar ensayos gravimétricos y de tracción para evaluar la eficacia del inhibidor de corrosión verde elaborado a partir de cáscaras de mango en acero A36.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Acero A36

El Acero ASTM A36 es un acero estructural de bajo carbono, que es utilizado de forma habitual en la construcción civil e industrial gracias a sus notables propiedades de soldabilidad, ductilidad y conformabilidad, apto para la fabricación de vigas, columnas, marcos e incluso otros elementos con cargas permanentes o transitorias. Las características de su composición química unidas a su tratamiento lo hacen particularmente adecuado en cuanto a la fabricación y el montaje, en especial cuando conlleva soldadura calificada a la altura de códigos internacionales como el American Welding Society (AWS) [17].

2.2 Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A36

El acero estructural ASTM A36 regulado por la organización de ASTM Internacional, la cual establece las propiedades mecánicas mínimas del acero. Con lo cual, es determinante para el diseño de elementos estructurales que soportan cargas gravitacionales y sísmicas. La norma define la resistencia mínima a la fluencia, resistencia máxima, alargamiento y demás términos fundamentales de manera que el comportamiento de las estructuras metálicas portátiles cumpla como condiciones óptimas en las obras públicas en la actualidad [18].

TABLA 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACERO ESTRUCTURAL A-36

Parámetro mecánico	Valores normativos	Unidad	Observación técnica
Límite elástico (Fy)	250	MPa	Base de diseño estructural LRFD/ASD
Resistencia a la tracción (Fu)	400 – 550	MPa	Rango según espesor
Elongación mínima	20	%	Confirma ductilidad y fallo no frágil
Módulo de elasticidad (E)	200	GPa	Rigidez para diseño
Densidad	7.85	g/cm ³	Peso propio
Tenacidad	No explícita	–	Depende de soldadura/espesor/temperatura

Nota: Los valores mecánicos presentados corresponden a los mínimos en base a la especificación de la ASTM A36/A36M para acero estructural al carbono.

2.3 Propiedades químicas del acero estructural A36

El acero A36 es un acero al carbono de uso estructural ampliamente utilizado por su balance entre ductilidad, resistencia y soldabilidad. Su composición química estándar, según las especificaciones proporcionadas por el proveedor [15], son las siguientes:

TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO A36

Norma	% C	% MN	% P	% S	% SI	% CU
A 36	0,25 - 0,29	0,80 - 1,2	0,04 max	0,05 max	0,4 max	0,20 max

Fuente: DIPAC Manta – Plancha Laminada en Caliente (2025)

2.4 Corrosión y Afectación al acero A36

La corrosión es un fenómeno electroquímico natural mediante el cual el metal tiende a volver a su forma natural u óxidos más estables mediante la reacción con agentes existentes en su entorno, como el oxígeno, la humedad, las sales, los ácidos, etc. Este proceso tiene como principales consecuencias la disolución del metal y la formación de productos de oxidación, lo que significa una pérdida de masa y alteraciones en la resistencia mecánica del metal en función de la rapidez del proceso. En el caso concreto de los aceros al carbono como el A36, la corrosión se manifestará como predominancia de óxido férrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), producto de la reacción del hierro, el oxígeno y el agua, además de que dicha reacción será más acelerada o bien presentará más velocidad de reacción, en presencia de contaminantes tales como SO_2 , NO_x o cloruros, dando lugar a procesos de corrosión en condiciones más severas sobre los metales, como pueden ser en zonas urbanas o costeras, o bien en áreas industriales [12].

Desde el punto de vista estructural, el riesgo que corre en la corrosión es elevado: disminuye el espesor útil del acero, mermando su resistencia, también afecta la ductilidad y la aceleración de falla bajo cargas de repetición [16]. La formación de picaduras, fisuras por corrosión bajo tensión y pérdida de área de la sección transversal de los perfiles perjudica el comportamiento del acero en elementos como vigas, conexiones, placas base y perfiles etcétera. Por otro lado, la pérdida progresiva de material incrementa el costo de mantenimiento, así como puede dar lugar a fallas prematuras, en particular en condiciones de alta humedad o en lugares con lluvia ácida, donde el proceso corrosivo se acelera y deteriora progresivamente la vida útil teórica de la estructura [17].

2.5 Tipos de Corrosión

La corrosión se clasifica comúnmente de acuerdo con su forma de iniciar el ataque mediante el perfil de la superficie del metal influido por el mecanismo de corrosión según el cual se suele identificar diversos tipos de riesgo a la estructura del acero en el que la corrosión afecta, por ejemplo, el acero ASTM A36. Martínez menciona que entre las formas más típicas de corrosión se pueden encontrar la corrosión uniforme en el que la pérdida de metal se distribuye uniformemente en toda la superficie expuesta y la corrosión localizada en la que el ataque presenta una forma de concentrarse en puntos o zonas discretas [18].

A su vez, la corrosión localizada comprende varias modalidades con distintos mecanismos de degradación. Entre las más relevantes están:

TABLA 3. TIPOS DE CORROSIÓN EN ACERO ESTRUCTURAL

Tipo de corrosión	Mecanismo / Condición típica	Riesgo estructural principal
Corrosión uniforme (general)	Ataque electroquímico homogéneo en toda la superficie	Adelgazamiento gradual → pérdida de sección y rigidez
Corrosión galvánica	Contacto de metales distintos + electrolito	Degradación acelerada del metal menos noble (ánodo)
Corrosión por picadura (pitting)	Depasivación localizada, iones agresivos/cloruros	Pozos profundos → concentración de esfuerzos falla súbita
Corrosión por fisuras / hendiduras (crevice)	Estancamiento de electrolito en uniones, grietas o juntas	Corrosión oculta, difícil de detectar, afrenta puntos críticos
Corrosión por tensión (SCC)	Tensiones + medio corrosivo	Grietas internas → falla frágil sin aviso evidente

Nota: La clasificación presentada resume los mecanismos corrosivos más frecuentes en aceros estructurales expuestos a diferentes ambientes.

2.6 Diferencia conceptual entre oxidación y corrosión en metales

La oxidación es una reacción química que se produce por la acción del oxígeno o de los agentes oxidantes sobre los metales, provocando, por la pérdida de electrones, la formación, a nivel superficial, de los óxidos metálicos. Normalmente, este proceso puede interpretarse como la aparición de una película totalmente adherida —como la herrumbre— a la forma de padecer superficialmente la oxidación y, en consecuencia, también puede considerarse, dependiendo del tipo de metal, como una película pasiva protectora [19].

En contraste, la corrosión se define como un proceso más amplio y complejo: una reacción electroquímica entre el metal, su ambiente, un electrolito y, a menudo, sustancias agresivas (iones cloruro, ácidos, contaminantes), que provoca disolución progresiva del metal, pérdida de masa, deterioro de propiedades mecánicas y debilitamiento estructural [20].

2.7 Ambientes agresivos simulados para corrosión

La simulación de ambientes ácidos brinda la oportunidad de generar condiciones extremas de degradación análogas a las que pueden producirse por lluvia ácida, atmósferas industriales y depósitos contaminantes, lo cual facilitó que dichos medios hiciesen disolverse la película de pasivación del acero A36, así como ejerciesen acciones corrosivas de los iones hidrógeno, cloruros y sulfatos, que eran necesarios para controlar la eficacia del inhibidor formulado. Dirá Vargas H et al. [21] que la exposición deliberada de soluciones ácidas es una técnica válida para el estudio de los comportamientos de la estructura del acero en estado de corrosión acelerada.

2.7.1 Ácido clorhídrico (HCl) como medio agresivo:

El ácido clorhídrico constituye uno de los agentes corrosivos más utilizados para acelerar el deterioro en aceros al carbono debido a su elevada capacidad de disolución de óxidos metálicos y remoción de la capa pasiva superficial. En una exposición controlada, el HCl promueve un ataque electroquímico directo entre los iones hidrógeno (H^+) y el hierro base (Fe), generando sales solubles de $FeCl_2$ y liberación gaseosa de hidrógeno, lo cual incrementa la cinética corrosiva del acero A36. Según lo reportado por Barba, la naturaleza agresiva del HCl también se asoció a su capacidad de penetrar irregularidades superficiales, favoreciendo sitios de ataque localizado y deterioro progresivo del espesor metálico [22].

2.7.2 *Ácido sulfúrico (H_2SO_4) como simulante de lluvia ácida:*

La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) publicó el trabajo “Lluvia Ácida” en el que se exponía que la lluvia se dirigió a acentuar su acidez cuando los óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x) presentes en la atmósfera reaccionaron con el agua de lluvia, dando lugar a ácidos fuertes como H_2SO_4 y el ácido nítrico, los cuales caen como lluvia contaminada que ejerce un ataque químico sobre las superficies metálicas [23].

Así, el medio de ensayo escogido para reproducir a escala de laboratorio las condiciones agresivas en corrosión, propias de un ambiente urbano e industrial, fue el H_2SO_4 . De esta forma, en esta simulación los iones H^+ y SO_4^{2-} ataca la capa pasiva del acero A36, potencia la disolución anódica del hierro, el desprendimiento de iones metálicos y la generación de sulfatos solubles, repitiendo así los efectos perniciosos de la lluvia ácida sobre estructuras metálicas [23].

2.8 Efecto de Fragilización por hidrógeno

La fragilización por hidrógeno sería un fenómeno mediante el cual, partes del material, debido a una corrosión que están sometidas a un medio ácido, producían átomos de hidrógeno que se difunden a través del enrejado cristalino del acero y se fijan en defectos microestructurales, dislocaciones, inclusiones y límites de grano. Este mecanismo provocaría la aparición de microfisuras a nivel interno que perjudicarían la ductilidad y la tenacidad del acero, favoreciendo un comportamiento mecánico más frágil bajo carga [24].

Diversos estudios han demostrado que, en aceros al carbono como el A36, la presencia de hidrógeno puede alterar la respuesta mecánica durante ensayos de tracción, manifestándose en una reducción de la zona plástica y del área bajo la curva esfuerzo–deformación, así como en variaciones aparentes del esfuerzo de fluencia y del módulo de elasticidad [25]. Este efecto se intensifica cuando el acero se encuentra expuesto directamente al medio ácido, sin mecanismos de protección superficial.

2.9 Inhibidores de corrosión

2.9.1 Definición:

Un inhibidor de corrosión se define como una sustancia química que, añadida en baja concentración al medio corrosivo, reduce significativamente la tasa de corrosión del metal al provocar la formación de una película protectora sobre su superficie, limitando el contacto del acero con agresores como iones H^+ , Cl^- o SO_4^{2-} [26].

2.9.2 Inhibidores Verdes:

Los inhibidores verdes son sustancias de origen natural generalmente extractos vegetales, aceites esenciales o residuos agrícolas que, al ser añadidos en bajas concentraciones al medio corrosivo, reducen la tasa de corrosión de metales mediante formación de una película protectora adsorbida sobre la superficie metálica [27]. Estas soluciones representan una alternativa ecológica a los inhibidores químicos convencionales, al ser biodegradables, de bajo costo y menos tóxicas, lo que disminuye el impacto ambiental y los riesgos para la salud asociados al uso de compuestos industriales agresivos [8].

La pregunta fundamental de los inhibidores verdes radica en la adsorción de la molécula adsorbida, por lo que existe la posibilidad de que físicamente o químicamente pueda ser el mecanismo principal. En este sentido, se puede decir que cualquier molécula adsorbida puede bloquear las reacciones anódicas o catódicas mediante la saturación de los lugares activos de la superficie metálica. Por tanto, se puede considerar que la adsorción de distintas moléculas orgánicas frena la transferencia de electrones y los iones agresores como H^+ o Cl^- o SO_4^{2-} que limitan la disolución de la superficie metálica y de la fase de óxido o de las sales metálicas correspondientes [28].

2.9.3 Cáscara de mango como inhibidor:

La cáscara de mango es conocida como un inhibidor verde debido a su alto contenido de polifenoles, taninos y flavonoides, los cuales son compuestos que pueden actuar sobre la superficie metálica formando una capa protectora que disminuye el intercambio iónico, el cual se relaciona con la corrosión. Según el estudio reportado por Guo L. et al. las últimas investigaciones observadas en estos compuestos orgánicos fueron como donantes de electrones favoreciendo la adsorción sobre el acero a la vez que disminuyó la velocidad de degradación electroquímica en medio ácido [29].

2.10 Estado del Arte

Diversos estudios recientes han demostrado el potencial de extractos vegetales como inhibidores verdes de corrosión, aplicables a aceros al carbono en ambientes agresivos lo cual valida enfoques como el de la cáscara de mango en esta investigación. En una revisión crítica sistemática, se documentó que más de 40 especies vegetales presentaron efectos inhibidores en aceros al carbono expuestos a soluciones ácidas, con eficiencias superiores al 80 % en la mayoría de los casos [30].

En un análisis regional aplicado al contexto industrial latinoamericano, se determinó que los inhibidores orgánicos no solo redujeron la pérdida de masa metálica, sino que optimizaron los procesos de protección superficial en entornos donde las condiciones de humedad, sulfatos y acidez atmosférica incrementaron el riesgo de corrosión acelerada [31]. Este antecedente demostró la pertinencia del uso de residuos vegetales como agentes inhibidores, especialmente en sistemas expuestos a lluvia ácida o medios simulados con H_2SO_4 y HCl .

A continuación, se muestran los hallazgos relevantes:

TABLA 4. ESTUDIOS COMPARATIVOS DE INHIBIDORES VERDES EN ACEROS

Estudio	Inhibidor utilizado	Medio corrosivo	Material metálico	Técnica de evaluación	Efecto reportado
Revisión crítica sobre inhibidores de corrosión verdes basados en extractos de plantas: (2021) [30]	Extractos vegetales mixtos	HCl 1 M	Acero al carbono	Polarización, EIS	Eficiencias > 85 % adsorción tipo Langmuir
Extracto de semilla de aguacate como inhibidor ecológico[28]	Extracto semilla de aguacate	Ambientes ácidos + humedad	Acero estructural	Gravimetría	Eficiencias > 75 % Disminución significativa de pérdida de masa
Análisis comparativo de inhibidores verdes [31]	Residuos frutales (taninos y polifenoles)	Medios ácidos (pH ≤ 3)	Aceros equivalentes a A36	EIE, masa perdida	Eficiencias > 70 % Formación de capa protectora,

Nota: Los métodos EIS (Espectroscopía de Impedancia Electroquímica) y gravimetría fueron predominantes en la cuantificación de la eficiencia inhibitoria reportada.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

La investigación fue de tipo experimental de aplicación [32], pues la intervención no se limitó a describir el fenómeno corrosivo, sino que se trató de un proceso de intervención y no solo de observación; el fenómeno fue intervenido mediante la formulación y posteriormente la aplicación de un inhibidor natural a base de cáscaras de mango, con el objeto de medir su efecto protector frente al acero A36 expuesto a medios ácidos. Junto con lo anteriormente mencionado, la elección de la estrategia de investigación estuvo de acuerdo con la necesidad de obtener resultados probables o resultados controlados de laboratorio y habiendo manipulado las variables independientes garantizar la comprobación de las concentraciones del inhibidor, los tipos de soluciones ácidas y la comprobación de la efectividad de las diferentes condiciones analizadas mediante las propiedades mecánicas en relación con el comportamiento corrosivo del acero A36.

