

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE RECUBRIMIENTOS
INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN LA ADHERENCIA POR INTERACCIÓN
MECÁNICA DEL ACERO DE REFUERZO.

Por

ING. CLAUDIA IVETH CEPEDA RODRIGUEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en
Materiales de Construcción

Julio, 2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, por todo el apoyo que me han brindado incondicionalmente.

A mi mejor amiga, Angela, gracias por tu apoyo en todas las etapas de mi vida, espero y siempre estes presente.

A la Facultad de ingeniería Civil, al Instituto de Ingeniería Civil, por permitirme realizar mi investigación en sus instalaciones y al departamento de Estructuras y ensaye por la ayuda en mi experimentación.

Agradezco al Dr. Cesar Antonio Juárez Alvarado, asesor de mi tesis, por su apoyo y comprensión a lo largo del desarrollo del proyecto.

Al Consejo Nacional de ciencia y tecnología (Conacyt) por el soporte económico que me brindo estos años.

A las personas que colaboraron en este proyecto de investigación, gracias por todo.

Dedicatoria

*A mi querida hermana Karen,
gracias por guiarme en los momentos más oscuros
y siempre confiar en mí.
Aunque ya no estes presente,
valoro todo lo bonito que me dejaste en la vida,
te quiero.*

Resumen

Una propiedad fundamental para la adecuada transferencia de esfuerzos en las estructuras de concreto reforzado es la adherencia entre el acero y el concreto. Aunque la literatura reporta diversos estudios sobre este fenómeno, existe un vacío en la evaluación de la adherencia de varillas corrugadas recubiertas con productos anticorrosivos. En este estudio se evalúa experimentalmente la adherencia entre varillas de acero recubiertas con tres tipos de anticorrosivos, considerando dos diámetros de refuerzo, debido a que este parámetro influye en el comportamiento de la unión entre ambos materiales. Los ensayos se realizaron utilizando concreto con una resistencia a la compresión de $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$. Para evaluar la resistencia de la adherencia se emplearon dos métodos experimentales: vigas sometidas a tensión y ensayos de extracción (*pull-out*). Estos procedimientos permitieron analizar las variaciones en los esfuerzos de adherencia ocasionadas por los diferentes recubrimientos anticorrosivos y por el diámetro de las varillas.

La adherencia entre el acero y el concreto constituye el principio fundamental del funcionamiento del concreto reforzado como sistema estructural. El estudio de este fenómeno es indispensable para comprender los efectos que produce la disminución de la adherencia, así como el deterioro del mecanismo de transferencia de esfuerzos entre ambos materiales, el cual puede conducir a una reducción de la capacidad resistente y, eventualmente, a la falla del elemento estructural.

CONTENIDO

Contenido	
CAPITULO 1 GENERALIDADES	2
1.1 Introducción	2
1.1.1. Pruebas de adherencia	4
1.2 Antecedentes.....	5
1.3 Planteamiento del problema	9
1.4 Justificación de la investigación	10
1.5 Objetivos de la investigación	11
1.5.1 Objetivo General.....	11
1.5.2 Objetivos Específicos	11
1.6 Hipótesis	11
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	13
2.1 Materiales empleados para la fabricación de las probetas de concreto.....	14
2.1.1 Cemento Portland	14
2.1.2 Agregados	14
2.1.3 Agua de la mezcla.....	14
2.1.4 Acero	14
2.2 Mezcla de concreto	14
2.3 Prueba de resistencia a compresión	15
2.4 Aplicación de productos preventivos en las varillas de acero	16
2.4.1 Sikatop Amatec 108 EpoCem (AE)	16
2.4.2 Mapefer 1K (AMK).....	17
2.4.3 Fester CM-100 (ACM)	17
2.5 Diseño y fabricación de especímenes de concreto reforzado.....	18
2.6 Pruebas para la evaluación de adherencia entre concreto y acero de refuerzo ..	21
2.6.1 Prueba Pull-out	22
2.6.2 Pruebas viga a tensión	22
CAPÍTULO 3	24
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	24
3.1 Mezcla de concreto	24
3.1.1 Resistencia a compresión	24
3.2 Prueba Pull – out	25

3.2.1 Serie de ensayos.....	25
3.2.2 Resultados Pull-out.....	26
3.3 Prueba vigas a tensión	35
CAPÍTULO 4	42
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
CONCLUSIONES.....	42
RECOMENDACIONES	43
Referencias bibliográficas.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. Falla por adherencia en columna, ACI.....	3
Figura 1. Falla tipo frágil por adherencia en trabe de concreto	3
Figura 3. Varilla con aplicación de producto Mapefer 1K como recubrimiento anticorrosivo.....	4
Figura 4. Etapas de la metodología experimental a usar.	13
Figura 5. Cilindros de mezcla de concreto para prueba a compresión a diferentes edades.	15
Figura 6. Desmolde de cilindros para su posterior curado y ensaye a 28 días.	16
Figura 7. Curado de cilindros para ensaye a compresión a diferentes edades.	16
Figura 8. Comparativa de varilla de acero y varilla de acero recubierta con material anticorrosivo.....	17
Figura 9. Varilla de acero con recubrimiento anticorrosivo de acuerdo con su modo de aplicación.....	18
Figura 10. Especímenes elaborados para la prueba pull-out	18
Figura 11. Ejemplo de ensayo de adherencia por pull-out	22
Figura 12. Resistencia a la compresión del concreto vs edad.....	25
Figura 13. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AE diámetro ½”	27
Figura 14. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AE diámetro 3/8”	28
Figura 15. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AMK diámetro ½”	29
Figura 16. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AMK diámetro 3/8”	30
Figura 17. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo ACM diámetro ½”	31
Figura 18. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo ACM diámetro 3/8”	32
Figura 19. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AE diámetro ½”	33
Figura 21. Carga-desplazamiento, promedio varilla ½” ACM	37
Figura 22. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8” ACM	37
Figura 23. Carga-desplazamiento, promedio varilla ½” AMK.....	38
Figura 24. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8” AMK	38
Figura 25. Carga-desplazamiento, promedio varilla ½” AE	39
Figura 26. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8” AE.....	39
Figura 27. Carga-desplazamiento, promedio varilla 1/2” AS.....	40
Figura 28. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8” AS.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de antecedentes bibliográficos de varios autores.	8
Tabla 2. Diferentes diseños de mezclas de concreto para la obtención de la mezcla optima.....	15
Tabla 3. Datos resistencia a compresión de mezcla optima	24
Tabla 4. Serie de ensayos para prueba Pull-out.....	26
Tabla 5. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AE diámetro ½"	27
Tabla 6. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AE diámetro 3/8.....	28
Tabla 7. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AMK diámetro ½"	29
Tabla 8. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AMK diámetro 3/8"	30
Tabla 09. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo ACM diámetro ½"	31
Tabla 10. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo ACM diámetro 3/8"	32
Tabla 11. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AE diámetro ½".....	33
Tabla 12. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AS diámetro 3/8"	34
Tabla 13. Resultados de ensaye de tensión de adherencia	35

CAPÍTULO 1

CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

Al reforzar el concreto con el acero nos aporta propiedades mecánicas en el elemento como la resistencia y la ductilidad añadida. Actualmente un gran porcentaje de las construcciones son realizadas con concreto reforzado con varillas de acero, un problema común que se presenta en las varillas por efecto del almacenaje en la obra es el proceso de corrosión, esto debido a una reacción química o electroquímica entre el acero y el medio ambiente, produciendo un deterioro del material y sus propiedades. (Molina, et. al. 2005).