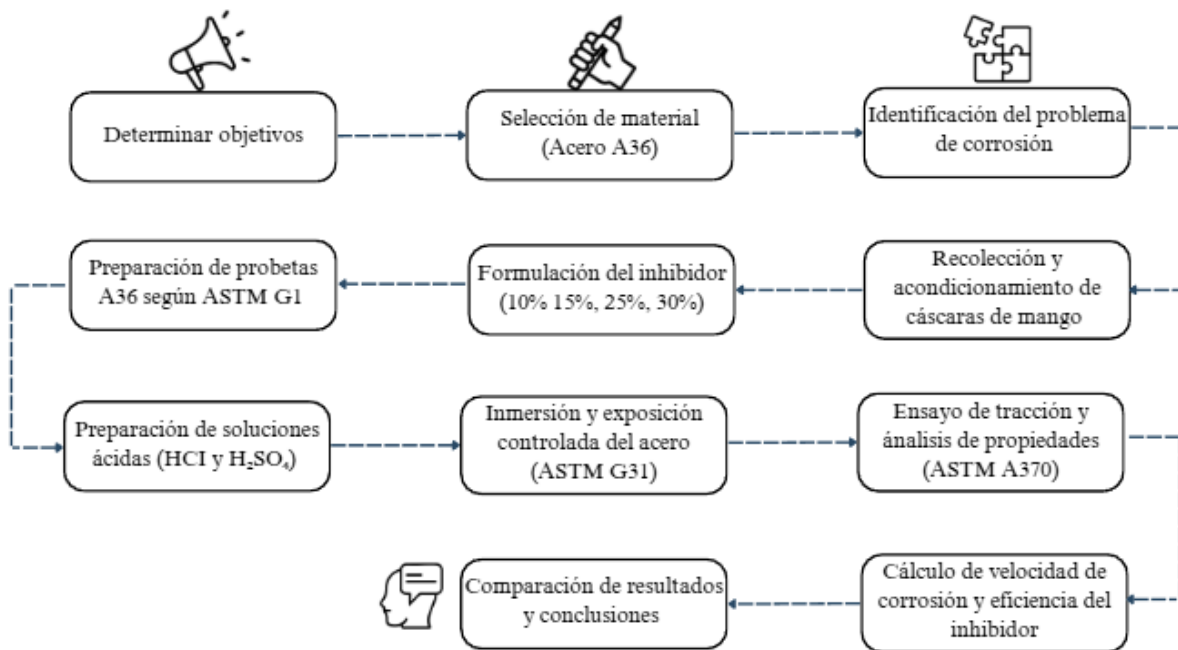


Fig. 1. Esquema Metodológico de la Investigación

Nota: El proceso integró la formulación del inhibidor verde a partir de cáscara de mango, la exposición del acero A36 a medios ácidos simulados y la evaluación mecánica y gravimétrica bajo normas ASTM, con el fin de determinar su eficiencia anticorrosiva.

3.2 Diseño de la Investigación

La investigación se desarrolla bajo un diseño de investigación experimental puro [33]. ya que se ha manipulado la variable independiente, concentración del inhibidor natural de cáscara de mango, para estudiar su incidencia sobre la variable dependiente que es el comportamiento corrosivo y las propiedades mecánicas del acero A36 expuestas a soluciones ácidas. Para ello se trabajó con un total de 18 placas estandarizadas de acero A36 en cinco grupos a distintas concentraciones y un grupo de control en ausencia de inhibidor, evaluando el comportamiento corrosivo y las propiedades mecánicas del acero A36.

Cada placa fue sumergida en recipientes de PVC completamente sellados que protegían a las mismas de la acción de cualquier otra variable, al tiempo que aseguraban condiciones estandarizadas de exposición. La inmersión fue por espacio de 15 días ininterrumpidos en medios corrosivos con las concentraciones establecidas, pH y renovación de electrolito mantenidos; Se adapta esta condición de inmersión a una condición de exposición que reproduce la acción que recibe el acero durante su interacción prolongada con ambientes ácidos agresivos.

TABLA 5. DISTRIBUCIÓN EXPERIMENTAL DE PROBETAS

Grupo	Condición del inhibidor	Medio corrosivo	N.º de probetas
G1 (Control)	0 %	HCl 0.5 M	3
G2	10 %	HCl 0.5 M	3
G3	15 %	HCl 0.5 M	3
G4	25 %	HCl 0.5 M	3
G5	30 %	HCl 0.5 M	3
G6	25 %	H ₂ SO ₄ 0.01 M (simulación de lluvia ácida)	3

Nota: El grupo G6 incorporó el mismo inhibidor a 25 %, variando únicamente el medio corrosivo a H₂SO₄ 0.01 M, con el objetivo de evaluar el desempeño protector en condiciones equivalentes a ambientes atmosféricos contaminados (lluvia ácida).

3.2.1 Variables consideradas:

Variable independiente:

- Concentración del inhibidor verde, cáscara de mango al (10 %, 15 %, 25 %, 30 %)

Variable dependiente:

- Pérdida de masa (gravimetría)
- Variación de propiedades mecánicas (ASTM A370)

Variables controladas:

- Temperatura ambiente
- Volumen de solución ácida por recipiente
- Geometría de probetas
- pH constante en cada solución
- Tiempo de inmersión (15 días)
- Material de contención PVC inerte

3.2.2 Normativa técnica aplicada

- ASTM G31: Guía estándar para pruebas de corrosión de metales por inmersión en laboratorio [34].
- ASTM G1: Práctica estándar para la preparación, limpieza y evaluación de muestras de prueba de corrosión [35].
- ASTM A370: Definición y métodos de ensayo para propiedades mecánicas del acero [36].

3.3 Materiales y Equipos

3.3.1 Materiales:

Para el estudio se definieron materiales para la preparación del inhibidor de cáscara de mango, para la contención de reactivos y para la exposición controlada del acero A36 a medios ácidos. La Tabla 6 muestra todos los materiales utilizados a modo de lista y la función que ocupaban en el estudio. Por otra parte, en el Anexo A se completan con registros fotográficos, donde se definen las dimensiones de las placas, los recipientes de inmersión y las características visuales antes y después de la exposición, con lo que se evidencia claramente los insumos para la reproducción del experimento.

TABLA 6. MATERIALES EMPLEADOS EN EL PROCESO EXPERIMENTAL

Material	Especificación / función
Placas de acero A36	Material base susceptible a corrosión en ambientes ácidos
Cáscara de mango	Materia prima orgánica para formulación de inhibidor verde
Extracto inhibidor	Solución inhibidora preparada en diferentes concentraciones
Tubos de PVC	Recipientes para inmersión y control de exposición ácida
Ácido clorhídrico (0.5 M)	Medio corrosivo simulado industrial
Ácido sulfúrico (0.01 M)	Simulación de lluvia ácida
Agua destilada	Neutralización y preparación de soluciones
Papel indicador de pH	Control de acidez durante el proceso

Nota. Registro fotográfico detallado disponible en Anexo A.

3.3.2 Equipos:

Para el desarrollo del proceso experimental fueron utilizados equipos de medición, control y evaluación mecánicos de las placas. La Tabla 7 resume los instrumentos utilizados en la preparación del inhibidor, en la medición de masa y en la realización de los ensayos de tracción aplicando la norma ASTM A370. Las ilustraciones de cada equipo y la aplicación del mismo en cada fase del proceso se presentan en el Anexo A y B donde se aprecia de forma visual el equipo necesario y se puede garantizar la trazabilidad del procedimiento metodológico.

TABLA 7. EQUIPOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO EXPERIMENTAL

Equipo	Función
Balanza analítica digital	Medición de masa inicial y pérdida por corrosión
Estufa de secado	Eliminación de humedad antes de pesaje final
Máquina universal	Ensayo de tracción conforme ASTM A370
Vernier digital	Control dimensional de probetas

Nota: Las fotografías completas se presentan en el Anexo A: Registro Fotográfico de materiales y equipos.

3. 4 Procedimiento Experimental

El protocolo experimental fue idealizado para comprobar la efectividad del inhibidor verde que fue producido a partir de cáscaras de mango, aplicados sobre acero A36 expuestos a medios ácidos. El protocolo fue ejecutado en siete fases que permitieron definir las condiciones de inmersión, calcular la pérdida de masa y examinar posteriormente el comportamiento mecánico de las placas. La Figura 2 muestra el flujo general del experimento.

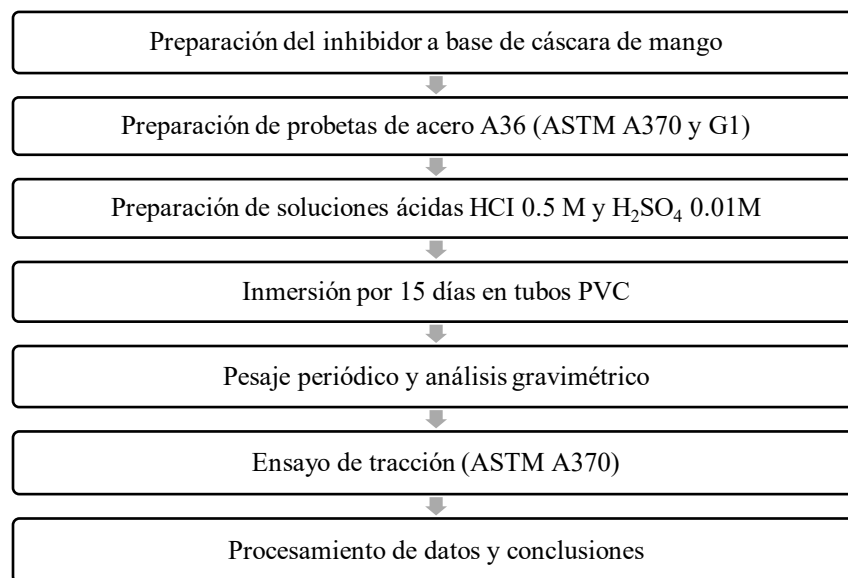


Fig. 2. Flujo general del procedimiento experimental

3.4.1 Preparación del inhibidor a base de cáscara de mango:

La preparación del inhibidor se realiza siguiendo criterios metodológicos extraídos de trabajos anteriores sobre inhibidores verdes a partir de residuos vegetales los cuales ya estipulan procesos de lavado, secado controlado, extracción acuosa y filtración que aseguran la producción de compuestos antioxidantes activos tales como taninos, flavonoides y polifenoles [10], [37] y [38]. Estas metodologías son las que han demostrado ser adecuadas para la formulación de inhibidores de corrosión aplicados al acero al carbono ya que son eficientes, sencillas y con bajo impacto medioambiental. Siguiendo estas pautas, este trabajo realizó la aplicación de un protocolo adaptado a las cáscaras de *Mangifera Indica L.* manteniendo coherencia con la literatura científica existente que permitió obtener un extracto estable y homogéneo para la realización de ensayos de inmersión.

A continuación, se exponen las etapas de la elaboración del inhibidor:

1. Selección y limpieza del material vegetal
 - Se seleccionan mangos de la variedad *Mangifera Indica L.* en estado de maduración intermedio, los cuales fueron adquiridos en un supermercado local.
 - Las cáscaras fueron retiradas manualmente y lavadas inicialmente con agua del grifo y posteriormente con agua destilada durante aproximadamente 1 minuto por fruto, al objeto de eliminar suciedad e impurezas.
2. Secado del material
 - Las cáscaras fueron sometidas a un secado a temperatura ambiente 15 -20°C durante 24 horas.
 - A continuación, el material fue colocado en una estufa de laboratorio a 48 °C durante 24 horas, para fin de reducir el contenido de humedad.
3. Trituración del material
 - Cuando el material estaba seco, las cáscaras fueron trituradas y procesadas con licuadora doméstica hasta una reducción en pequeñas partículas de aproximadamente 1–2 mm, al objeto de aumentar el área superficial del material vegetal.

4. Proceso de extracción acuosa

- Se procesaron 300 g de cáscara seca triturada mezclada con 600 mL de agua destilada, con una relación sólida: solvente de 1:2 (p/v) a 15° –18°C (temperatura ambiente).
- Se realiza una homogeneización utilizando licuadora durante 2 min para facilitar la liberación de compuestos bioactivos presentes en la parte vegetal de la planta.
- A continuación, la mezcla fue sometida a un proceso de maceración durante 24 horas a temperatura ambiente 15 – 18°C.
- Finalizado el proceso de maceración, la mezcla fue sometida a un proceso de calentamiento en placa calefactora durante 30 minutos aproximadamente a una temperatura de 60 °C para favorecer la extracción de compuestos solubles presentes en la parte vegetal.

5. Filtrado del extracto y obtención de solución madre

- Finalizado el proceso de calentamiento del algodón, la mezcla se filtró usando tela de limpia como medio de filtrado obteniendo el sólido, separado del extracto líquido.
- El filtrado obtenido fue de aproximadamente 300 mL, dado que parte del cartucho fue absorbido por el material vegetal durante el proceso de maceración y filtrado, y fue considerado como extracto acuoso o la solución madre, utilizada posteriormente para preparar las distintas concentraciones del inhibidor.
- El extracto obtenido se utiliza inmediatamente para preparar las distintas concentraciones del inhibidor, puesto que se evita realizar procesos de almacenamiento prolongados.

6. Determinación del pH del extracto

- El pH fue determinado utilizando papel indicador y se obtuvo un valor de pH = 4.5, el cual es coherente con los extractos naturales que han sido descritos como potentes inhibidores de la corrosión [10].

7. Elaboración de soluciones de distintas concentraciones (10 %, 15 %, 25 % y 30 %)
- A partir del extracto acuoso obtenido (solución madre) elaboramos diferentes concentraciones del inhibidor para estudiar su efecto sobre la corrosión del acero A36.
 - Cada solución se preparó en un volumen final de 300 mL, para lo cual se utilizó el volumen correspondiente a la solución madre de acuerdo a la concentración a realizar, completando el resto con agua destilada.
 - Las proporciones que se utilizaron fueron las siguientes [37], [38].
 - **10 %:** 30 mL de extracto madre + 270 mL de agua destilada
 - **15 %:** 45 mL de extracto madre + 255 mL de agua destilada
 - **25 %:** 75 mL de extracto madre + 225 mL de agua destilada
 - **30 %:** 90 mL de extracto madre + 210 mL de agua destilada
 - Con posterioridad, estas soluciones fueron utilizadas en los ensayos de inmersión de las placas de acero A36 para determinar la eficacia inhibidora del extracto de cáscara de mango.
8. Registro fotográfico
- Se conserva evidencia fotográfica del tratamiento del inhibidor (ver Anexo A).

3.4.2 Preparación de las probetas de acero A36:

La preparación de las placas de acero A36 se lleva a cabo conforme a los lineamientos de la norma ASTM A370, la cual describe las dimensiones y características geométricas necesarias para la realización de ensayos mecánicos de tracción de productos de acero. La norma ASTM A370 garantiza que las placas presenten áreas de deformación uniforme y una geometría bastante apropiada para permitir la obtención de mediciones precisas de resistencia, ductilidad y comportamiento estructural [36].

En la Figura 3 se muestran las dimensiones finales de las placas que se han fabricado, las cuales también aparecen en el (Anexo A) con la evidencia desarrollada fotografiando el proceso de corte, de identificación y de acondicionamiento previo. Esta primera etapa inicial permite conseguir que todas las placas tengan unas condiciones homogéneas antes de ser sometidas a los medios corrosivos.

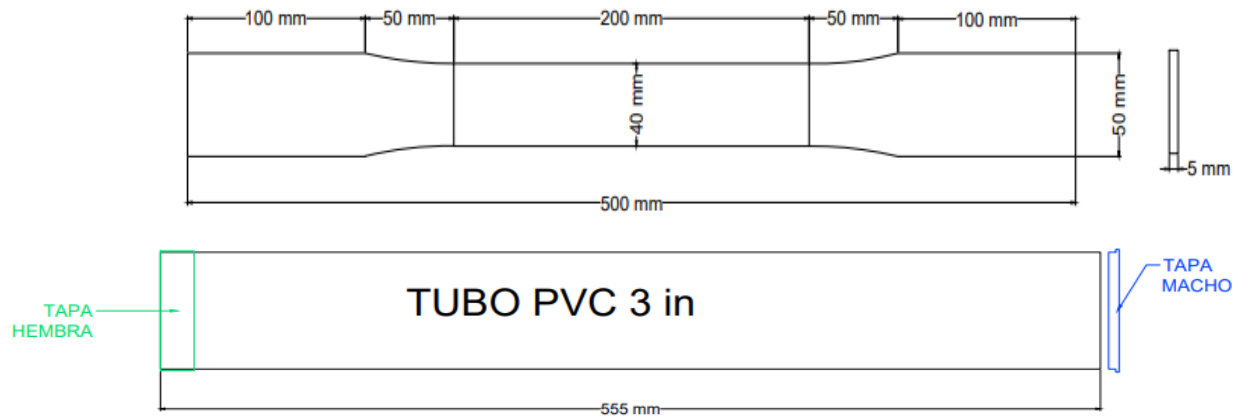


Fig. 3 Placas de Acero A36 $e=5$ mm y Probetas de PVC

A continuación, se detalla paso a paso la preparación de las placas de acero A36:

1) Selección y dimensionamiento del material

- Se utilizaron placas de acero A36 de 5 mm de espesor, provistas de la correspondiente certificación por parte del proveedor.
- Las placas fueron cortadas con un equipo CNC (Control Numérico Computarizado) como se puede apreciar en el Anexo A, garantizando de esta forma, la precisión dimensional, bordes uniformes y la correcta geometría de las placas necesarias para los ensayos mecánicos, tal y como ordena la ASTM A370, la cual especifica un tramo central que sea reducido con la finalidad de plasmar la deformación en la sonda durante el ensayo.
- Las dimensiones de las probetas fueron:
 - Longitud total: 500 mm
 - Tramo reducido: 200 mm de largo x 40 mm de ancho
 - Zonas de transición: 50 mm a cada lado
 - Extremos rectos: 100 mm en ambos lados

La Figura 3 presenta el plano final aplicado en la práctica de fabricación.