La oxidación y corrosión son mecanismos que afectan las propiedades de la superficie de este, por lo cual existen productos que ayudan a proteger los materiales ferrosos, algunos de estos productos son los morteros y los recubrimientos anticorrosivos epóxicos, pero estos son a base de diferentes materiales influyendo en la adherencia entre el concreto y el acero, algunos de estos materiales son a base de polímeros.

La adherencia es una propiedad entre el concreto y acero que se refiere a una interacción física que se produce en la matriz cementante y las barras cilíndricas del acero que se ahogan en este. (Lutz, et. Al. 2018). La adherencia permite la transferencia de esfuerzos entre los dos cuerpos en contacto, asegurando con ello un trabajo en conjunto. Cumpliendo lo anterior se plantea lo siguiente: el concreto se deforma en igual magnitud que el acero teniendo la capacidad de llegar a su esfuerzo de fluencia, es decir, teóricamente calculamos el elemento de concreto reforzado como uno solo para que los esfuerzos se transfieran del mismo modo.

Al hablar de adherencia entre estos materiales se presentan tres mecanismos de adherencia:

- Adherencia química: la cual se debe a la interconexión fisicoquímica de la pasta de cemento con la rugosidad de la superficie del acero.
- Fricción o rozamiento entre las superficies en contacto: en este caso la adhesión es nula conforme la carga va aumentando.
- La interacción mecánica (acero - concreto, concreto -concreto) conforme se incrementa la carga el comportamiento del elemento se ve modificado aumentando el deslizamiento del acero debido a la fisuración que existe internamente, el nivel de recubrimiento influye considerablemente en este mecanismo.

En esta investigación se limitará a estudiar la adherencia mecánica dejando pendiente el estudio de la adherencia química, los materiales utilizados como puentes de adherencia y lo que implica la fricción entre los dos materiales. Las propiedades físicas y químicas que influyen en la adherencia del concreto y las varillas de acero son: resistencia a la compresión y tensión del concreto, diámetro de varilla, oxidación y recubrimiento.

Cuando los esfuerzos están aplicados en el acero y concreto se llega a la máxima tensión de adherencia. El resultado más común son la falla frágil, ruptura explosiva, sin advertencia y peligrosa, sin embargo, existen dos tipos de fallas, por splitting o pull-out. La falla por splitting se produce si los esfuerzos a tensión que existen alrededor de la barra sobrepasan la resistencia a la tensión. La falla pull-out es cuando el concreto y acero desarrollan una tensión elevada de adherencia.



Figura 1. Falla tipo frágil por adherencia en trabe de concreto.



Figura 2. Falla por adherencia en columna, A.C.I.

Asimismo, debido a la fricción entre las superficies o una contribución elevada del confinamiento y la barra se comenzará a deslizar dentro del elemento del concreto hasta provocar una falla.

Se utilizan productos a base de polímeros y materiales cementantes en esta investigación los cuales ayudan a proteger a los materiales ferrosos contra el mecanismo de la corrosión, pero disminuyen propiedades como la adherencia entre el concreto y el acero, estos productos son llamados puentes de adherencia los cuales incrementan la fijación del producto al revestirse en el acero sin intervenir en la unión acero-concreto. Esta investigación propone el estudio de varillas recubiertas con tres tipos de inhibidores, así como el estudio de varilla sin anticorrosivo, se usarán dos tipos de diámetro ($d_1=1/2"$ y $d_2=3/8"$). Todas se realizarán con las mismas variantes de inhibidores corrosivos y diámetros.

Se proponen las siguientes variantes de acuerdo con el tipo de recubrimiento anticorrosivo a utilizar:

- ACM = acero con anticorrosivo Fester CM-100
- AMK= acero con anticorrosivo Mapefer 1K
- AE = acero con anticorrosivo epoxico Sikatop Armatec 108 Epocem



Figura 3. Varilla con aplicación de producto Mapefer 1K como recubrimiento anticorrosivo.

Estos productos son morteros anticorrosivos también llamados puentes de adherencia que están hechos a base de resinas epoxicas los cuales se utilizan como tratamientos preventivos o elementos previos a reparación en el acero de refuerzo que requieran una protección para evitar el proceso de la corrosión, por último, se trabajará con acero sin anticorrosivo para tenerlo como base comparativo

- AS = acero sin anticorrosivo

Para esta investigación se trabajará un concreto convencional con un $f'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$, agregados de acuerdo con la mezcla de diseño y agua potable, se utilizan moldes fabricados de madera hechos a la medida de cada prueba de la experimentación propuesta.

Con el fin de tener más información sobre la adherencia se plantean diversas configuraciones de ensayos para así tener una distribución uniforme de la tensión de adherencia a lo largo de la varilla de acero.

1.1.1. Pruebas de adherencia

Las pruebas de adherencia entre acero y concreto se realizan para evaluar la capacidad del concreto de transmitir esfuerzos a las barras de refuerzo sin que estas se deslicen. Son fundamentales para verificar el comportamiento estructural del concreto reforzado.

Se utilizaron los métodos más comunes como la prueba de Pull-out, donde se aplica una fuerza de tensión hasta que la barra se deslice o falle el concreto, reportando la carga máxima y el desplazamiento de la barra.

Las pruebas de adherencia realizadas en esta investigación son pull-out, vigas a tensión.

Con el ensaye de pull-out propuesto por el comité RILEM/CEB/FIP (1970) se obtendrán los diagramas que relaciona la tensión de la adherencia local y el desplazamiento de la varilla respecto a la superficie del concreto del espécimen en el extremo opuesto de donde se aplica la carga, se trabaja con una probeta cubica con una varilla centrada con las siguientes características:

- La probeta cubica es de 200x200x200 mm
- La varilla tiene una longitud de 800 mm (se trabaja con diámetros de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ")

El ensaye de vigas a tensión se utiliza para determinar el coeficiente de recubrimiento de concreto de la superficie de las varillas de acero.