2) Limpieza inicial, acorde con la norma ASTM G1

- Se realizó una limpieza abrasiva (lijas #150), agua y detergente neutro que sirvió para eliminar polvo, partículas metálicas, grasas y / o residuos del proceso de corte.
- Las probetas, una vez secadas, fueron manipuladas con guantes.

3) Identificación y codificación

- En cada placa se marca el extremo para ser identificado con un código que la relacionaba con las condiciones experimentales:
 - T: Testigo sin inhibidor
 - M10: Inhibidor al 10 %
 - M15: Inhibidor al 15 %
 - M25: Inhibidor al 25 %
 - M30: Inhibidor al 30 %
 - M25H: Inhibidor al 25 % + H₂SO₄ (simulación de lluvia ácida).

4) Registro de las dimensiones y control

- Las dimensiones se verificaron con un calibrador con el fin de que la tolerancia respetara lo requerido en las normas ASTM A370.
- En caso de ligeras diferencias, se rectificaron los bordes mediante un desbaste suave.

5) Pesado inicial

- Cada placa se pesó en una balanza electrónica de precisión (0,01 g) (ver Anexo B) quedando registrada la masa antes de la inmersión.
- Estos datos fueron la base para el cálculo de pérdida de masa por corrosión con la que se realizó el análisis gravimétrico.

6) Registro del estado fotográfico

- Se realizaron fotos de todas las placas antes del ensayo (ver Anexo A) quedando documentado el estado superficial de las placas y sus condiciones iniciales.

3.4.3 Preparación de las soluciones ácidas

La preparación de los medios corrosivos utilizados en el experimento se lleva a cabo en función de las pautas generales trazadas en la norma ASTM G31 que definen entre otros los procedimientos para ensayos de inmersión en las soluciones corrosivas [34]. Con base en esta norma y en las metodologías que la bibliografía experimental proporciona en lo referente a la corrosión en los aceros al carbono se prepararon soluciones ácidas, como el ácido clorhídrico (HCl) a 0.5 M y el ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 0.01 M. El segundo de los ácidos fue utilizado con el propósito de condiciones similares equiparables a lluvia ácida. En (Anexo A y Anexo B) se presentan los materiales y equipos utilizados en la preparación y verificación de las soluciones. A continuación se muestra el resumen de los cálculos para obtener las cantidades de soluciones ácidas, en las tablas 8, 9 y 10:

TABLA 8. REACTIVOS CONCENTRADOS — DATOS Y MOLARIDAD CALCULADA

Reactivo	% p/p (etiqueta)	Densidad usada (g·mL ⁻¹)	Molaridad concentrada (M)
HCl (ácido clorhídrico)	37 %	1,18	11,97 M
H ₂ SO ₄ (ácido sulfúrico)	98 %	1,84	18,39 M

Nota. La molaridad de las soluciones de reactivo concentrado fue considerada a partir del porcentaje en peso que indicaba el fabricante y de las densidades de referencia del ácido clorhídrico al 37 % ($\rho \approx 1,18 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) y del ácido sulfúrico al 98 % ($\rho \approx 1,84 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$).

TABLA 9. VOLUMEN DE CONCENTRADO REQUERIDO POR 1 L DE SOLUCIÓN

Solución final	M ₂ (mol·L ⁻¹)	V ₂ (L)	V ₁ (mL) concentrado
HCl 0.5 M	0.5	1.0	41,79 mL
H ₂ SO ₄ 0.01 M	0.01	1.0	0,5438 mL

Nota. Los volúmenes de reactivo concentrado que se necesitan para preparar 1 L de la disolución han sido calculados a partir de la ecuación de la dilución: $M_1V_1 = M_2V_2$. Para todas las preparaciones se utiliza el reactivo concentrado diluyéndolo con agua, siguiendo los procedimientos de seguridad recomendados para manejar soluciones ácidas.

TABLA 10. VOLUMEN DE CONCENTRADO POR TUBO PVC (VTUBO = 1800 mL)

Solución final	Vtubo (mL)	Fracción (Vtubo/1000 mL)	V ₁ por tubo (mL) concentrado	Volumen final por tubo
HCl 0.5 M	1800	1.8	75,22 mL (HCl 37 %)	1800 mL
H ₂ SO ₄ 0.01 M	1800	1.8	0,98 mL (H ₂ SO ₄ 98 %)	1800 mL

Nota. Los valores se han obtenido asumiendo para cada uno de los tubos de PVC un volumen hasta de 1800 mL. El volumen de ácido concentrado por tubo son los obtenidos para 1 L multiplicados por el factor volumétrico 1,8 y a partir de los volúmenes finales se ha completado con volumen de agua destilada hasta la capacidad total del recipiente.

Las soluciones corrosivas se obtuvieron a partir de reactivos comerciales concentrados a partir de la ecuación de dilución $M_1V_1 = M_2V_2$ teniendo en cuenta las características de composición del concentrado. Con densidades típicas (HCl 37 %: $1,18 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$; H₂SO₄ 98 %: $1,84 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) la molaridad del concentrado resulta ser $\approx 11,97 \text{ M}$ para HCl y $\approx 18,39 \text{ M}$ para H₂SO₄.

Para obtener la solución de HCl 0.5 M se calcularon 41,79 mL de HCl concentrado por litro y para la solución de H₂SO₄ 0.01 M se calcularon 0,5438 mL por litro. Los recipientes de inmersión (tubos PVC) tienen un volumen útil de 1800 mL y los volúmenes de concentrado por tubo fueron 75,22 mL de HCl 37 % y 0,98 mL de H₂SO₄ 98 %. En todas las diluciones se vertió el ácido sobre el agua con el fin de controlar la liberación de calor; las soluciones se homogeneizaron y comprobaron con papel indicador de pH obteniendo un pH inicial medido de 0,5 para HCl y de 2 para H₂SO₄.

3.4.4 Inmersión de las probetas en soluciones ácidas:

El ensayo gravimétrico se centraba en la etapa de inmersión, en el que las placas de acero A36 fueron expuestas a entornos ácidos controlados para estudiar la acción corrosiva y la eficacia del inhibidor vegetal formulado anteriormente. Este ensayo se llevó a cabo siguiendo los criterios experimentales usados en estudios previos de corrosión por inmersión, donde se contemplan medios estáticos, inmersión total y periodos prolongados de exposición [34].

Cada placa se colocó de forma vertical en tubos de PVC con un volumen útil de 1800 mL, dado el hecho de que se sumergieron por completo en la solución ácida. Con el fin de conseguir el estancamiento y mantener inalterada la concentración del medio corrosivo durante los 15 días de exposición, los tubos fueron sellados con tapas hembra de PVC. El ensayo se mantuvo bajo las condiciones ambientales del laboratorio ($\approx 15\text{-}18 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura media de la ciudad de Riobamba), sin exposición a la radiación solar directa y sin agitación alguna (se ha considerado un sistema de corrosión por inmersión estática como para ensayos de comparación de inhibidores orgánicos) [37].

Control del pH en solución ácida con inhibidor

Con el fin de fijar el pH constante se estableció un límite de tolerancia de $\pm 0,5$; si el cambio llegara a ser mayor a esta tolerancia, ya sea por la reacción de corrosión o por la reacción entre el extracto y la mezcla al trabajar sin el inhibidor entonces se establece la estabilización con microgotas de la solución ácida madre. Sin embargo, dadas las características de los recipientes (tubos de PVC sellados), este seguirá siendo estable en la presencia del inhibidor. En contraposición, si se sigue el medio agresivo (sin protección) se visualizará el cambio, que es la comprobación de la agresividad del medio, que hace necesario realizar el seguimiento viendo los valores de pH que se encuentran en la Tabla 11.

TABLA 11. SEGUIMIENTO DE pH EN EL SISTEMA DE INMERSIÓN

Muestra / Medio	pH mínimo	pH máximo	pH promedio	Observación
HCl 0.5 M	0.5	1.5	0.70	Mayor consumo de H ⁺
HCl 0.5 M + Inhibidor	0.5	1.5	1.0	Estabilidad por protección
H ₂ SO ₄ 0.01 M	2.0	3	2.5	Desplazamiento de acidez
H ₂ SO ₄ 0.01 M + Inhibidor	2.0	3	2.3	Variación mínima

Nota. Los valores de pH corresponden al rango de variación registrado durante el periodo de inmersión de 15 días.

3.4.5 Ensayo gravimétrico – pérdida de masa

Durante un período de 15 días de exposición a las diferentes condiciones de ataque corrosivo, el ensayo gravimétrico estuvo constituido como la técnica más adecuada para el seguimiento del ataque corrosivo en las placas de acero A36. Para llevar a cabo este método, se aplicó de manera parcial la norma ASTM G1, sólo en lo que respeta a la preparación y desengrase inicial de los especímenes de forma tal que se garantizará una superficie totalmente libre de impurezas. Sin embargo, para el pesaje diario y la limpieza de los productos de corrosión, se recurrió al método de limpieza pasiva por escurrimiento en lugar de aquel que indica la norma, que es una limpieza abrasiva. La razón de esta adaptación metodológica fue la preservación de la película del inhibidor de Mangifera Indica L. Un procedimiento mecánico o químico fuerte habría destruido el complejo adsorbente, circunstancia que afectará tanto la evaluación de eficacia como la cinética real del proceso corrosivo a través del tiempo. En cuanto al proceso de inmersión, se recogió de prácticas estándar en el laboratorio ASTM G31 [34].

Procedimiento:

1. **Peso inicial (W_0).** Cada placa se pesó antes de la inmersión, utilizando para ello la balanza analítica con precisión (0,0001 g) y fue registrada como masa inicial W_0 (g).
2. **Registro periódico.** Se llevaron a cabo pesajes periódicos (diarios) de las placas antes de sumergirse durante los 15 días de exposición, anotándose la masa en cada control W_t (g) y la fecha del mismo. Para cada día i se calculó la pérdida acumulada de masa $\Delta W_i = W_0 - W_f$
3. **Secado anterior al pesaje.** Antes de cada pesaje, las placas fueron extraídas del tubo y escurridas, secadas al medio ambiente sobre papel absorbente hasta eliminar el exceso de líquido.
4. **Peso final (W_f).** Al final de los 15 días, se anotó el peso final W_f (g) una vez secado de manera natural.
5. **Registro y almacenamiento.** Todas las lecturas estaban anotadas en el registro elaborado en Excel y se acompañan de fotografías a correspondiente (Anexo B).

3.4.5.1 Cálculos y fórmulas (SI):

De conformidad a lo indicado bajo la norma ASTM G31 de ensayos de inmersión, la tasa de corrosión se determina relacionando la pérdida de masa con el área expuesta, el tiempo de exposición y la densidad del material [34]. La Ecuación 1 presenta la tasa de corrosión en formato ASTM:

$$CR_{mm/y} = \frac{87.6 * W_{mg}}{p \cdot A \cdot t_h} \quad (1)$$

Nota: La constante 87.6 es el resultado de la conversión de unidades (mg→g, cm→mm y horas→año) como se ha practicado en la norma.

Donde:

- $CR_{mm/y}$ = es la tasa de corrosión en $mm \ a^{-1}$
- W_{mg} = es la masa pérdida expresada en (mg)
- A = área expuesta de la probeta (cm^2).
- t_h = tiempo de exposición (horas).
- p = densidad del acero ($g \cdot cm^{-3}$). Para acero A36 usar $\rho \approx 7,85 \ g \cdot cm^{-3}$ [39].

Ecuación (2) — forma práctica (W en gramos, t en días):

Dado que en este estudio se llevó registros de pesos en gramos y la frecuencia diaria, es preferible usar la forma equivalente:

$$CR_{mm/y} = \frac{3650 * \Delta W_g}{p \cdot A \cdot t_d} \quad (2)$$

Nota: Derivación breve la constante 3650 proviene de pasar de la expresión base (W en g, t en días) a mm·a⁻¹: 87600/24=3650, siendo 87600 = 10×24×365 las conversiones geométricas y temporales.

Donde:

- ΔW_g es la masa perdida en gramos (= $W_0 - W_f$)
- t_d es el tiempo en días

Eficiencia del inhibidor (%)

Utilizando tasas (o equivalentes de pérdida de masa) se determina la eficiencia porcentual del inhibidor frente al testigo:

$$n(\%) = \frac{CR_{control} - CR_{inh}}{CR_{control}} \times 100 \quad (3)$$

O, si se toma la pérdida de masa acumulada (igual validez si A y t son iguales):

$$n(\%) = \frac{\Delta W_{control} - \Delta W_{inh}}{\Delta W_{control}} \times 100 \quad (4)$$

3.4.6 Metodología ensayo de Tracción en acero A36:

La experiencia de tracción fue la prueba mecánica que utilizamos para evaluar el comportamiento estructural del acero A36 frente a la oxidación y el alterante vegetal que se formuló tal como se explica en el experimento preparado con la cáscara / epidermis de mango. Por tanto, con dicha prueba conseguimos evaluar varios parámetros tales como esfuerzos de fluencia, último esfuerzo y elongación los cuales son los parámetros mecánicos más significativos que permiten evaluar el comportamiento del acero usado en condiciones de servicio. La modalidad de la experiencia se llevó a cabo tal como se especifica en la norma ASTM A370 que presenta los métodos de ensayo en los productos de acero en la experiencia de tracción, la geometría y sujeción e intensidad de la carga[36].

Las dimensiones que tenían las probetas en cuestión que se utilizaban (se observan en la Figura 3) fueron hechas con esta norma antes de la exposición a los ambientes corrosivos.

Método de ensayo

Paso 1. Condiciones de las probetas en el inicio del ensayo

Las placas fueron retiradas de las soluciones corrosivas luego de la etapa de la inmersión. Tras este primer paso, las placas se secaron al ambiente durante aproximadamente 48 h y posteriormente se almacenaron sin ningún tipo de tratamiento. No se aplicó limpieza química conforme a la norma ASTM G1, ya que, en esta etapa, era necesario que las placas contaran con la presencia de productos de corrosión para poder evaluar el daño mecánico real provocado por el ataque químico.

Paso 2. Equipamiento que se utilizo

El ensayo se lleva a cabo en una máquina universal de ensayos (capacidad: 500 KN; modelo: UH-X/FX) con extensómetro electrónico y software de adquisición de datos. La máquina se encontraba calibrada de acuerdo a los protocolos del laboratorio.

Paso 3. Sujeción de placas

Las probetas planas se situaron en unas mordazas hidráulicas, para así conseguir un correcto centrado que impidiese la flexión, u esfuerzos fuera de eje.

Paso 4. Velocidad de carga

El ensayo se llevó a cabo a una velocidad de desplazamiento del cabezal de 5 mm/min según lo establecido en las recomendaciones de ASTM A370 para placas planas de bajo espesor.

Paso 5. Registro de datos

Durante el ensayo se registraron:

- carga aplicada,
- desplazamiento,
- deformación,
- esfuerzo ingenieril,
- punto de fluencia,
- carga máxima,
- elongación final después de la rotura.

Se conservaron las placas fracturadas para su posterior registro fotográfico (ver Anexo C).