- La probeta es rectangular de 200x50x50 mm
- La varilla tiene una longitud de 700 mm (se trabaja con diámetros de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ")

La evaluación de la adherencia en los especímenes de concreto con las variables AS, AMK, ACM, AE y con dos diferentes diámetros d1 y d2 se determinará a partir de índices de desempeño mediante el seguimiento de la adherencia del concreto.

1.2 Antecedentes

Anteriormente varios autores por medio de investigaciones adoptaron definiciones del fenómeno de la adherencia. Mosh en 1908 describe las diferencias de las fallas por splitting y pull-out. Abrams en 1913 indica que la tensión de la adherencia depende del desplazamiento relativo de la varilla embebida con respecto al concreto (Molina, et. al. 2005).

Otros autores analizaron la resistencia a la compresión del concreto con la variable de los diámetros de las barras de acero pues estas tienen una influencia en el resultado de la resistencia de la adherencia. Concluyen que cuanto mayor sea la resistencia a la compresión del elemento del concreto mayor será la resistencia de la adherencia siendo lo mismo para el diámetro de la barra.

Guanoliquín y colaboradores estudiaron la influencia de la oxidación en la capacidad de adherencia entre el acero y el concreto, primeramente, las varillas se sometieron a un proceso de oxidación acelerada, mediante exposición en una

cámara de niebla salina. Los estados de oxidación fueron 0, 50, 100, 200 y 300 horas, con la finalidad de tener barras ligeramente oxidadas, mediamente oxidadas y severamente oxidadas. Los diámetros de la varilla empleados fueron 10 y 12mm.

Dicho análisis tiene un enfoque hacia la oxidación en las varillas de concreto, solo que primero oxidaron las varillas y después fueron embebidas en el concreto y comúnmente el proceso constructivo es colarlas y posteriormente por condiciones ambientales hay un deterioro físicoquímico, por lo cual sería necesario saber si este factor influye en la adherencia.

El análisis de los resultados arroja que existe dos tramos dentro del fenómeno de la adherencia, en el primer tramo cuando las varillas se encuentran ligeramente oxidadas la tensión de adherencia aumenta, mientras cuando las barras están media y severamente oxidadas la tensión de adherencia disminuye, de acuerdo con una tendencia, propia para cada uno de los diámetros utilizados. Faltando analizar varillas con un anticorrosivo y embebidas en concreto.

Se analizó la adherencia en el concreto conforme a RILEM bajo la normativa ASTM C 900-13: Método de prueba estándar para la resistencia a la extracción del concreto endurecido, pero hacen falta variantes como el coeficiente por anticorrosivos empleados en las varillas. Así también (Molina, et. al. 2004) analizó el ancho de recubrimiento de concreto que es una variante importante en la prueba pull-out; a comparación del estudio anterior, la primera hace varias pruebas de adherencia para calcular coeficientes que ayudan en el cálculo de longitud efectiva.

Carvalho y Colaboradores investigaron la unión de acero-concreto armado con varillas de diámetros menores a 10mm (5, 6.3 y 8mm), el concreto fue de una resistencia a compresión de 25MPa, realizando tres tipos de método de fuerza unión: prueba de barra confinada, prueba de pull-out y prueba de viga. (Carvalho, et al. 2017).

La prueba de barra confinada ha sido adoptada en Brasil, se realizó con una longitud de la viga de concreto de $>15d$ y la longitud de la varilla fue $>15d+120$, esto con la finalidad de calcular el coeficiente de recubrimiento de concreto de la superficie (n), se calcula a partir de la distancia media entre las fisuras.

Los resultados de las pruebas de barras confinadas muestran que esta prueba puede ser inadecuada para determinar el coeficiente de recubrimiento superficial de barras de refuerzo de menos de 10 mm. En cuanto a las probetas para los ensayos de extracción, se sugiere un modelo modificado con una longitud de anclaje igual a 10 veces el diámetro de la barra. En este estudio no toma en

cuenta la influencia de la corrosión del acero de refuerzo ante la adherencia de concreto.

Molina y colaboradores estudian el fenómeno de la adherencia en estructuras de concreto reforzado, realizando pruebas de pull-out con probetas prismáticas variando el diámetro (12, 16 y 20mm) y el recubrimiento del concreto ($c=92, 64, 32$ y 0mm).

Concluye que la tensión máxima de adherencia local aumenta con el recubrimiento de concreto hasta una cierta relación recubrimiento de concreto/diámetro aproximadamente igual a $c/\phi=4$ a partir de la cual se estabiliza ya que queda garantizada la formación del anillo de tensión en el concreto que equilibra las fuerzas de adherencia y a partir de este límite es escasa la influencia del recubrimiento del concreto.

Respecto a la influencia del diámetro de la barra no sólo influye en la tensión de adherencia en el tipo de fallo, ya que para un mismo recubrimiento del concreto al aumentar el diámetro de la barra la tendencia al hendimiento (splitting) es mayor. La investigación se enfoca principalmente al tamaño del recubrimiento del acero, pero de igual forma tiene un vacío respecto a variables en la varilla como recubrimientos epóxicos y corrosión.

Molina, M. y colaboradores establecen en su estudio de varillas lisas y corrugadas con un revestimiento epóxico el comportamiento similar comparando las varillas con y sin revestimiento y la disminución de adherencia mayoritaria en las varillas lisas tras el endurecimiento de la resina considerándolo inaceptable.

Se presenta a continuación la siguiente tabla comparativa de los diferentes antecedentes bibliográficos y su aportación al tema de investigación.

Tabla 1. Comparativa de antecedentes bibliográficos de varios autores.

Autor	Contribución
Abramsin (1913)	Señala que la tensión de adherencia es función del desplazamiento de la varilla respecto al concreto que lo rodea.
Morsch (1908)	Distingue los dos tipos de fallos, pull-out y splitting.
Tepfers (1973)	Afirma que la transferencia de tensiones desde la varilla embebida produce fuerzas de inclinación siendo estas a compresión según un ángulo α , apareciendo fisuración interna.
Cairns (1995)	La falla por adherencia se puede originar cuando el recubrimiento es menor que tres veces el diámetro de la varilla, ya que aumente la carga y la fisuración interna se propaga.
Lutz (1970)	Estudio el mecanismo en los que se basa la adherencia en diferentes varillas lisas, la cual permanece adherida por la adhesión química que existe en los materiales.
Lutz y Goto (1971)	Describen los mecanismos y la formación de los tipos de fisuras debido al tipo de falla y crean una clasificación de fallas en: primarias, secundarias y longitudinales.

Al tener escasa información en la literatura sobre este tema, este trabajo se enfocará en estudiar los tratamientos preventivos en varillas de acero que comúnmente sufren corrosión por el medio ambiente, con base a esto se propone hacer 2 tipos de pruebas para analizar la adherencia entre el concreto y acero con diferentes inhibidores.