Cálculos derivados del ensayo

La información obtenida del ensayo se procesa mediante las ecuaciones estándar, para materiales en tracción las cuales se describen posteriormente, a continuación:

a) Esfuerzo ingenieril:

$$\sigma = F/A_0 \quad (5)$$

Donde:

- σ = esfuerzo ingenieril (MPa)
- F = carga aplicada (N)
- A_0 = área inicial de la sección transversal (mm²)

b) Deformación ingenieril

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

Donde:

- ε = deformación ingenieril (adimensional)
- ΔL = cambio en longitud (mm)
- L_0 = longitud calibrada inicial (mm)

c) Esfuerzo último

$$f_u = \sigma_{m\acute{a}x} \quad (7)$$

d) Elongación final

$$Elongación (\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (8)$$

donde L_f es la longitud final entre marcas tras la ruptura.

Cálculo de Resiliencia y tenacidad

La resiliencia y tenacidad del acero A36 se determinaron mediante el cálculo de las áreas bajo la curva esfuerzo-deformación, usando el software OriginLab, lo que permitió integrar la información obtenida en las pruebas mediante carga y desplazamiento obtenidos desde la máquina universal, con el fin de poder llegar a cuantificar la energía absorbida en las fases elásticas y plásticas del material.

Resiliencia

Para el área debajo de la curva esfuerzo–deformación en el dominio elástico:

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad (9)$$

donde:

- U_r = resiliencia (MJ/m³)
- σ = esfuerzo aplicado (MPa)
- ε_y = deformación correspondiente al límite de fluencia.

Tenacidad

Corresponde al área total bajo la curva esfuerzo–deformación hasta el punto de rotura:

$$U_t = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (10)$$

donde:

- U_t = tenacidad (MJ/m³)
- σ = esfuerzo aplicado (MPa)
- ε_f = deformación en la fractura.

3.5 Análisis Estadístico

Para el tratamiento de los datos recogidos en el ensayo gravimétrico, se analizó la distribución de la velocidad de corrosión de cada grupo experimental (testigo, 10 %, 15 %, 25 % y 30 % en HCl a 0.5 M, además del ensayo en H₂SO₄ al 0.01 M). Ateniéndonos a que cada condición contiene tres observaciones, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, apropiada para muestras pequeñas ($n < 50$) [40]. Esta prueba indicaba si los datos de cada uno de los grupos cumplen con una distribución normal, la cual es un supuesto clave para la aplicación de métodos paramétricos.

Los valores de significancia obtenidos dejaban ver que algunos grupos tienen $p > 0.05$ y al mismo tiempo, al menos uno de los tratamientos tiene $p < 0.05$, lo que indicaba que no se cumple el supuesto de normalidad para todos los grupos de datos. Por esta razón se opta, por descartar el uso de las pruebas paramétricas basadas en promedio y se pasó a utilizar el enfoque no paramétrico para la comparación entre tratamientos.

Dada la falta de normalidad, fue realizada la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual se utiliza para evaluar si existe diferencia entre medianas y en este caso para la comparación de las medianas entre tres o más grupos de forma independiente [41]. Dicha prueba trata de comprobar si las medianas de las velocidades de corrosión de los diferentes tratamientos con inhibidor y las medianas del grupo testigo eran diferentes respecto a la variable de resultado.

El análisis estadístico mediante la prueba de Kruskal–Wallis resultó en un estadístico $X^2 = 15.6$ con 5 grados de libertad ($gl = 5$) y con un valor de $p = 0.008$. Como el valor de p es menor al nivel de significancia determinado ($\alpha = 0.05$), es suficiente para rechazar la hipótesis nula, lo que indica que existen diferencias entre al menos dos de los grupos evaluados.

Finalmente, se realizaron comparaciones múltiples post-hoc por el método Dwass–Steel–Critchlow–Fligner para evaluar si existen diferencias entre pares de tratamientos; Sin embargo no se pudieron evidenciar diferencias entre pares de grupos ($p > 0.05$), lo que puede ser explicado a partir del pequeño tamaño experimental.

3.6 Limitaciones

El desarrollo de esta investigación estuvo marcado por diversas limitaciones asociadas con el ámbito del estudio y con las condiciones experimentales que se derivaron:

- Condiciones ambientales controladas.

Los ensayos que se realizaron a cabo se realizaron en condiciones de laboratorio, sin modificar las condiciones externas como el contraste de temperatura, humedad o ciclos de exposición. Esto limitará la extrapolación de los resultados a situaciones reales donde la corrosión viene condicionada por factores ambientales que funcionan simultáneamente.

- Tamaño pequeño de la muestra.

Cada tratamiento tuvo tres probetas, que representan un número adecuado para los análisis exploratorios pero escaso para realizar inferencias estadísticas o la aplicación de un modelo predictivo, por ejemplo.

Variabilidad intrínseca del material orgánico.

A pesar de que se utiliza una única variedad (*Mangifera Indica L.*), la composición fitoquímica de la piel puede variar, dependiendo de la madurez, de la época del año o del origen, que puede afectar a la uniformidad del inhibidor en los estudios posteriores.

- Falta de caracterización química del extracto.

No se realizaron análisis espectrofotométricos o cromatográficos que permitieran la identificación de los compuestos activos que intervienen en el proceso inhibitorio, limitando de este modo la tarea de determinar con precisión los mecanismos inhibidores que se producen.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Datos Pérdidas de masa

En este apartado se recopilan los datos experimentales que corresponden a la pérdida de masa diaria de las placas de acero A36 sometidas a las distintas condiciones de ensayo a lo largo de 15 días de exposición. Para facilitar la asimilación de los datos, se presentan en tablas, siendo la primera, la que acumula la información de los grupos tratados en HCl 0.5 M con los inhibidores del 0 %, 10 % y 15 %, mientras que la segunda es la que acumula los grupos tratados en HCl 0.5 M con concentraciones del inhibidor del 25 % y 30 % y el grupo tratado con H₂SO₄ 0.01 M (lluvia ácida) del 25 %. Finalmente, las tablas 12 y 13 son el punto de partida para el cálculo de las pérdidas acumulativas, las tasas de corrosión y para las comparaciones estáticas entre grupos de estudio.

TABLA 12. DATOS DE PÉRDIDA DE MASA GRUPO 1

Tiempo (días)	0 % inhibidor + 0.5 M de HCl			10 % inhibidor + 0.5 M de HCl			15 % inhibidor + 0.5 M de HCl		
	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)
0	852,3	852,4	852,1	852,2	852,3	852,1	852,3	852,4	852,1
1	849,5	849,8	849,4	850,8	850,7	850,9	851,4	851,6	851,5
2	848,2	848,7	848,6	850,6	850,4	850,6	850,8	851,2	851,1
3	848	848,2	848,1	850,2	850,1	850,3	850,5	850,6	850,7
4	847,5	847,7	847,4	849,9	850	850,1	850,2	850,3	850,2
5	847,2	847,5	846,8	849,7	849,8	849,8	850	850,1	850
6	846,8	847,1	846,3	849,4	849,6	849,5	849,8	849,9	849,7
7	846,5	846,8	845,9	849,1	849,4	849,1	849,5	849,7	849,4
8	846,1	846,5	845,4	848,8	849,1	848,9	849,1	849,3	849,2
9	845,8	846,2	845,1	848,6	848,8	848,6	848,9	849,1	849
10	845,3	845,9	844,7	848,6	848,5	848,4	848,6	848,8	848,7
11	844,7	845,3	844,2	848,4	848,2	848,1	848,3	848,5	848,4
12	844,3	844,6	843,9	848,3	847,9	847,8	848	848,1	848,2
13	843,2	844,1	843,1	848,2	847,6	847,6	847,6	847,8	847,8
14	842,6	843,7	842,6	847,9	847,4	847,5	847,5	847,4	847,3
15	841,7	842,9	841,8	847,9	847,1	847,4	847,4	847,2	847,1

Nota: Los valores son el registro de masa diario (gramos) de las placas de acero A36 durante 15 días de inmersión continua en soluciones de HCl 0.5 M con concentraciones de inhibidor del 0 %, 10 % y 15 %; el Día 0 representa la masa inicial, antes de la introducción en la solución.

TABLA 13. DATOS DE PÉRDIDAS DE MASA GRUPO 2

Tiempo (días)	25 % inhibidor + 0.5 M de HCl			30 % inhibidor + 0.5 M de HCl			25 % inhibidor + 0.01 M de H ₂ SO ₄ (Lluvia ácida)		
	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)
0	852,3	852,2	852,1	852,3	852,1	852,3	853,1	852,9	853,2
1	851,2	851,4	851,6	851,7	851,4	851,5	852,8	852,5	852,7
2	850,8	850,9	851,2	851,3	850,9	851,1	852,7	852,2	852,7
3	850,4	850,6	850,7	850,8	850,5	850,7	852,7	852,2	852,6
4	850,1	850,1	850,3	850,4	850,1	850,2	852,5	852,1	852,4
5	849,9	849,8	850,1	850,2	849,9	849,7	852,4	852,1	852,3
6	849,9	849,7	849,7	849,8	849,5	849,4	852,2	852,1	852,1
7	849,7	849,5	849,6	849,4	849,2	849,1	852,1	852	852,1
8	849,5	849,2	849,4	849	848,7	848,8	851,9	851,8	851,9
9	849,3	849	849,1	848,6	848,1	848,2	851,9	851,8	851,9
10	849,1	848,8	848,9	848,1	847,7	847,9	851,7	851,7	851,9
11	848,9	848,5	848,7	847,8	847,4	847,6	851,6	851,7	851,8
12	848,7	848,2	848,4	847,5	847,1	847,2	851,6	851,5	851,8
13	848,5	848	848,1	847,1	846,7	846,9	851,4	851,5	851,7
14	848,2	847,8	847,9	846,8	846,4	846,5	851,3	851,4	851,7
15	847,9	847,5	847,7	846,4	846,1	846,2	851,3	851,4	851,6

Nota: Los valores son el registro de masa diario (gramos) de las placas de acero A36 durante 15 días de inmersión continua en soluciones de HCl 0.5 M con concentraciones de inhibidor del 25 %, 30 % y 25 % H₂SO₄ 0.01 M (lluvia ácida). el Día 0 representa la masa inicial, antes de la introducción en la solución.

A continuación, en la figura 4 se muestran las variaciones de la masa de las probetas de acero A36 durante 15 días de exposición a soluciones ácidas con inhibidores de cáscara de mango, a las concentraciones correspondientes a a) 0 %, b) 10 %, c) 15 %, d) 25 %, e) 30 % de inhibidor en solución HCl 0.5M, así como f) 25 % H₂SO₄. Los gráficos exhiben la pérdida de masa que presenta cada placa durante la exposición, ya que en cada gráfico se observa que las mediciones obtenidas para las placas que contienen inhibidor experimentan una menor pérdida de masa que las del grupo control (0 % inhibidor), lo que prueba la actividad de los inhibidores. También se observa que la pérdida de masa disminuye progresivamente en función del aumento de la concentración del inhibidor, hasta 25 % en el medio de HCl, mientras que con concentraciones mayores se evidencian variaciones en el comportamiento del sistema.

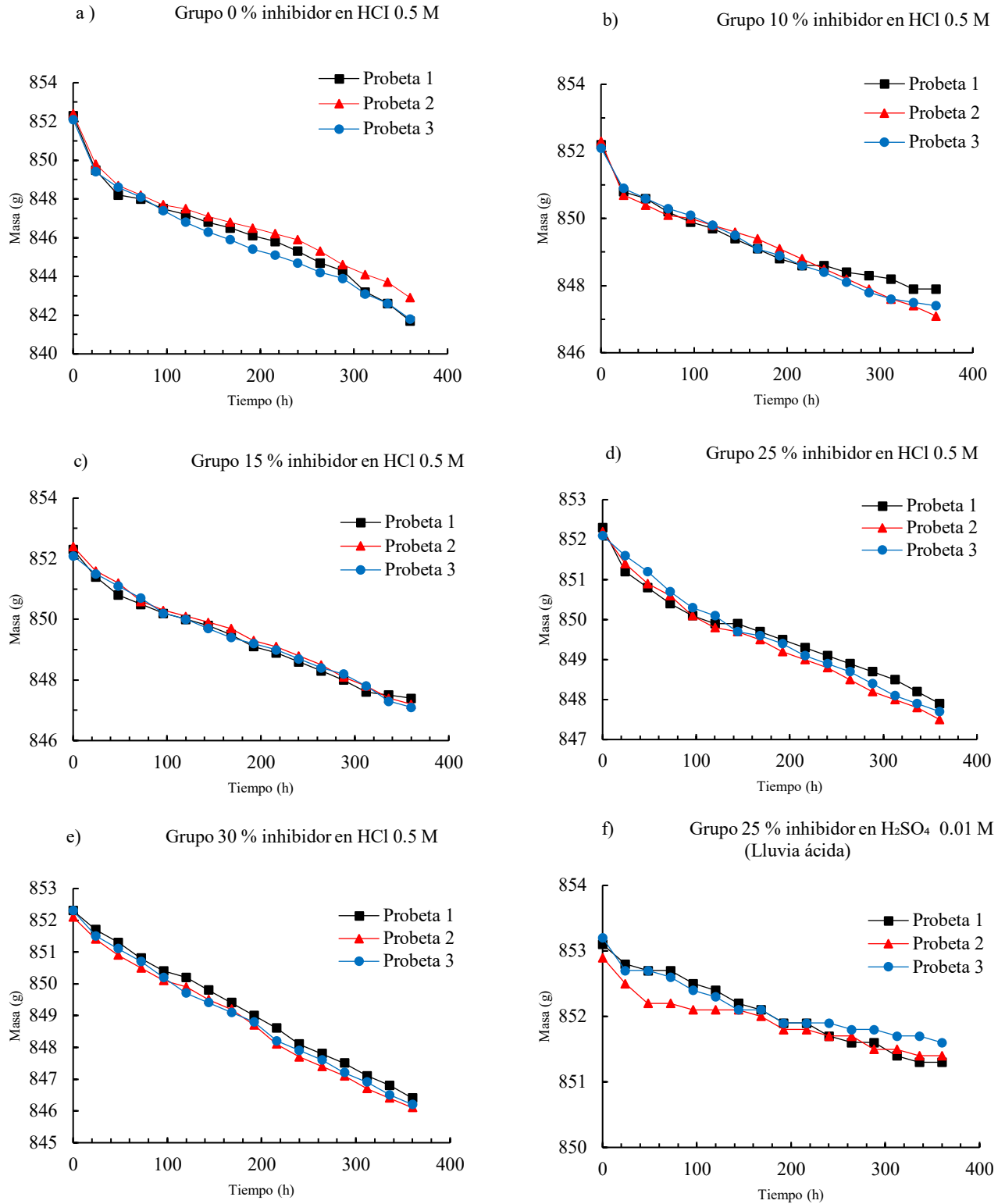


Fig. 4. Pérdidas de masa a 0.5 M de HCl, a) 0 % de inhibidor, b) 10 % de inhibidor, c) 15 % de inhibidor, d) 25 % de inhibidor, e) 30 % de inhibidor y Pérdidas de masa a 0.01M H₂SO₄ con f) inhibidor 25 %

4.2 Cálculo de pérdida de masa y Velocidad de Corrosión

La pérdida de masa se considera el criterio fundamental para evaluar el estado del acero A36 durante un período de 15 días de exposición a soluciones ácidas, y representa el parámetro que permitió medir la capacidad de la solución de ácido clorhídrico (0.5 M) y ácido sulfúrico (0.01 M) “Lluvia ácida” así como la influencia del inhibidor que fue elaborado a partir de cáscaras de *Mangifera Indica L.* que se propusieron en el presente trabajo en sus diferentes condiciones.

TABLA 14. VARIACIÓN DE MASA DEL GRUPO 1

Tiempo (días)	0 % inhibidor + 0.5 M de HCl			10 % inhibidor + 0.5 M de HCl			15 % inhibidor + 0.5 M de HCl		
	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2,8	2,6	2,7	1,4	1,6	1,2	0,9	0,8	0,6
2	1,3	1,1	0,8	0,2	0,3	0,3	0,6	0,4	0,4
3	0,2	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4
4	0,5	0,5	0,7	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5
5	0,3	0,2	0,6	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
6	0,4	0,4	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
7	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3
8	0,4	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,2
9	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
10	0,5	0,3	0,4	0	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
11	0,6	0,6	0,5	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
12	0,4	0,7	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2
13	1,1	0,5	0,8	0,1	0,3	0,2	0,4	0,3	0,4
14	0,6	0,4	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	0,5
15	0,9	0,8	0,8	0	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2

Nota: Los datos corresponden a la pérdida diaria de masa (gr) de las sondas de acero A36 expuestas durante 15 días a las soluciones ácidas determinadas en los distintos tratamientos con mediciones del inhibidor. La pérdida fue calculada de acuerdo a la diferencia de peso de cada día respecto al día anterior.