1.3 Planteamiento del problema

El comportamiento resistente de estructuras de concreto armado se fundamenta en una adecuada transferencia de esfuerzos entre el concreto y el acero. Cuando existe una degradación de la adherencia, que afecta a la integridad de los elementos, el mecanismo de transferencia de los esfuerzos se deteriora. Esto modifica negativamente la capacidad de las estructuras, incrementando su deformación y disminuyendo su seguridad. Si no existiese adherencia, las varillas serían incapaces de tomar el menor esfuerzo de tracción, ya que el acero deslizaría sin encontrar resistencia en toda su longitud y no acompañaría al concreto en sus deformaciones, con lo que, al fisurarse éste, sobrevendría bruscamente la rotura. (Lorifice, R. et. al. 2007).

El acero en concreto reforzado aporta propiedades, evitando fallas sujetas a esfuerzos de tensión, flexión debido a cargas vivas, muertas e instantáneas. Sin embargo, para proteger el acero se utilizan productos inhibidores en las varillas para evitar la corrosión por la formación de óxido, pero estos productos a su vez conducen a la pérdida de adherencia entre el acero y concreto

El garantizar la adherencia entre estos materiales y mantener el acero en buen estado, ya que si esto no se cuida podría verse afectada la estructura, así como la reducción de su capacidad resistente. Por lo cual en la actualidad se emplean diferentes inhibidores de la corrosión, así como recubrimientos epóxicos, tales como el nitrato de calcio, membranas protectoras, la protección catódica, barras de refuerzo recubiertas con resina epóxica y selladores para concreto.

Dichos productos garantizan una protección al acero, pero es escasa la información sobre los efectos que tienen sobre la adherencia entre el concreto y acero, por lo cual este trabajo tiene como objetivo evaluar los anticorrosivos empleados en las varillas comerciales como medio de prevención. Se evaluará la adherencia entre en concreto y acero de refuerzo, determinando el coeficiente de recubrimiento empleado para el cálculo de la longitud efectiva. Esta investigación se orientará en el análisis de adherencia empleando las pruebas pull-out y vigas a tensión, aplicando dos tipos de inhibidores y un recubrimiento epóxico que usualmente son usados para prevenir la corrosión, se realizarán dichas pruebas con dos tipos de diámetros de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ " debido a que el diámetro de la varilla es un parámetro que modifica la adherencia.

En resumen, el problema de investigación de este proyecto se basa en la problemática que causa la perdida de adherencia entre el concreto con el acero y el comportamiento del acero, que trabaja como refuerzo, cuando se le ha incorporado algún inhibidor de corrosión.

1.4 Justificación de la investigación

La dificultad del fenómeno de la adherencia entre el concreto y el acero involucra factores y parámetros que intervienen en el funcionamiento del elemento estructural como el producto inhibidor anticorrosivo. (Molina, M. et. al. 2010). No solo es fundamental en aspectos como la durabilidad al colocar una barrera física ante la entrada de agentes agresivos, sino que desempeña un defecto en la adherencia del concreto – acero.

El acero en la construcción en conjunto con el concreto trabaja principalmente como un solo elemento por lo que es necesario evaluar los coeficientes de adherencia para determinar que la estructura trabaje de acuerdo con la aceptación de distintas normativas.

Al hacer el cálculo de algún elemento de concreto reforzado no existe una variante o algún factor que se puede añadir o calcular en su diseño, debido a esto, el logro de tener un comportamiento adecuado en la transferencia de esfuerzos por medio de la adherencia mecánica es un aspecto importante del dimensionamiento de elementos de concreto reforzado. En los estudios experimentales han propuesto métodos para estimar los esfuerzos de adherencia, pero estos métodos no toman en cuenta factores y variables como el recubrimiento del concreto y pueden intervenir en los efectos en forma definitiva al comportarse el elemento estructural.

Existen diversos estudios sobre el estudio de adherencia entre el acero de refuerzo y concreto, así como normativas que rigen el diseño de la longitud de anclaje, pero aun es escaso a temas referentes a la determinación de los esfuerzos internos y los mecanismos de fallas por interacción de adherencia. En la literatura se ha estudiado pruebas a flexión, tensión y pull-out, pero existe un faltante respecto al comportamiento de la estructura al aplicar un producto anticorrosivo, por ello este estudio propone el análisis de la adherencia con anticorrosivos aplicado en el acero de refuerzo.

Por lo cual se realizarán pruebas de pull-out para obtener las curvas de tensión de adherencia frente al deslizamiento en la barra de acero y calcular la fuerza de unión máxima. Los especímenes tendrán dos variantes, el tipo de recubrimiento con dos diámetros. Como segunda prueba se realizará la prueba de vigas en tensión para determinar el coeficiente de recubrimiento de concreto esto ayudará a confirmar que dicho coeficiente corresponde a 1 o si se aproxima a este valor.

En las estructuras de concreto reforzando con algún tipo de producto anticorrosivo aplicado en la varilla, es fundamental conocer su comportamiento estando en funcionamiento para la prevención de fallas.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de los inhibidores y recubrimientos epóxicos anticorrosivos aplicados en las varillas de acero por medio de la experimentación de ensayos de adherencia mecánica entre el concreto y acero.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las curvas de tensión de adherencia frente al deslizamiento de la barra de acero para el cálculo de la fuerza de unión máxima a partir de la prueba de pull-out.
- Determinar el coeficiente de recubrimiento de concreto, el cual es un indicativo del nivel de la adherencia entre la superficie del concreto y el acero para calcular la longitud efectiva partir de la prueba de tensión.
- Evaluar la resistencia de unión última entre el concreto y acero para la determinación de adherencia de los materiales.
- Evaluar el efecto de revestimiento ante la adherencia del concreto y el acero para identificar el producto anticorrosivo que más adherencia aporta al elemento estructural.

1.6 Hipótesis

La aplicación de productos anticorrosivos a las varillas de acero afectara la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo. Lo que reducirá la resistencia mecánica del concreto reforzado sujeto a esfuerzos de tensión y flexión.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se explicará el procedimiento empleado para llevar a cabo la metodología experimental de la investigación.

La experimentación consiste en la adecuación de las varillas y fabricación de moldes de madera para las pruebas físicas de concreto, así como el diseño de la mezcla optima con la cual se trabajó, teniendo la mezcla optima junto con los moldes fabricados y las varillas recubiertas y cortadas se realizaron el colado de los especímenes, así como su curado para finalmente realizar el ensayo a 28 días de cada prueba. El trabajo experimental se divide en 4 etapas como se muestra en la siguiente figura.