TABLA 15. VARIACIÓN DE MASA DEL GRUPO 2

Tiempo (días)	25 % inhibidor + 0.5 M de HCl			30 % inhibidor + 0.5 M de HCl			25 % inhibidor + 0.01 M de H ₂ SO ₄ (Lluvia ácida)		
	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,1	0,8	0,5	0,6	0,7	0,8	0,3	0,4	0,5
2	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1	0,3	0
3	0,4	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4	0	0	0,1
4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,2	0,1	0,2
5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,5	0,1	0	0,1
6	0	0,1	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0	0,2
7	0,2	0,2	0,1	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	0
8	0,2	0,3	0,2	0,4	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2
9	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,6	0	0	0
10	0,2	0,2	0,2	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
11	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0	0,1
12	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0	0,2	0
13	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0	0,1
14	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1	0
15	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0	0	0,1

Nota: Todas las mediciones fueron realizadas con una balanza digital de precisión ± 0.01 g bajo las mismas condiciones ambientales de laboratorio.

Interpretación técnica:

A partir de los rendimientos de la tabla 14 y 15, podemos concluir que la pérdida de masa más significativa ocurre entre las primeras 48 h de exposición, donde todas las placas muestran una disolución más intensa por el choque inicial con el medio ácido. A partir de este intervalo horario, la variación diaria disminuye considerablemente y empieza a mostrarse más estable, lo que evidenciará la llegada del sistema corrosivo a una atmósfera menos agresiva.

Por otro lado, también se observa el efecto positivo en las concentraciones del (10 %, 15 %, 25 % y 30 %) en HCl 0.5M, la pérdida de masa acumulada disminuye. Mientras donde la concentración del 25 % fue la que presentó menor pérdida de masa de todas las concentraciones evaluadas posiblemente como fruto de un equilibrio entre la concentración de inhibidor en disolución y su adsorción sobre la superficie del acero, añadiéndose así, una película estable y efectiva.

Al incrementar la concentración al 30 %, ya no se producirá una mayor mejora, pese a un incremento de moléculas de inhibidor en solución, puesto que la superficie metálica ya había alcanzado un límite de saturación de adsorción, el aumento de moléculas de inhibidor genera desorden molecular y afecta a la estabilidad y a la uniformidad de la película protectora, limitando así la protección.

En el caso de la solución de H_2SO_4 0.01 M (simulando la lluvia ácida), en la concentración a evaluar del 25 % se puso de manifiesto pérdida de masa diaria mínima y estabilización temprana, observar un efecto protector del inhibidor en este medio; no obstante, como únicamente se evaluó esta concentración, no se puede determinar cuál de ellas podría ser la más efectiva en relación con el resto de las concentraciones.

Para el análisis de la velocidad de corrosión, tenemos los siguientes datos:

Área de las placas: 505 cm²

Volumen de las placas: 112.5 cm³

En la tabla 16 se presenta la pérdida total de masa, en la que se calcula la pérdida total de masa como la diferencia entre el peso inicial de las placas (día 0) y el del peso final 15 días tras la exposición al medio corrosivo, tal y como se ha determinado previamente mediante la metodología presentada en la Ecuación 2. Tal inventiva proporciona una medida integrada de la corrosión acumulada utilizada en todo el período de ensayo, facilitando en consecuencia la comparación de la pérdida de masa, bien sea del inhibidor o de los medios agresivos examinados.

TABLA 16. PÉRDIDA TOTAL DE MASA DE LAS PROBETAS DE ACERO A36 (15 DÍAS)

Grupo de estudio	Placa 1 (gr)	Placa 2 (gr)	Placa 3 (gr)	ΔW promedio (gr)
0 % inhibidor + 0.5 M HCl	10,60	9,50	10,30	10,13
10 % inhibidor + 0.5 M HCl	4,30	5,20	4,70	4,73
15 % inhibidor + 0.5 M HCl	4,90	5,20	5,00	5,03
25 % inhibidor + 0.5 M HCl	4,40	4,70	4,40	4,50
30 % inhibidor + 0.5 M HCl	5,90	6,00	6,10	6,00
25 % inhibidor + 0.01 M H_2SO_4 (lluvia ácida)	1,80	1,50	1,60	1,63

Nota: ΔW corresponde a la diferencia entre el peso inicial (día 0) y el peso final (día 15) de cada probeta. Todas las probetas presentaron un área expuesta de 505 cm².

Interpretación técnica

Se evidencia que el grupo sin inhibidor (0 % + 0.5 M HCl) fue el que presentó la mayor pérdida total de masa, lo que denota el fuerte carácter corrosivo del medio ácido. Además, el uso de inhibidor natural para la reducción de la pérdida de masa fue más efectivo para las concentraciones de 10% y 25% en HCl. La concentración de inhibidor de 25 % en la disolución de H₂SO₄ 0.01M, simulando lluvia ácida, fue la que presentó en todo el tiempo de la prueba el menor porcentaje de pérdida de masa total, lo que validó el efecto inhibidor superior al que se tenía a en un medio atmosférico muy agresivo.

Análisis estadístico de la velocidad de corrosión

tras obtener los resultados de la pérdida de masa, utilizando análisis de varianza no paramétrico para validar los significativos de los resultados. Teniendo en cuenta la Tabla 17, se presenta el resultado de la prueba de Kruskal-Wallis donde se observa un valor de $p = 0.008$. Esto es inferior al nivel de significancia de 0.05 por lo que se valida que el uso de inhibidor de *Mangifera Indica L.* produce cambios significativos de la velocidad de corrosión del acero A36 para el medio evaluado.

TABLA 17. PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS PARA LA VARIABLE PÉRDIDA DE MASA

	X^2	gl	p
Pérdida	15.6	5	0.008

Nota. El X^2 (H) indica el valor de la diferencia de los rangos de los grupos. Si el valor $p < 0.05$, se puede rechazar la hipótesis nula (H_0), y aceptar que la aplicación del inhibidor de *Mangifera Indica L.* tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la velocidad de corrosión del acero A36.

Luego se realizó la prueba de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) para realizar comparaciones múltiples entre pares de grupos Tabla 18.

TABLA 18.COMPARACIONES POR PARES MEDIANTE EL MÉTODO (DSCF)

Grupo 1	Grupo 2	W	P
0 % HCl	10 % HCl	-2.777	0.364
0 % HCl	15 % HCl	-2.777	0.364
0 % HCl	25 % HCl	-2.818	0.347
0 % HCl	30 % HCl	-2.777	0.364
0 % HCl	25 % H ₂ SO ₄	-2.777	0.364
10 % HCl	15 % HCl	1.252	0.950
10 % HCl	25 % HCl	-0.636	0.998
10 % HCl	30 % HCl	2.777	0.364
10 % HCl	25 % H ₂ SO ₄	-2.777	0.364
15 % HCl	25 % HCl	-2.818	0.347
15 % HCl	30 % HCl	2.777	0.364
15 % HCl	25 % H ₂ SO ₄	-2.777	0.364
25 % HCl	30 % HCl	2.818	0.347
25 % HCl	25 % H ₂ SO ₄	-2.818	0.347
30 % HCl	25 % H ₂ SO ₄	-2.777	0.364

Las comparaciones por pares llevadas a cabo en la tabla 18 no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos observados ($p > 0,05$). Este comportamiento indica que, aunque sí existe variabilidad entre los valores promedio de la velocidad de corrosión de las diferentes concentraciones del inhibidor, esas diferencias no alcanzan el nivel de significancia estadística dentro de las condiciones experimentales analizadas.

Hay que considerar que el tamaño de muestra que se ha usado en cada grupo experimental fue pequeño (n pequeño) y que esto puede ser un factor limitante de la potencia estadística de la prueba para detectar diferencias entre tratamientos.

Velocidad de corrosión

Para poder calcular la velocidad promedio de corrosión, se obtuvo la pérdida total de masa promedio de cada uno de los grupos que son presentados en la tabla 19, posteriormente se utilizó la Ecuación 2 expuesta en la metodología, considerando que el tiempo de exposición fue de 15 días, la densidad del acero A36 es de $7,85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, y que el área expuesta fue de 505 cm^2 .

TABLA 19. VELOCIDAD DE CORROSIÓN PROMEDIO DEL ACERO A36

Grupo de estudio	ΔW promedio (gr)	Velocidad de corrosión ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
0 % inhibidor + 0.5 M HCl	10,13	0,62
10 % inhibidor + 0.5 M HCl	4,73	0,29
15 % inhibidor + 0.5 M HCl	5,03	0,31
25 % inhibidor + 0.5 M HCl	4,50	0,28
30 % inhibidor + 0.5 M HCl	6,00	0,37
25 % inhibidor + 0.5 M H ₂ SO ₄ (lluvia ácida)	1,63	0,10

Interpretación técnica:

Los hallazgos evidencian un notable descenso de la velocidad de corrosión al emplear el inhibidor natural, a diferencia del mecanismo sin protección. La utilización de la concentración del 25 % en solución de HCl 0.5 M demostró igualmente el menor grado de velocidad de corrosión dentro de los medios altamente agresivos y puede explicarse por un equilibrio óptimo entre la concentración de inhibidor en disolución y la adsorción del mismo sobre la superficie del acero, demostrando la formación de una película protectora estable. En contraposición, el aumento superior hasta el 30% no obtuvo un resultado mejorado, sugiriendo un fenómeno de saturación o una menor eficacia de adsorción del inhibidor. Y en el caso de la disolución de H₂SO₄ 0.01 M (simulación de lluvia ácida), el medio estudiado del 25 % tuvo una velocidad de corrosión baja, lo cual puede servir como indicador de un efecto protector del inhibidor en medio de simulaciones de exposición ambiental.

4.3 Eficacia de Inhibidor

Con el objetivo de poder cuantificar el efecto protector que tiene el inhibidor natural en el acero A36, se realizó la evaluación de la eficacia del inhibidor, a partir de las diferencias de velocidad de corrosión obtenidas del método gravimétrico. La eficacia del inhibidor nos permite contrastar el comportamiento que presenta el acero en condiciones corrosivas, tanto en presencia como en ausencia del inhibidor, y determinar así el nivel de reducción del proceso corrosivo para las distintas concentraciones probadas. El cálculo del parámetro en cuestión se realizó haciendo uso de la ecuación correspondiente en la sección de Metodología (Ecuación 3).

TABLA 20. EFICACIA DEL INHIBIDOR DE CÁSCARA DE MANGO SOBRE ACERO A36

Sistema de ensayo	Velocidad de corrosión ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	Eficacia del inhibidor (%)
0 % inhibidor + 0.5 M HCl	0,62	---
10 % inhibidor + 0.5 M HCl	0,29	53,29
15 % inhibidor + 0.5 M HCl	0,31	50,33
25 % inhibidor + 0.5 M HCl	0,28	55,59
30 % inhibidor + 0.5 M HCl	0,37	40,79
25 % inhibidor + 0.01 M H ₂ SO ₄ (lluvia ácida)	0,10	83,88

Nota: La eficacia del inhibidor fue determinada a partir de las velocidades de corrosión promedio obtenidas mediante el método gravimétrico, considerando un tiempo de exposición de 15 días y un área expuesta de 505 cm². El grupo control (0 % inhibidor) se utilizó como referencia para el cálculo de la eficiencia inhibitoria.

Interpretación técnica:

Los datos de la Tabla 20 demuestran que cuando se añade el inhibidor de cáscara de mango, se reduce la velocidad de corrosión del acero A36 en contraste con el grupo que no contiene ningún tipo de inhibidor. En el sistema sin inhibidor (0 % + 0.5 M HCl), la rapidez de corrosión fue de 0,62 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, lo que implicaría que el acero perdería aproximadamente 0,62 milímetros de espesor por año de permanecer en ese medio agresivo, lo que también nos indica un tipo de ataque muy importante y continuo sobre la superficie metálica.

Al agregar el inhibidor, la rapidez de corrosión se reduce considerablemente. Por ejemplo, a 25 % de inhibidor la rapidez fue de 0,28 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, es decir, perderá menos de la mitad del espesor en relación con el grupo control, lo cual demuestra que la película protectora resultante con el inhibidor ha reducido la reacción corrosiva de un modo notable. En concentraciones más pequeñas (10 % y 15 %) las velocidades aumentan ligeramente (0,29 y 0,31 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) mostrando que aún con inhibición, aunque considerable, no alcanzan la mayor eficacia observada a las concentraciones del inhibidor de 25 %.

Resulta curioso que, al aumentar la concentración al 30%, la velocidad de la corrosión pasase a 0.37 mm / a, indicando de esta forma un exceso del inhibidor en solución puede afectar la estabilidad de la película protectora y la cantidad de protección adicional, ya sea por saturación o baja adsorción del inhibidor.

En cuanto a H_2SO_4 0.01M (simulación de lluvia ácida), la velocidad de corrosión con un 25 % de la misma fue de 0.10 mm a lo que entendemos como una mínima pérdida de espesor en las condiciones menos agresivas; si bien el efecto protector es claramente importante, al no evaluar otro tipo de concentraciones esta información limitada no permite establecer si esta sería la mejor.

De forma complementaria a lo anterior, mostramos la descripción con gráfico sobre la eficacia de las distintas concentraciones del inhibidor de corrosión a partir de cáscaras de mango siendo diferentes soluciones ácidas en condiciones que simulan ambientes agresivos reales sobre el acero A36.

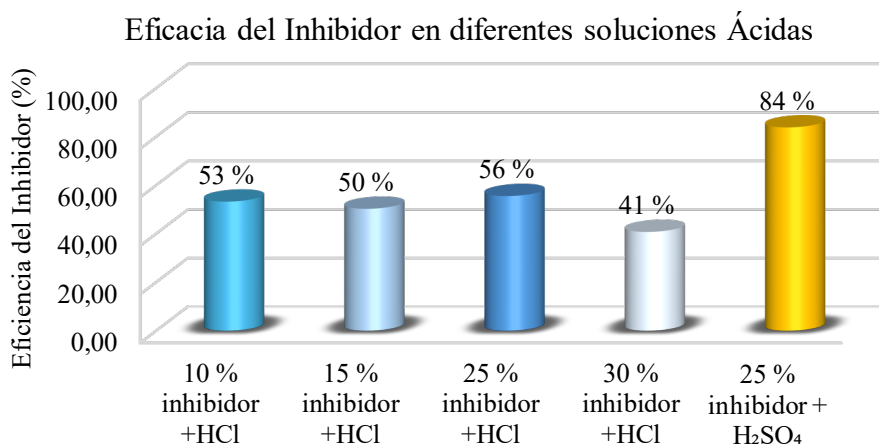


Fig. 5 Eficacia según concentración del inhibidor

Interpretación técnica:

En el medio ácido clorhídrico, las concentraciones del 10 %, 15 % y 25 % del inhibidor tuvieron eficiencias por encima del 50 %, destacando la concentración del 25 % que llegó a tener la mejor eficacia inhibidora en un medio tan agresivo. Estas respuestas muestran la eficacia del inhibidor a los 15 días de exposición de las placas de acero A36 en el medio ácido HCl que existe un rango de concentración en el inhibidor en el que logra máximas capacidades de protección ante el ataque corrosivo; Mientras que una concentración del 30% determina la disminución de la eficiencia, lo que indica que concentraciones más altas no garantizan un mejoramiento del desempeño inhibidor y que afecta la estabilidad de la película superficial que recubre el metal.

El grupo que fue expuesto a una solución de ácido sulfúrico 0.01 M, conocida como simulación de lluvia ácida, se estudió a una concentración del 25 % del inhibidor que mostró una eficiencia de inhibición cercana al 84%. Este comportamiento mostró una reducción considerable de la corrosión del acero A36, que fue evaluada en un medio ácido menos agresivo, lo cual demuestra la alta efectividad del inhibidor de cáscara de mango en condiciones de la lluvia ácida asociadas a las condiciones del medio ambiente atmosférico.

Adicionalmente, la eficiencia del inhibidor se calculó durante las primeras 48 horas de exposición porque en este intervalo de tiempo había una mayor pérdida de masa y acción del HCl y del inhibidor, las eficacias se encuentran observadas en la figura 6.

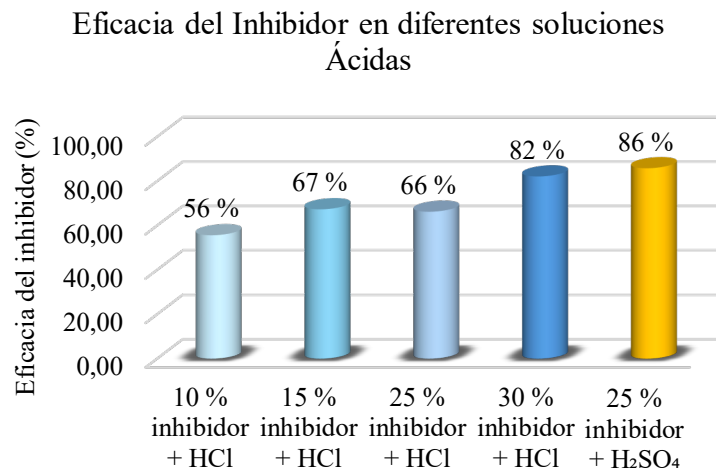


Fig. 6 Eficacia de inhibidor las primeras 48 horas.

Los resultados obtenidos al final de 48 h muestran que el inhibidor de corrosión a base de cáscara de mango tiene una acción temprana eficaz sobre el acero al carbono A36, ya que se puede comprobar que hay una pérdida de masa apreciablemente menor que la del grupo control, reflejando un incremento de la eficiencia del inhibidor en las concentraciones analizadas hasta el 25 %. Un incremento notable se da en la condición del 25 % de inhibidor en la solución de H₂SO₄ 0.01 M, que mostró un porcentaje de eficacia por encima del 85 %, lo que también pone de manifiesto un comportamiento ventajoso del inhibidor en condiciones similares a las condiciones atmosféricas de agresión como la lluvia ácida.

4.4 Ensayo de Tracción a probetas de Acero A36

El ensayo de tracción se realizó para poder comprobar la eficacia del inhibidor observando el comportamiento mecánico del acero A36 expuesto a los diferentes ambientes corrosivos y en condiciones de prueba con y sin el mismo, aplicado a partir de un inhibidor a base de cáscara de mango. La metodología utilizada para la ejecución del ensayo experimental fue la norma ASTM (A370), que asegura la confiabilidad y la posibilidad de repetición de los resultados obtenidos. Para el análisis, las placas se distribuyeron en seis grupos diferentes en función de la condición de exposición previa y de la concentración del inhibidor. :

- Grupo 1: Placas sin Inhibidor y 0.5 M de HCl.
- Grupo 2: Placas con Inhibidor al 10 % y 0.5 M de HCl.
- Grupo 3: Placas con Inhibidor al 15 % y 0.5 M de HCl.
- Grupo 4: Placas con Inhibidor al 25 % y 0.5 M de HCl.
- Grupo 5: Placas con Inhibidor al 30 % y 0.5 M de HCl.
- Grupo 6: Placas con Inhibidor al 25 % y 0.01 M de H₂SO₄ (lluvia ácida).

TABLA 21. ESFUERZO, MÓDULO DE ELASTICIDAD, ELONGACIÓN, RESILIENCIA Y TENACIDAD

Grupos	Placas	σ máx (MPa)	σ rot (MPa)	Modulo E (GPa)	σ Y (MPa)	Elongación (%)	Resiliencia (MJ/m ³)	Tenacidad (MJ/m ³)
Grupo: 1 Sin inhibidor + HCl 0.5 M	1	428.95	217.65	138.63	331.11	15.22	1.52	62.48
	2	425.27	215.10	160.14	348.49	14.35	1.88	59.24
	3	437.80	219.52	144.44	320.46	14.78	3.35	73.72
Grupo: 2 10 % Inhibidor + HCl 0.5 M	1	409.64	207.02	153.19	283.72	15.22	1.61	67.13
	2	417.91	217.65	161.77	300.73	15.22	1.33	66.43
	3	416.94	207.61	160.52	300.09	16.09	1.39	70.99
Grupo: 3 15 % Inhibidor + HCl 0.5 M	1	424.57	215.57	155.90	288.32	16.52	1.16	67.60
	2	434.95	217.65	166.40	310.71	17.39	1.21	67.19
	3	424.87	217.87	155.71	291.70	16.96	1.53	62.16
Grupo: 4 25 % Inhibidor + HCl 0.5 M	1	435.11	217.26	165.60	307.53	17.39	1.22	79.45
	2	425.50	217.65	157.70	290.57	16.96	1.16	72.45
	3	426.28	219.61	155.81	291.94	16.96	1.52	77.27
Grupo: 5 30 % Inhibidor + HCl 0.5 M	1	420.76	214.47	153.42	287.34	14.78	1.35	61.04
	2	422.16	211.50	154.97	288.72	15.22	1.15	65.48
	3	422.74	217.65	156.72	290.19	15.22	1.19	66.75
Grupo: 6 25 % Inhibidor + H ₂ SO ₄ 0.01 M (Lluvia ácida)	1	436.52	221.14	155.99	291.90	17.39	1.10	77.07
	2	444.27	222.51	160.18	299.54	16.09	1.10	69.03
	3	439.49	217.65	161.05	301.04	15.22	1.13	70.30

Nota: σ máx: esfuerzo máximo; σ rot: esfuerzo de rotura; σ_y : esfuerzo de fluencia; E : módulo de elasticidad. La elongación se obtuvo por medición directa posterior a la rotura; y la resiliencia y la tenacidad se obtuvieron a partir de la curva de esfuerzo–deformación (ASTM E8/E8M).

Interpretación técnica:

Los datos incluidos en la Tabla 21 indican que el acero A36 ve alteradas sus propiedades mecánicas después de haber sido puesto en contacto con un entorno de corrosión agresiva simulado. Con estos datos obtenidos se procede a la elaboración de las curvas esfuerzo–deformación de modo que se puedan observar visualmente cuáles son las características mecánicas del material. Igualmente, los valores que se obtienen para cada medida constituyen, mediante interpolación, la base para obtener promedios como se aprecia en la Tabla 22. Permitiendo conocer de esta manera las tendencias asociadas a las distintas medidas del inhibidor y su efectividad.

4.4.1 Curvas de esfuerzo – deformación de placas A36

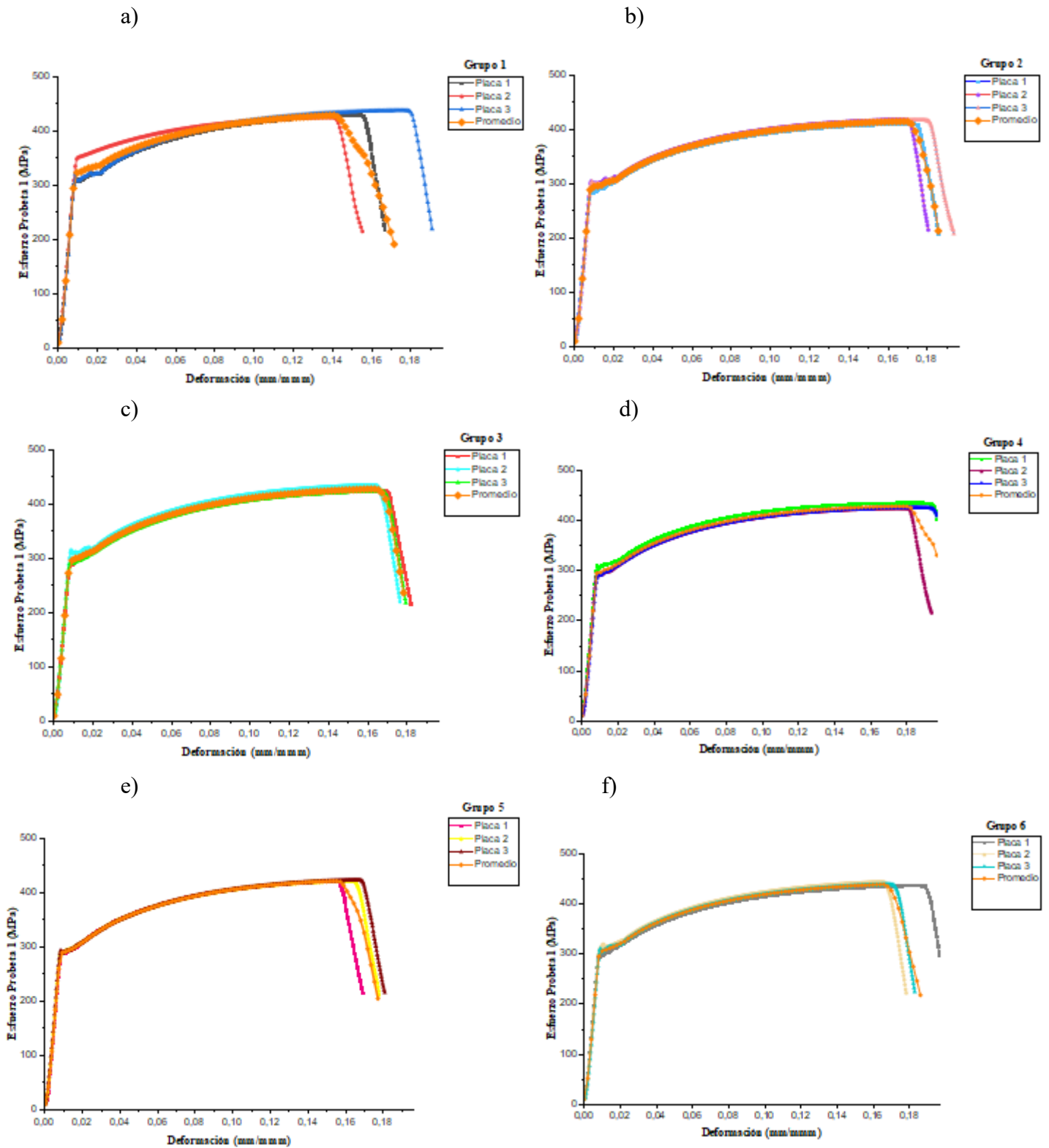


Fig. 7. Curvas esfuerzo-deformación del ensayo a tracción a 0.5 M de HCl a) 0 % de inhibidor, b) 10 % de inhibidor, c) 15 % de inhibidor, d) 25 % de inhibidor, e) 30 % y f) 25 % a 0.01 H₂SO₄ (Lluvia ácida)

Interpretación técnica:

Las curvas esfuerzo–deformación, obtenidas evidencian que el acero A36 ha visto alterado su comportamiento mecánico debido a la exposición a un ambiente de corrosión agresiva que se ha simulado. En la Figura a), que pertenece al grupo sin inhibidor, se ha visto un aumento en el valor del esfuerzo de fluencia, pero, a su vez, un aumento de la reducción de la zona plástica, así como también un aumento del área bajo la curva, con la consecuente expresión de una mayor fragilidad del material en cuestión. Este hecho puede estar asociado al proceso de fragilización por hidrógeno, ya que la ausencia del inhibidor favorece la absorción del hidrógeno en el acero, generando micro fisuras en el interior y disminuyendo la ductilidad y la absorción de energía según lo indicado por Costales [15].

A diferencia, en el resto de las figuras se observa que la presencia del inhibidor ayuda a mantener las propiedades mecánicas del acero, incluso bajo el mismo ambiente corrosivo, observando curvas con una zona plástica más desarrollada y mayor área bajo la curva en comparación con la Figura a). Es de resaltar que la Figura d) que corresponde a la concentración de 25 % de Inhibidor, además de que se obtiene el comportamiento mecánico más favorable, donde se previene mayor ductilidad y tenacidad, observando que la Figura f) indica también que dicho inhibidor es eficaz en un ambiente simulado de lluvia ácida, lo que pone de aliviar su protección frente a diferentes condiciones corrosivas.

4.4.2 Propiedades mecánicas medias por grupo de exposición

TABLA 22. PROMEDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO A36 EN MEDIO ÁCIDO

Grupo	Modulo E (Gpa)	σ_Y (Mpa)	Elongación (%)	Resiliencia (MJ/m3)	Tenacidad (MJ/m3)
1	162.32	323.30	14.78	1.63	63.63
2	158.50	288.80	15.51	1.05	67.73
3	159.34	272.99	16.96	1.02	66.81
4	159.70	295.48	17.10	1.15	76.19
5	155.03	289.22	15.07	1.35	64.70
6	159.07	296.01	16.23	1.12	71.01

Nota: Los valores corresponden a promedios por grupo. E : módulo de elasticidad; σ_Y : esfuerzo de fluencia. La elongación, resiliencia y tenacidad se obtuvieron a partir del ensayo a tracción (ASTM A370).

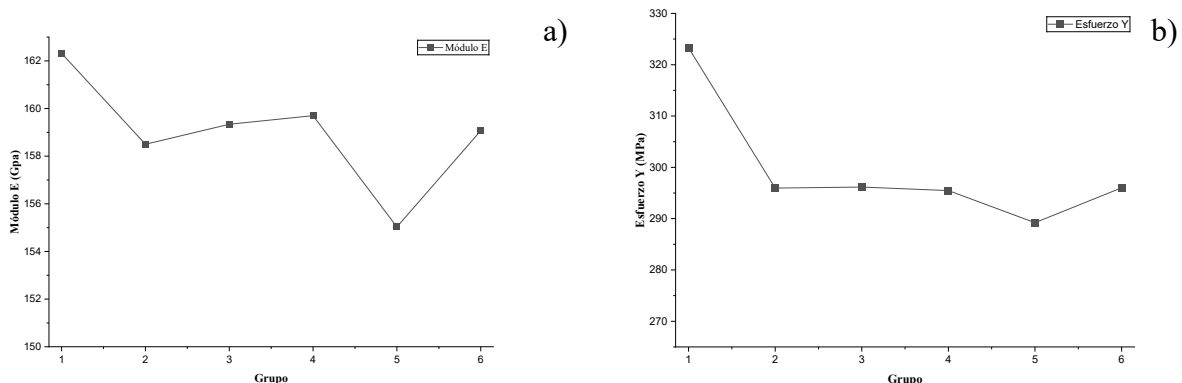
Interpretación técnica

Por su parte, los valores medios que pueden apreciarse en la Tabla 22 muestran que la exposición del acero A36 a un ambiente agresivo induce alteraciones en el comportamiento de sus propiedades mecánicas; los valores del esfuerzo de fluencia, del módulo de elasticidad o de la elongación son distintos de los que resultaron incómodos para un acero A36 en condiciones normales. La misma variación pone de manifiesto la influencia del proceso de corrosión sobre el comportamiento del acero [25].

Por lo que respecta a la efectividad del inhibidor, cabe señalar que cabe la posibilidad de generar una protección frente a los efectos del ambiente corrosivo, favoreciendo por lo tanto la conservación de las propiedades mecánicas del acero A36. De tal forma que los grupos con inhibidor presentan valores de elongación y tenacidad incluso superiores a los del grupo sin inhibición, lo que sugiere que el acero presenta una mejor respuesta mecánica frente al efecto daño del ácido y una menor tendencia a la fragilización.

Es, en este sentido, el Grupo 4 que se desenvuelve mejor (25 % de inhibidor) entre los sistemas evaluados, dado que el grupo presenta los valores más altos de elongación y tenacidad, lo que indica que dicha concentración es la que proporciona a su vez la mejor protección del acero y su conservación de sus propiedades mecánicas dentro de un intervalo de valores más constante incluso con el medio agresivo sobre el que se realiza la prueba. En el último lugar, concentraciones superiores no llegan a mostrar mejoras y el grupo puesto en contacto con un entorno simulado de lluvia ácida es prueba de que el inhibidor resulta efectivo independientemente de las condiciones ambientales corrosivas en que se encuentre la muestra.