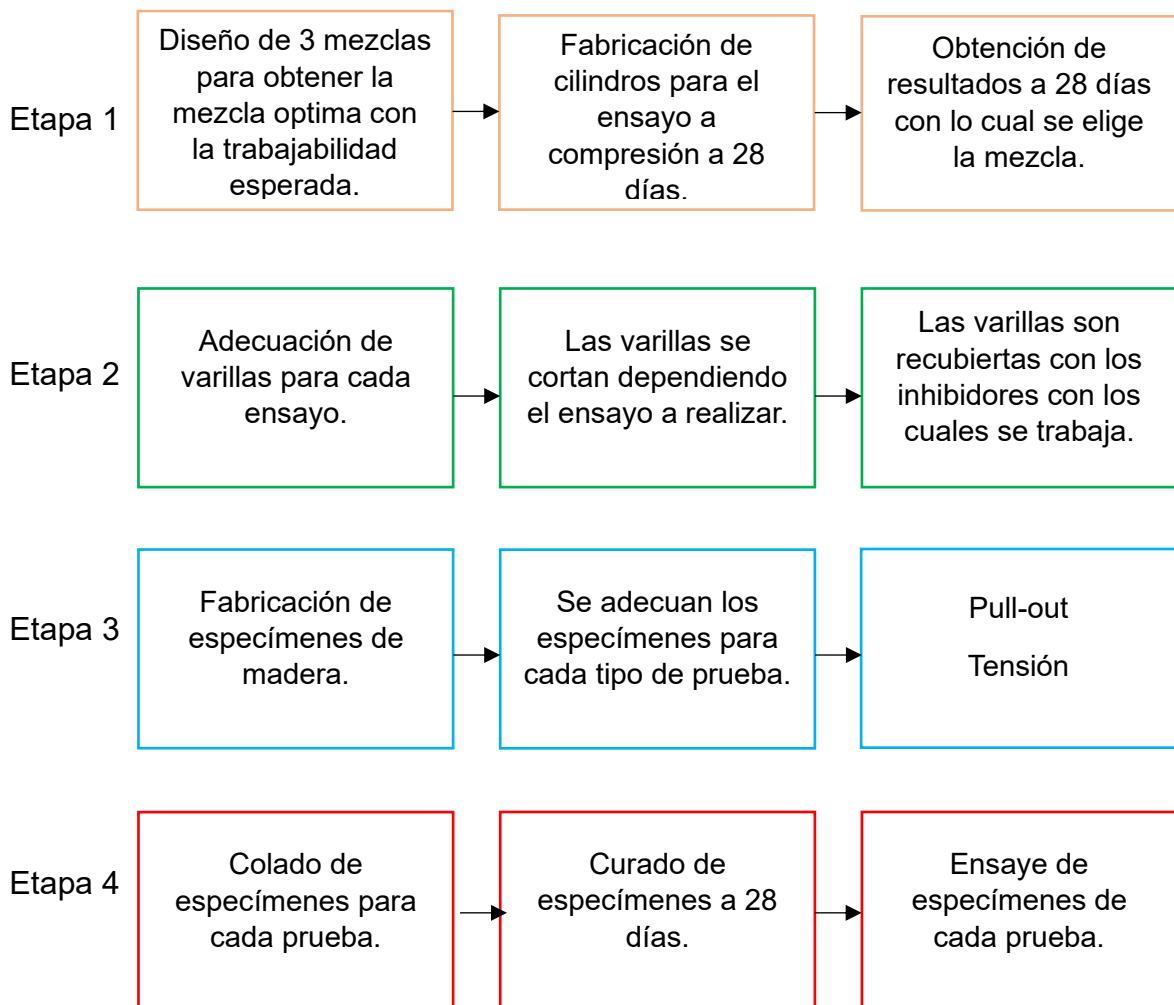


Figura 4. Etapas de la metodología experimental a usar.

2.1 Materiales empleados para la fabricación de las probetas de concreto.

2.1.1 Cemento Portland

Para la fabricación de las mezclas de concreto, se empleará un cemento portland compuesto (CPC) que cumple con la normativa NMX-C-414-ONNCCE (Industria de la construcción, cementos hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba. 2004) y es similar a un cemento denominado tipo I en ASTM C150. Este cemento se eligió al ser un producto común, usado en la mayoría de las obras civiles ya que es de fácil acceso su compra.

2.1.2 Agregados

Para la elaboración de la mezcla, se usó arena estándar comercial #4 y grava comercial #2 misma que cumple con la normativa N-CMT-2-02-002/02 (Materiales para concreto hidráulico, Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico), debido a las medidas de los moldes de madera no fue necesario cambiar la grava #2 por la gravilla ya que se tendría que cribar, al tener las medidas y recubrimientos de los especímenes se eligió trabajar con la grava comercial #2.

2.1.3 Agua de la mezcla

Se usó agua potable para la mezcla debido a que es un componente esencial para la elaboración del concreto por sus fases de hidratación y su capacidad ligante con el cemento. El agua utilizada cumple con la tabla no. 1, Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas en el agua de la normativa N-CMT-2-02-003/02 (Materiales para concreto hidráulico, Calidad del agua para concreto hidráulico).

2.1.4 Acero

Para el refuerzo de los especímenes de concreto se usará varillas de grado 42, misma que cumple con la normativa N-CMT-2-03-001/04 (Materiales para estructuras. Acero y productos de acero, Acero de refuerzo para concreto hidráulico), los diámetros utilizados fueron: $d1=1/2"$ y $d2=3/8"$.

2.2 Mezcla de concreto

A continuación, se presentan los proporcionamiento de las mezclas de concreto, de las cuales se seleccionó la primera mezcla, esto dependió de la resistencia que se obtuvo a los 28 días, con la que se trabajó para los ensayos de adherencia.

Tabla 2. Diferentes diseños de mezclas de concreto para la obtención de la mezcla optima.

Proporcionamiento para 1 m3 (1000 l)					
Diseño de mezcla	Rel. a/c	Cemento (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	Agua (kg)
1	0.59	386	697	1314	237
2	0.62	367	583	912	228
3	0.52	351	629	1262	214

2.3 Prueba de resistencia a compresión

Se diseñaron 3 proporcionamientos de mezcla de concreto de las cuales se realizaron cilindros cumpliendo con la norma ASTM C 31, (Practica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra), se llenaron y compactaron según los procedimientos estándar, pasando 24 horas se curaron bajo condiciones apropiadas para temperatura y humedad para después realizar el ensayo a los 28 días y así, poder evaluar la resistencia a la compresión la cual debe de ser superior a 25 MPa.



Figura 5. Cilindros de mezcla de concreto para prueba a compresión a diferentes edades.



Figura 6. Desmolde de cilindros para su posterior curado y ensaye a 28 días.



Figura 7. Curado de cilindros para ensaye a compresión a diferentes edades.

2.4 Aplicación de productos preventivos en las varillas de acero

A continuación, se describe el procedimiento para la aplicación de los productos anticorrosivos en las varillas de acero.

2.4.1 Sikatop Amatec 108 EpoCem (AE)

Su modo de aplicación es por brocha aplicando una capa de entre 0.5 y 1 mm de espesor sobre el acero limpio y sin corrosión, dejando secar durante 2 a 3 hrs. (a temperatura ambiente de 20 °C) y entonces se aplica una segunda mano de espesor similar.