A continuación, la representación de las propiedades mecánicas ya promediadas dentro de cada grupo:



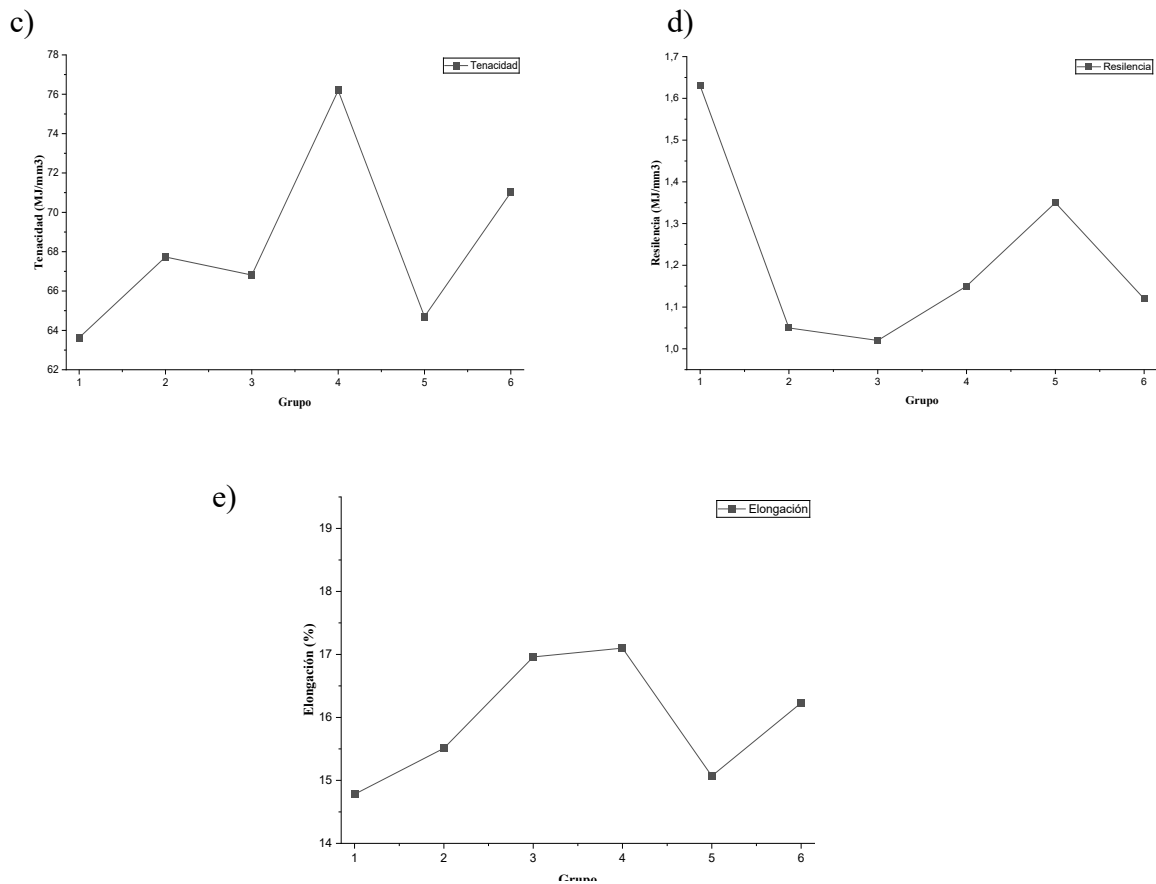


Fig. 8. Comportamiento de las propiedades mecánicas promedio del acero A36 por grupo

Interpretación técnica:

Los resultados prometidos para las propiedades mecánicas del acero A36 muestran claras diferencias en los grupos estudiados. El grupo 1 es el que exhibe mayor módulo de elasticidad aparente, así como mayor esfuerzo de fluencia, pero también registra la menor elongación y tenacidad intermedia lo que indica un comportamiento más rígido y menos dúctil. Por el contrario, los grupos 3 y 4 presentan las mayores elongaciones 16,96 % y 17,10 %, siendo el grupo 4 el que presenta además la mayor tenacidad lo que significa mayor capacidad de absorción de la energía antes de la rotura. En lo que se refiere a la resiliencia, el Grupo 1 muestra el valor más alto y el Grupo 3 el más bajo. Los Grupos 2, 5 y 6 presentan comportamientos intermedios, con módulos de elasticidad próximos a 159 GPa, esfuerzos de fluencia entre 288,80 y 296,01 MPa y tenacidades que varían entre 64,70 y 71,01 MJ/m³. En términos generales, se puede ver una tendencia por la que la disminución del esfuerzo de fluencia y del módulo de elasticidad va de la mano con un incremento de la ductilidad y la tenacidad del material.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

5.1 Análisis de pérdida de masa y eficacia del inhibidor

La reducción en masa observada en las muestras de acero A36 corroboró sin lugar a duda la actividad del medio corrosivo en el material. En cualquiera de los grupos experimentales se produjo una oscilación significativa en la pérdida de masa en las primeras 24-48 h de exposición, la cual estaba asociada a la alta actividad electroquímica que presenta el medio ácido, destacando en el grupo control al encontrarse en presencia de un 0 % de inhibidor en HCl 0.5 M (esto reafirma aún más el elevado grado de agresividad que presenta el medio ante la ausencia de protección) [1].

Las probetas que fueron tratadas con el inhibidor verde que se basa en la cáscara de mango mostraron una evidente reducción de pérdida de masa, sobre todo a partir del segundo día de ensayo, tal como se había esperado y fuertemente asociado a la formación de una película protectora por adsorción de compuestos orgánicos de la cáscara de mango, como pueden ser polifenoles y otros compuestos fenólicos, los cuales actúan como inhibidores, limitando de esta forma la interacción entre el acero y el medio ácido, tal y como se señala en la bibliografía [2].

Una vez alcanzados los 15 días de exposición, el grupo control logrado fue el que presentó la mayor pérdida de masa acumulada, mientras que los grupos tratados con inhibidor y el grupo expuesto al medio ácido de HCl 0.5 M mostraron valores apreciablemente menores. Las concentraciones del 10 %, 15 % y 25 % mostraron el mejor resultado, y los aumentos en la concentración a 30 % no incrementaron el índice de eficacia; ello puede atribuirse a un efecto de saturación en la superficie o una menor efectividad del recubrimiento protector formado [3].

De forma análoga, las probetas expuestas a H₂SO₄ 0.01 M (p. ej., simulación de lluvia ácida) son los que presentan menor pérdida de masa dentro de los sistemas evaluados, pero expone la menor agresividad del medio y una alta efectividad del inhibidor en condiciones atmosféricas simuladas [4]. Aun así, lo cierto es que no es posible realizar comparaciones con otras concentraciones del inhibidor en el medio corrosivo, a simple vista, al haber sido sólo evaluada en este estudio la concentración 25 %.

En general, los resultados confirman que el inhibidor verde elaborado a partir de cáscara de mango reduce eficazmente la pérdida de masa del acero A36 en ambientes corrosivos.

5.2 Velocidad de corrosión y eficacia del inhibidor

Dado que la velocidad de corrosión depende enteramente de cómo se alteren las masas de las probetas, los resultados del ensayo evidencian que las primeras 48 horas de exposición son las que se corresponden con la mayor actividad del medio corrosivo, donde las pérdidas de masa fueron las más elevadas para el caso de la primera serie de placas expuestas a la solución de HCl 0,5 M sin inhibidor, lo que visualiza las elevadas agresividades del medio ácido sobre el acero A36.

Partiendo del supuesto de que el ritmo de agresividad que se observara durante los primeros 48 h se mantuviera constante a lo largo del tiempo, los valores de velocidad de corrosión que se obtuvieron permitieron una aproximación de la pérdida de espesor anual del material. En este sentido, el acero A36 presentaría pérdidas aproximadas de:

- 0 % inhibidor / 0.5 M HCl: $1.73 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 10 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.77 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 15 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.57 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 25 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.57 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 30 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.52 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 25 % inhibidor / 0.5 M H₂SO₄ (Lluvia ácida): $0.25 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$

Este patrón de comportamiento muestra que el inhibidor actúa reduciendo con eficacia la velocidad de la reducción del espesor de acero, aumentando, en consecuencia, su vida útil en medios muy agresivos. El grupo que se sometió a la solución simulada lluvia ácida (H₂SO₄ 0,01 M) presentó la menor velocidad de corrosión, lo que evidencia la efectividad del inhibidor frente a los medios que representan ambientes atmosféricos reales, los cuales son los más representativos en aplicaciones estructurales. Sin embargo, dado que en este sistema únicamente se evaluó la concentración del 25 % de inhibidor, es imposible realizar una comparación con otras concentraciones del inhibidor frente a este medio corrosivo.

No obstante, y teniendo como referencia el total de la exposición de quince días, se determinaron las velocidades promedias de corrosión para cada grupo, constatándose nuevamente una evidente disminución del deterioro del material a partir de la aplicación del inhibidor.

- 0 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.62 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 10 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.29 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 15 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.31 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 25 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.28 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 30 % inhibidor / 0.5 M HCl: $0.37 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$
- 25 % inhibidor / 0.5 M H₂SO₄ (Lluvia ácida): $0.10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$

Tal comportamiento indica que el medio corrosivo tendió a estabilizarse a lo largo del tiempo, tanto por la reducción de la agresividad del medio ácido del rosario, como, en menor medida, por la formación progresiva de una capa protectora del inhibidor sobre la superficie del acero. Estos resultados corroboran que el inhibidor de la corrosión a cáscara de mango actúa de manera eficaz para reducir la pérdida de espesor del acero A36, inicialmente en ambientes de exposición atmosférica.

5.3 Análisis del ensayo a tracción y eficacia del inhibidor

Módulo de elasticidad (E)

Los valores del módulo de elasticidad hallados para los diferentes grupos son prácticamente constantes, puesto que la rigidez inicial del acero A36 no se ve siendo afectada por la actuación del inhibidor o bien por el tipo de condiciones de exposición analizados. Por otro lado, sí se puede observar la misma variación en los valores dado que estuvo expuesto a un medio ácido. Comportamientos similares a los descritos han sido observados en estudios previos, donde comentan cómo los procesos corrosivos y los tratamientos con inhibidores orgánicos sólo modifican la zona elástica del material y, en efecto la deformación plástica se encuentra constante [24 Las pequeñas variaciones observadas, especialmente en el grupo sin inhibidor, se pueden atribuir a efectos superficiales o bien a heterogeneidades provocadas por el ataque ácido.

Esfuerzo de fluencia (σ_f)

El grupo control expuesto a HCl 0.5 M sin inhibidor presenta valores elevados de esfuerzo de fluencia, los cuales no deben interpretarse como una mejora mecánica del material. Este comportamiento ha sido ampliamente vinculado en la literatura al fenómeno de fragilización por hidrógeno, donde la absorción de hidrógeno restringe la deformación plástica inicial, generando un aumento aparente del esfuerzo de fluencia [25]. En contraste, los grupos con inhibidor muestran valores más estables, lo que concuerda con investigaciones que reportan una reducción de los efectos de fragilización al limitar el ingreso de especies agresivas al metal mediante la formación de una película protectora [26].

Elongación (%)

La elongación presentó una de las propiedades más reactiva a la corrosión. Los grupos donde se incorpora este tipo de inhibidor presentan mayores valores comparados con el grupo donde no existe protección, resaltando así la preservación de la ductilidad del acero A36. Este comportamiento se encuentra en concordancia con lo descrito por diferentes autores, quienes proponen que los inhibidores de tipo orgánico vegetal ayudan a conservar la capacidad de deformación plástica del acero debido a una disminución de la formación de micro fisuras originadas por corrosión [27]. El grupo correspondiente al 25 % de inhibidor presentó los mayores valores, lo que lleva a suponer una mayor eficacia de protección.

Resiliencia

Los valores de resiliencia indican que los grupos modificados presentaron menores valores en aquellos grupos expuestos al medio ácido, sobre todo en ausencia de inhibidor, lo que indica una menor capacidad de absorber energía en el régimen elástico, al respecto, se han reportado resultados similares en estudios en donde la acción corrosiva y la presencia de hidrógeno limitan la respuesta elástica efectiva del acero [25]. La aplicación del inhibidor permitió estabilizar esta reacción respecto de la capacidad de absorber energía, limitando así los efectos adversos del medio agresivo.

Tenacidad

La tenacidad mostró una notable mejora en los grupos con inhibidor frente al grupo control, por lo que se expresa en una mayor área bajo la curva esfuerzo–deformación. Este comportamiento coincide con lo que se establece en la bibliografía, ya que se afirma que la protección superficial logrado gracias a los inhibidores orgánicos favorece una mayor ductilidad y así como una mayor capacidad de absorción de energía hasta la fractura [28]. Entre las concentraciones ensayadas con el medio de HCl 0.5 M, el grupo con el 25 % de inhibidor presentó los valores más altos de tenacidad.

Comportamiento general

En conjunto, los resultados del ensayo a tracción indican que la exposición del acero A36 a medios ácidos agresivos altera su comportamiento mecánico, especialmente en ausencia de protección. La aplicación del inhibidor verde a base de cáscara de mango permite mitigar parcialmente estos efectos, preservando la ductilidad y la tenacidad del material. Estos hallazgos son coherentes con lo reportado en estudios previos sobre inhibidores orgánicos aplicados a aceros al carbono en medios ácidos, los cuales destacan la formación de películas adsorbidas como el principal mecanismo de protección frente al proceso corrosivo [31].