2.4.2 Mapefer 1K (AMK)

Su modo de aplicación es por medio de brocha directamente sobre la superficie limpia y seca. Se extiende el producto en dos capas. La segunda capa puede aplicarse después de aproximadamente 2 horas desde la aplicación de la primera y, preferiblemente, antes de que transcurran 24 horas. El espesor total de las dos capas deberá ser de aproximadamente 2 mm.

2.4.3 Fester CM-100 (ACM)

Su aplicación es sobre la superficie seca y libre de impurezas, por medio de brocha, cubriendo toda la superficie y cuando haya endurecido la primera capa (después de 3 horas aproximadamente) aplicar la segunda capa y dejar secar nuevamente de 20 a 30 minutos.

Se aplicarán los productos anticorrosivos de acuerdo con la ficha técnica y recomendaciones del producto.



Figura 8. Comparativa de varilla de acero y varilla de acero recubierta con material anticorrosivo.



Figura 9. Varilla de acero con recubrimiento anticorrosivo de acuerdo con su modo de aplicación.

2.5 Diseño y fabricación de especímenes de concreto reforzado.

Después de la selección de la mezcla óptima y la aplicación de productos anticorrosivos en las varillas, se continuó con la fabricación de los especímenes de concreto reforzado.

Se diseñaron 2 tipos de especímenes, el primero fue diseñado para la prueba pull-out según lo recomendado en el RILEM, los especímenes se fabricaron de 200x200x200mm y con una longitud de varillas de 700mm con las variables (AS, AMK, ACM, AE, d1 y d2) (véase figura 10).

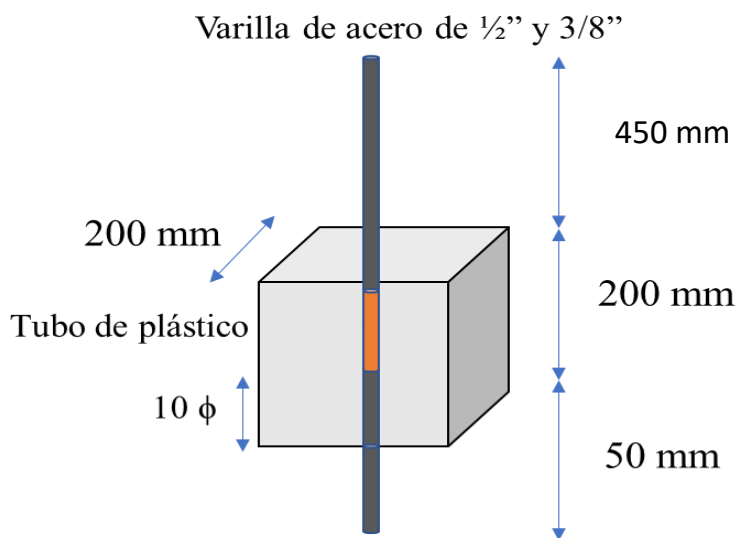


Figura 10. Especímenes elaborados para la prueba pull-out



Figura 11. Moldes de madera para prueba pull-out de acuerdo con las medidas de prueba.

Como última prueba se realizó la prueba a tensión de adherencia con las variantes (AS, AMK, ACM, AE, d1 y d2) y con una longitud de varilla de 700 mm, recubiertas de concreto de 50x50x200 mm, como se observa en la siguiente figura 12.

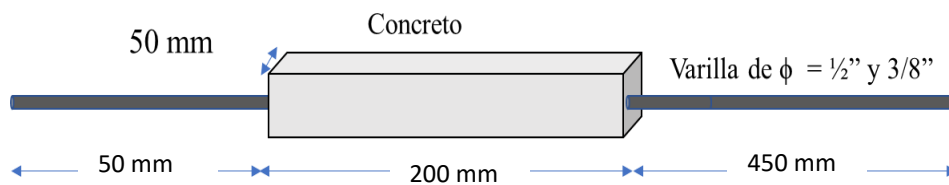


Figura 12. Especímenes elaborados para la prueba de vigas a tensión



Figura 13. Moldes de madera para prueba vigas a tensión en dos medidas de acuerdo con el diámetro solicitado.

2.6 Pruebas para la evaluación de adherencia entre concreto y acero de refuerzo.

La evaluación de la adherencia en los especímenes de concreto con las variables AS, AMK, ACM, AE y con dos diferentes diámetros d1 y d2 se determinó a partir de índices de desempeño mediante el seguimiento de la adherencia del concreto. Cada variable se realizó tres veces en cada diámetro por prueba para prevenir la dispersión de resultados como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cantidad de variables por prueba a realizar

SERIE	CANTIDAD DE VARILLAS	ANTICORROSIVO APLICADO	DIAMETRO DE VARILLA	PRUEBA A REALIZAR
1	3	Sikatop (AE)	1/2	Pull-out
2	3	Mapefer (AMK)		
3	3	Fester (ACM)		
4	3	Sin anticorrosivo (AS)		
5	3	Sikatop (AE)	3/8	
6	3	Mapefer (AMK)		
7	3	Fester (ACM)		
8	3	Sin anticorrosivo (AS)		
9	3	Sikatop (AE)	1/2	Tensión
10	3	Mapefer (AMK)		
11	3	Fester (ACM)		
12	3	Sin anticorrosivo (AS)		
13	3	Sikatop (AE)	3/8	
14	3	Mapefer (AMK)		
15	3	Fester (ACM)		
16	3	Sin anticorrosivo (AS)		

2.6.1 Prueba Pull-out

En este trabajo se realizó con la prueba más utilizada para obtener las curvas de tensión de adherencia frente al deslizamiento de la varilla de acero y calcular la fuerza de unión máxima. Esta prueba se realizó con la maquina universal como se muestra en la figura, este ensayo se realizó bajo la normativa establecida por RILEM.

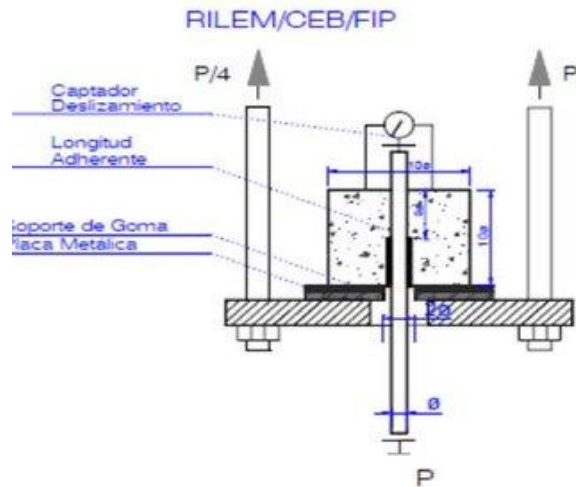


Figura 11. Ejemplo de ensayo de adherencia por pull-out

2.6.2 Pruebas viga a tensión

Dicha prueba es para determinar el factor de revestimiento de concreto, este es empleado para calcular la longitud de desarrollo. En esta prueba, la barra se tira a tensión transfiriendo gradualmente la tensión normal al concreto.

El factor de revestimiento (η) se calcula a partir de la distancia mediante la longitud entre grietas como lo establece (Carvalho et. al., 2017). A continuación, se presenta la fórmula para obtener (η):

$$\eta = \frac{2.25 \cdot d}{\Delta l_{promedio}} \quad d = \sqrt{\pi \varnothing \left(\frac{\varnothing}{4} + 7 \right)}$$

Donde:

d =longitud de la sección transversal de la muestra en (cm)

$\Delta l_{promedio}$ =distancia media entre fisuras, considerando las cuatro caras.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se conocerán los resultados que se obtuvieron a través de la programación experimental mencionada en el capítulo anterior, los cuales se iniciaron con la adecuación del acero, así como la fabricación de los moldes para posteriormente colar, curar y ensayar las probetas a 28 días con las tres pruebas descritas anteriormente.

Se mencionarán los resultados obtenidos de los ensayos a cilindros a 28 días de las tres mezclas par así justificar la selección de la mezcla optima.

También se mencionan los resultados de las pruebas pull-out y vigas a tensión con la aplicación de los tres tipos de anticorrosivos, (AE, AMK, ACM) aplicada en el acero, así como la probeta sin anticorrosivo (AS) con los dos diferentes diámetros utilizados para determinar cuánto influye el material anticorrosivo que recubre la varilla de acero en la adherencia con el concreto.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de los dos ensayos con sus variantes descritas se establecen las conclusiones.

3.1 Mezcla de concreto

3.1.1 Resistencia a compresión

Se realizaron 9 probetas cilíndricas de concreto para realizar los ensayos de compresión y obtener la mezcla optima con la que se estará trabajando.

Al realizar los ensayos de la resistencia a la compresión de cilindros, se pudo comprobar que el concreto propuesto para los ensayos pull out, tensión y flexión, alcanzó una resistencia óptima, que fue de 257.5 Kgf/cm². (Véase tabla 3.)

Tabla 3. Datos resistencia a compresión de mezcla optima

FECHA DE ENSAYO	EDAD CONCRETO (DIAS)	AREA (CM ²)	CARGA (KGF)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (KGF/CM ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (N/MM ²)	RESISTENCIA MEDIA (KGF/CM ²)	RESISTENCIA REAL (%)
04/11/2022	7	176.7	32650	185	18.1	185	74%
11/11/2022	14	176.7	37550	213	20.8	213	85%
25/11/2022	28	176.7	44610	252	24.8	257.5	103%
25/01/2022	28	176.7	46395	263	25.7		

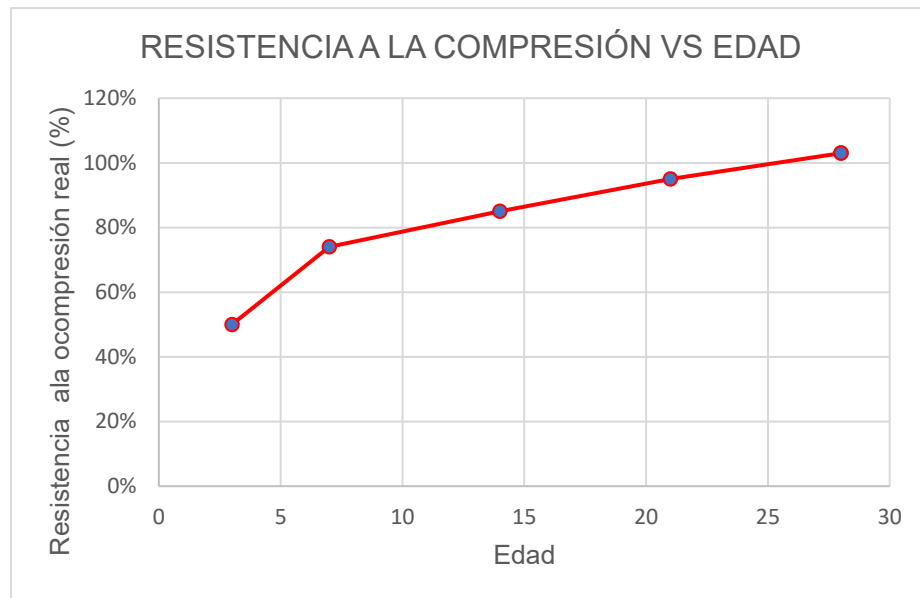


Figura 12. Resistencia a la compresión del concreto vs edad

3.2 Prueba Pull – out

La prueba pull -out relaciona el recubrimiento con el diámetro de la varilla de acero y su influencia en la adherencia, esta prueba se utiliza para poder determinar los datos de la tensión ocasionada en la adherencia y poder comparar los anticorrosivos, con los datos obtenidos se calcula el porcentaje de adherencia, ya que los valores dependen de las variables antes mencionadas. Según la literatura el ensayo propuesto por el Comité Euro-internacional du Betum (CEB), llamado Pull – out es el óptimo para el análisis de la influencia de oxidación y anticorrosivos en el fenómeno de la adherencia. (Guanaloquin, 2018).

Los datos que se obtuvieron de este ensayo fueron la carga aplicada y el deslizamiento de la varilla.

3.2.1 Serie de ensayos

Se realizan seis series distintas de ensayos con la variable de diámetro de la varilla. Se elaboraron 3 probetas por diámetro por cada prueba, teniendo como resultados 24 probetas para el ensayo, así como se especifica en la siguiente tabla.

Tabla 4. Serie de ensayos para prueba Pull-out

SERIE DE ENSAYOS PULL-OUT			
No. SERIE	PROBETAS	DIAMETRO	ANTICORROSIVO
1	3	1/2	Sikatop (AE)
	3	3/8	
2	3	1/2	Mapefer (AMK)
	3	3/8	
3	3	1/2	Fester (ACM)
	3	3/8	
4	3	1/2	Sin anticorrosivo (AS)
	3	3/8	

3.2.2 Resultados Pull-out

Los datos obtenidos de la prueba Pull-out son la carga que se aplica al elemento a ensayar y el deslizamiento de la varilla, con esto se puede observar la falla producida a la probeta. Para calcular dicha adherencia es mediante con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{ce}{\pi \cdot \phi \cdot la}$$

Donde:

τ = Tensión de adherencia

Ce = Carga aplicada en kg

Φ = Diámetros de la varilla en cm

la = Longitud de adherencia en cm

A continuación, se presentan los resultados de cada serie especificando el anticorrosivo usado y el diámetro de la varilla.