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La auditoría gravimétrica evidenció que el A36 expuesto a HCl 0.5 M sin inhibidor presentó una velocidad de corrosión de $0,62 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, logrando mediante la incorporación del inhibidor verde efecto cáscara de mango una velocidad de $0,29 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (10 %), $0,31 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (15 %), $0,28 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (25%) y $0,37 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (30 %), junto a eficiencias de inhibición correspondientes de 53,29%, 50,33 %, 55,59 % y 40,79 %, respectivamente.
- En el ensayo realizado en medio acuoso H_2SO_4 0.01 M (lluvia ácida simulada), se obtuvo una velocidad de corrosión de $0.10 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, siendo la eficiencia de inhibición alcanzada del 83,88 % y perteneciendo a la concentración de 25 %. Sin embargo, hay que mencionar que solo se realizó la valoración de esta única concentración por lo que no se puede llegar a realizar comparativas con otras concentraciones del inhibidor.
- El ensayo a tracción dejó manifiesto que el acero A36 sometido a medios agresivos y ácidos presenta una degradación de sus propiedades mecánicas. El grupo control (sin la protección de inhibidor) presentó unos valores de elongación del 14,78 %, σ_y de 323,30 MPa y una tenacidad de $63,63 \text{ MJ/m}^3$. Estos datos manifestaron una menor capacidad de deformación plástica (elongación) y de absorción de energía (cantidad de energía por unidad de volumen)
- El material conservó parcialmente el comportamiento mecánico gracias a la adición del inhibidor. El grupo con 25% de inhibidor en HCl 0.5 M mostró los máximos valores de elongación (17,10 %) y tenacidad ($76,19 \text{ MJ/m}^3$). Para esta concentración, el σ_y fue el más elevado sobre las distintas concentraciones evaluadas con un valor de 295.48 MPa.
- En condiciones de lluvia ácida simulada, la probeta con 25 % de inhibidor presentó elongación de 16,23 %, σ_y de 296,01 MPa y tenacidad de $71,01 \text{ MJ/m}^3$, evidenciando un comportamiento mecánico favorable del acero A36 bajo estas condiciones.
- La ausencia de mejoras adicionales en la eficacia de inhibición al incrementar la concentración hasta 30 % sugiere la posible saturación de los sitios de adsorción en la superficie del acero, fenómeno reportado en la literatura para inhibidores orgánicos.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda ampliar el estudio del inhibidor de corrosión a base de cáscara de mango mediante la aplicación de métodos complementarios de evaluación, tales como ensayos electroquímicos (curvas de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica), con el fin de profundizar en el análisis de los mecanismos de inhibición y validar los resultados obtenidos por métodos gravimétricos bajo diferentes condiciones de agresividad del medio.
- Se recomienda que en futuras investigaciones se incorpore una fase de validación gravimétrica complementaria mediante la remoción estandarizada de productos de corrosión conforme a la norma ASTM G1 o métodos equivalentes. Esto permitirá comparar el método de limpieza pasiva utilizado en el presente estudio con procedimientos estandarizados, así como evaluar su influencia en la determinación de la pérdida de masa y la eficiencia del inhibidor.
- Se sugiere evaluar el comportamiento del inhibidor en condiciones que simulen de forma más realista ambientes atmosféricos, como variaciones de pH, ciclos húmedos–seco y exposición prolongada en más concentraciones a soluciones que representen lluvia ácida, con el propósito de analizar su desempeño a largo plazo y su posible aplicación en la protección de estructuras metálicas de acero A36 expuestas a la intemperie.
- Complementar el ensayo a tracción con técnicas electroquímicas y de caracterización superficial, tales como ensayos de polarización electroquímica y microscopía (óptica o electrónica), para analizar con mayor detalle los mecanismos de corrosión y la formación de micro fisuras asociadas a la fragilización por hidrógeno en el acero A36.
- Implementar el uso de extensómetros durante la ejecución del ensayo a tracción, con el fin de obtener una medición más precisa de las deformaciones unitarias, especialmente en la zona elástica y en el inicio de la deformación plástica. Esto permitiría una determinación más confiable del módulo de elasticidad, del esfuerzo de fluencia y de la elongación real del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. L. Hermida Brabo y D. A. Patiño Tenesaca, “Aprender Haciendo: modelo pedagógico experimental aplicado a una vivienda de interés social usando procesos constructivos innovadores ligeros en acero galvanizado,” Tesis de grado, Fac. de Arq. y Urb., Univ. de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/36847>
- [2] D. X. Cruz Torres, “Diseño de una estructura de acero para una bodega de productos industriales en la Parroquia Alberto Spencer, cantón Santa Elena”, Tesis de grado, Carrera de Ing. Civil, Univ. Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2024. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27678>
- [3] E. Calderón Freire, A. Tenicota García, C. Redroban, J. Caiza Vega, y F. Gamboa-Rodriguez, “Eficiencia de método convencional de protección contra la corrosión en aceros ASTM A36 en medio salino”, *KN Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 179–192, jul. 2024. doi: 10.18502/epoch.v3i3.16621
- [4] C. Chiriboga-Chiriboga, J. Maldonado-Noboa, y B. Chiriboga-Zúñiga, “Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo, y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones”, *MQR Investigar*, vol. 6, no. 4, pp. 396–419, oct. 2022, doi: 10.56048/MQR20225.6.4.2022.396-419
- [5] E. J. Lazo Avendaño, “Evaluación de la corrosión y su influencia en la vida útil de las estructuras de acero en puentes”, Tesis de maestría, Escuela de Posgrados, Univ. Ricardo Palma, Lima, Perú, 2021. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.12705/1614>
- [6] M. A. Olavarrieta, D. Ruiz, J. Parra, y L. J. Prieto, “Diagnóstico para una propuesta de mantenimiento del puente Macuto en la ciudad de Barquisimeto”, *Gaceta Técnica*, vol. 22, no. 1, pp. 1–17, ene. 2021, doi: 10.51372/gacetatecnica221.1
- [7] I. Milošev y J. R. Scully, “Challenges for the Corrosion Science, Engineering, and Technology Community as a Consequence of Growing Demand and Consumption of materials: A Sustainability issue,” *Corrosion*, vol. 79, no. 9, pp. 988–996, Sep. 2023. doi: 10.5006/4428
- [8] A. T. Ortega Ramírez, L. V. Barrantes Sandoval, B. D. Casallas Martin y N. Cortés Salazar, “Aplicación de inhibidores verdes para el control de la corrosión en metales. Revisión,” *DYNA*, vol. 88, no. 217, pp. 160–168, abr. – jun. 2021, doi: 10.15446/dyna.v88n217.93871
- [9] V. E. Proaño Galarza, “Obtención de una película a partir de cáscara de mango (*Mangifera indica*) para el uso en alimentos,” Tesis de grado, Fac. de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible: <https://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/16936>
- [10] J. J. Castro y F. K. Manalo, “*Mangifera Indica* leaves crude ethanolic extract as a corrosion inhibitor for mild steel in acidic and basic media,” *Int. J. Sci. Technol. Eng. Math*, vol. 4, no. 3, pp. 30-57, Sep. 2024, doi: 10.53378/IJSTEM.353081

- [11] A. Shanaghi y A. Farrokhi, “Enhancing Atmospheric Corrosion Resistance of Shot-Peened A36 Steel in Humid Environments: The Impact of Carbon Monoxide and Surface Treatments,” *Int. J. Iron Steel Soc. Iran*, vol. 21, no. 2, pp. 21–30, dic. 2024, doi: 10.22034/IJISSI.2025.2044477.1307
- [12] D. I. M. Laurencio y M. P. Gola, *Introducción al estudio de la corrosión y la protección de metales*. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Education, 2024. [En línea]. Disponible: <https://elibro.net/es/lc/ula/titulos/275685>
- [13] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing, and Design*, 2.^a ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 1998. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750640190/engineering-materials-2>
- [14] M. Terrados-Cristos, “Determinación del efecto de las condiciones ambientales en el diseño de estructuras metálicas en intemperie,” Tesis doctoral, Dept. Constr. e Inm. Fab., Univ. de Oviedo, Oviedo, España, 2024. [En línea]. Disponible: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/72476>
- [15] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), “Objetivos de Desarrollo Sostenible,” 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>.
- [16] D. A. R. Zambrano y E. O. Hernández, “Sistema de construcción Steel Framing y su impacto en la protección del medio ambiente,” *Rev. Cient. Arb. Multidiscip. PENTACIENCIAS*, vol. 5, no. 2, pp. 507–515, abr. 2023. [En línea]. Disponible: <http://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/615>
- [17] M. Cely, V. Sotomayor, W. Monar, y P. Castro, “Identificación de defectos en soldaduras de acero estructural ASTM A36 mediante ensayos no destructivos según el código AWS D1.1,” *Rev. PUCE*, no. 106, pp. 201 – 217, abr. 2018, doi: 10.26807/revpuce.v0i106.131.
- [18] ASTM International, *Standard Specification for Carbon Structural Steel*, ASTM A36/A36M-19, West Conshohocken, PA, EE. UU., 2019. [En línea]. Disponible: https://store.astm.org/a0036_a0036m-19.html
- [19] DIPAC Mancheño, “Planchas laminadas en caliente: especificaciones técnicas de acero negro,” Guayaquil, Ecuador, 2024. [En línea]. Disponible: <https://dipacmanta.com/producto/planchas/planchas-acero-negro/planchas-laminadas-en-caliente/>.
- [20] P. Gómez, H. Pinochet, y C. Poblete, “Recomendaciones de Esquemas de Protección del Acero,” *Rev. Ing. Obras Civ.*, vol. 12, no. 3, pp. 1–8, dic. 2024. [En línea]. Disponible: <https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/article/view/3374>
- [21] R. Jiménez-Salas, R. Brenes-Brenes, J. Rodríguez-Yañez, y J. Sanabria-Chinchilla, “Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical,” *Rev. Tecnol. Marcha*, vol. 36, no. 1, pp. 76–88, ene. - mar. 2023, doi: 10.18845/tm.v36i1.5845.

- [22] F. Martínez-Pérez, “Corrosion. Types. Prevention,” *Rev. Cienc. Téc. Agropecu.*, vol. 32, no. 2, e10, abr. – jun. 2023. [En línea]. Disponible: <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1724>
- [23] I. Carotti, D. R. Billson, D. A. Hutchins, P. Liddicott, y J. A. Covington, “Detection of rust corrosion in mild steel and stainless steel through headspace analysis by electronic noses,” *IEEE Sens. J.*, vol. 25, no. 12, pp. 22573–22579, jun. 2025. doi: 10.1109/JSEN.2025.3562033.
- [24] S. Zehra, M. Mobin, y J. Aslam, “An overview of the corrosion chemistry,” *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors: Fundamentals and Industrial Applications*, M. Mobin, Chandrabhan V. y J. Aslam, Países Bajos: Elsevier, 2022, pp. 3–23. doi: 10.1016/B978-0-323-85405-4.00012-4.
- [25] H. E. S. Vargas, M. de L. D. la C. Aragonese, M. F. N. García, y F. C. Picón, “Evaluación del uso de inhibidores de corrosión en el decapado ácido de una planta galvánica,” *TAYACAJA*, vol. 4, no. 1, pp. 62–72, abr. 2021, doi: 10.46908/tayacaja.v4i1.153.
- [26] J. Barba y K. Barba, “Procedimiento teórico para la evaluación de los agentes químicos presentes en el laboratorio de corrosión de una Institución de Educación Superior,” *E-IDEA J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 73–93, ene. 2020. [En línea]. Disponible: <https://revista.estudioidea.org/ojs/index.php/esci/article/view/127>
- [27] V. Talaquer, G. Irazoque, y A. López, *Lluvia ácida*. Ciudad de México, México: UNAM, Facultad de Química, 2022. [En línea]. Disponible: <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/3418>
- [28] M. D. Santos-Carrión, R. I. Carranza Castro, y J. I. D. Mendoza Marchan, “Análisis experimental de los efectos del hidrógeno en especímenes de acero,” Proyecto de investigación, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2025. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/66006>
- [29] J. I. Mendoza, R. I. Carranza, M. D. Santos, L. Carral y M. I. Lamas, “Experimental and Numerical Analysis of Hydrogen-Induced Effects in ASTM A131 and A36 Steels for Naval Fuel Systems,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 21, art. n.º 11343, oct. 2025. doi: 10.3390/APP152111343.
- [30] S. Toro, N. Uviedo y D. O. Alessandro, “Aminoácidos como inhibidores de corrosión del acero al carbono en medio ácido,” *Rev. Tecnol. Cienc.*, no. 54, pp. 80–92, oct. 2025. doi: 10.33414/RTYC.54.80-92.2025.
- [31] N. Okon-Eddy, A. O. Odiongenyi, E. E. Ebenso, R. Garg y R. Garg, “Plant wastes as alternative sources of sustainable and green corrosion inhibitors in different environments,” *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 5, pp. 521–533, 2023. doi: 10.1080/1478422X.2023.2204260.
- [32] P. Confortti, B. Rodríguez, R. Réquíz y M. Pérez, “Extracto de semilla de aguacate como inhibidor ecológico de corrosión del acero en ácido sulfúrico,” *Rev. Iniciac. Cient.*, vol. 11, no. 1, pp. 48–58, ene. - jun. 2025. doi: 10.33412/REV-RIC.V11.1.4123.

- [33] L. Guo *et al.*, “Mango leaves extract as sustainable corrosion inhibitor for X70 steel in HCl medium: Integrated experimental analysis and computational electronic/atomic-scale simulation,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 42, art. n.º e01167, dic. 2024. doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01167.
- [34] A. Badawi and I. Fahim, “A critical review on green corrosion inhibitors based on plant extracts: Advances and potential presence in the market,” *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, vol. 10, no. 4, pp. 1326 – 1356, 2021. doi: 10.17675/2305-6894-2021-10-4-2.
- [35] Z. Agraje, I. Barahona, J. Quíroz, H. Pino, C. Hernández y C. Saavedra, “Análisis comparativo de inhibidores verdes vs inhibidores tradicionales en la corrosión de los metales,” *Rev. Iniciac. Cient.*, vol. 5, no. 2, pp. 78-84, jul. -dic. 2019. doi: 10.33412/rev-ric.v5.2.2509.
- [36] J. J. Castro Maldonado, L. K. Gómez-Macho y E. Camargo-Casallas, “La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI,” *Tecnura*, vol. 27, no. 75, pp. 140–174, ene.-mar. 2023. doi: 10.14483/22487638.19171.
- [37] Y. Sánchez, M. Pedroso, y I. Pino, “La autogestión del conocimiento y el diseño experimental en la ingeniería civil,” en *InnoEducaTIC 2023: X Congr. Int. Innovación y Tendencias Educativas*, Granada, España: Universidad de Granada, 2023. [En línea]. Disponible: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/98062>
- [38] *Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*, ASTM G31-21, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU., 2021. doi: 10.1520/G0031-21.
- [39] *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, ASTM G1-03(2017)e1, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU., 2017. doi: 10.1520/G0001-03R17E01.
- [40] *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM A370-24, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU., 2024. doi: 10.1520/A0370-24.
- [41] S. Bogdan, S. Roselli, R. Romagnoli y C. Deyá, “Extractos naturales como ‘inhibidores verdes’ de la corrosión del acero,” en *XV Congr. Int. Metalurgia y Materiales (CONAMET-SAM)*, Concepción, Chile, 2015. [En línea]. Disponible: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/104182>
- [42] J. Cuesta y V. Mogrovejo, “Evaluación del método y solvente de extracción más eficientes para la obtención de metabolitos secundarios responsables de una actividad antioxidante y antibacteriana de 9 plantas medicinales en la ciudad de Cuenca-Ecuador”, Tesis de grado, Fac. de Cienc. Químicas, Univ. de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34091>
- [43] S. S. Shapiro y M. B. Wilk, “An analysis of variance test for normality (complete samples),” *Biometrika*, vol. 52, no. 3–4, pp. 591–611, dic. 1965, doi: 10.1093/BIOMET/52.3-4.591.
- [44] W. H. Kruskal y W. A. Wallis, “Use of Ranks in one-criterion variance analysis,” *J. Amer. Stat. Assoc.*, vol. 47, no. 260, pp. 583–621, 1952, doi: 10.1080/01621459.1952.10483441.

ANEXOS

ANEXO A: Evidencia Fotográficas de Materiales y Equipos utilizados para el estudio:

- a) Fabricación de probetas de acero A36 mediante equipo CNC y limpieza con desengrasante.



- b) Fabricación de Tubos PVC 3" x 55cm de largo, con tapas hembras.



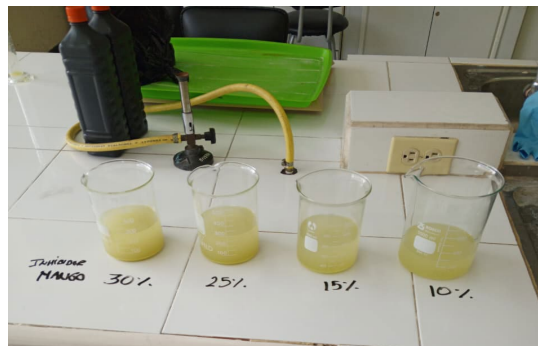
- c) Preparación de Inhibidor a partir de cáscaras de Mango o *Mangifera Indica* L.



d) Soluciones ácidas controladas de HCl 0,05 M ; H₂SO₄ (lluvia ácida) con agua destilada, para simular ambientes agresivos.



e) Preparación de distintas concentraciones de inhibidor 10 %, 15 %, 25 % y 30 %

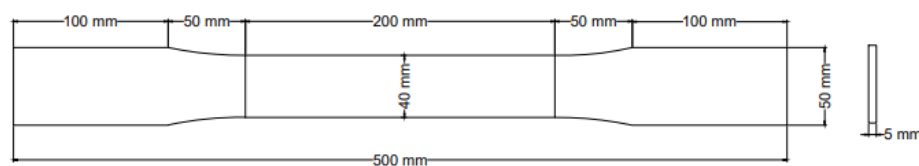


f) Medición de pH al inhibidor y solución ácida

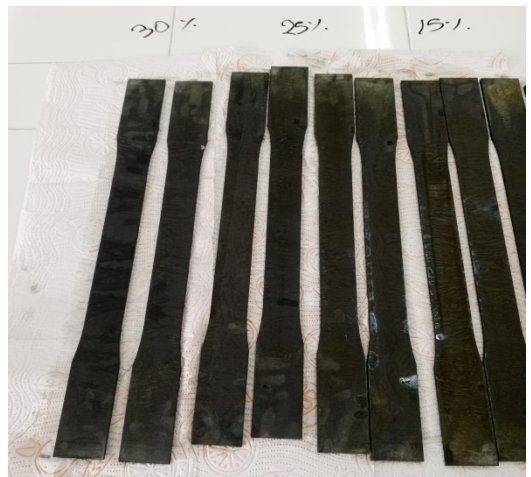


g) Dimensiones de placa de acero A36 para someter a ensayos

PLACAS DE ACERO A36 e=5mm



ANEXO B: Registro fotográfico del ensayo por pérdida de masa



ANEXO C: Evidencias fotográficas de ensayos a tracción a placas de acero A36