Serie 1. Anticorrosivo Sikatop AE

A continuación, se presenta la figura Carga-desplazamiento utilizando el recubrimiento Sikatop (AE) con diámetro de la varilla $\frac{1}{2}$ ", se observa la carga máxima siendo 3300 kg con un desplazamiento mayor de 3.60 mm.

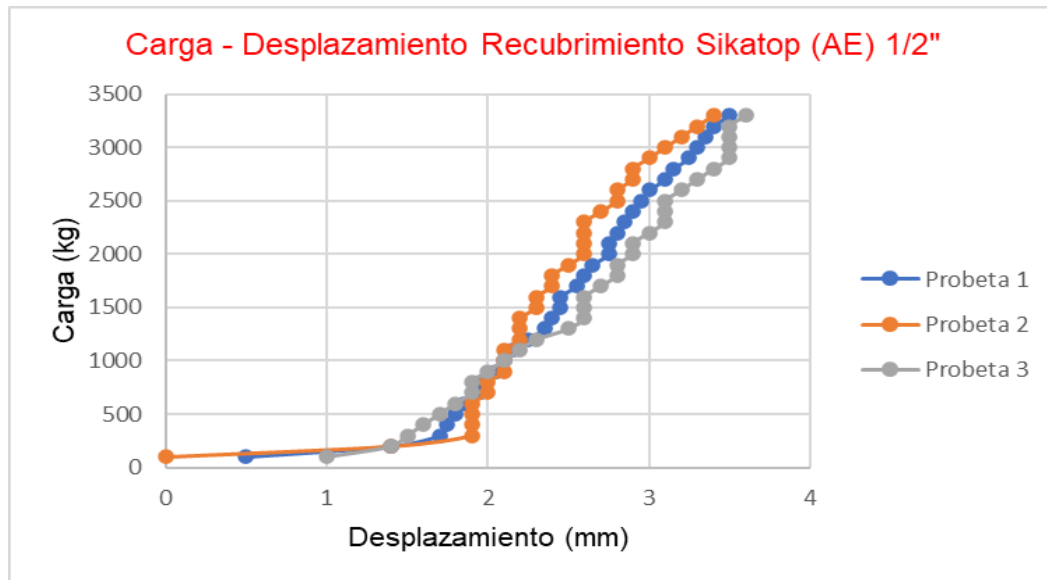


Figura 13. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AE diámetro $\frac{1}{2}$ "

El comportamiento de las tres probetas ensayadas es similar, con cargas de 0 a 500 kg mantiene un deslizamiento de la varilla menor a 2 mm, incrementando al aumentar la carga aplicada, en el rango de 500 a 3500 kg disminuye el deslizamiento sin sobrepasar los 4 mm de desplazamiento.

Tabla 5. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AE diámetro $\frac{1}{2}$ "

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm ²)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm ²)
1.27	1	100	2.5	36.76
1.27	1.7	500	12.5	
1.27	2.1	1000	25.1	
1.27	2.6	1500	37.6	
1.27	3.1	2400	60.2	
1.27	3.6	3300	82.7	

Se obtiene una tensión de adherencia media de 36.76 kg/cm² siendo el promedio de las tensiones de adherencias de las cargas críticas.

Se presenta la figura carga-desplazamiento del anticorrosivo Sikatop AE con el diámetro de varilla de 3/8"

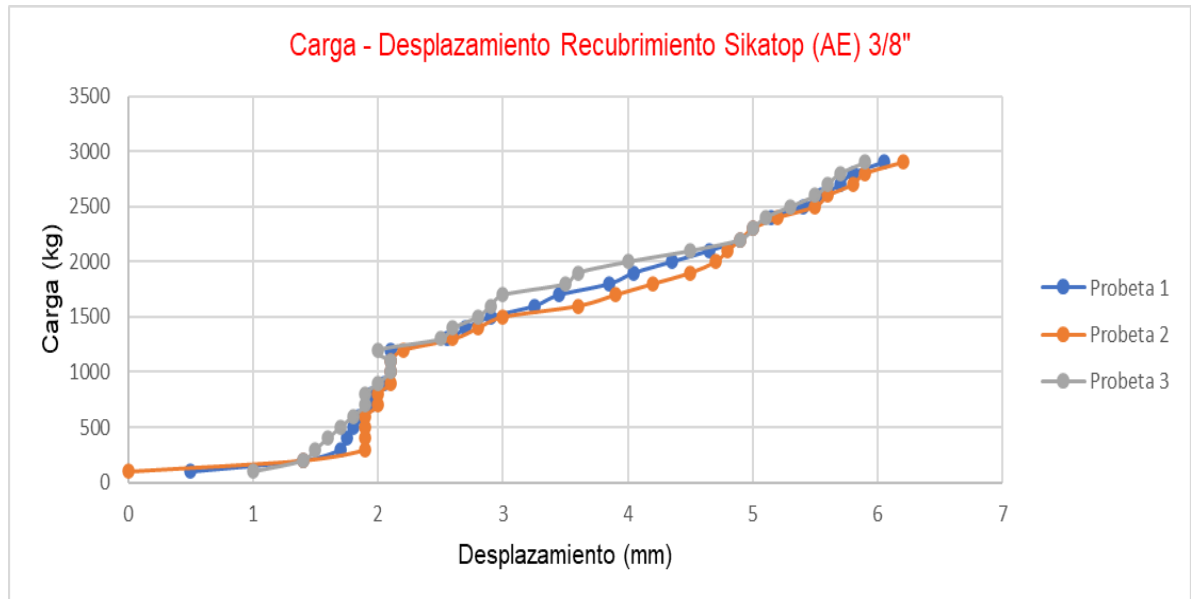


Figura 14. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AE diámetro 3/8"

A comparación del ensaye con varillas de 1/2" de diámetro, de carga de rango de 0 a 500 el comportamiento de los dos ensayes es similar, su deslizamiento no es mayor a 2 mm, pero en el rango de 500 a 3000 kg de carga aplicada tiene un mayor desplazamiento del acero.

Tabla 6. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AE diámetro 3/8"

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm2)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm2)
0.95	1	100	3.4	50.82
0.95	1.7	500	16.8	
0.95	2.8	1500	50.3	
0.95	3.6	1900	63.7	
0.95	4.9	2200	73.7	
0.95	5.9	2900	97.2	

La carga máxima de este ensaye es de 2900 kg con un desplazamiento promedio de 6 mm, con estos datos se obtiene una mayor tensión de adherencia media de 50.82 kg/cm2 en comparación del ensaye de varilla de 1/2" que fue de 36.76 kg/cm2.

Serie 2. Mapefer AMK

Se presenta la figura carga-desplazamiento con el recubrimiento Mapefer AMK con varilla de ½" de diámetro.

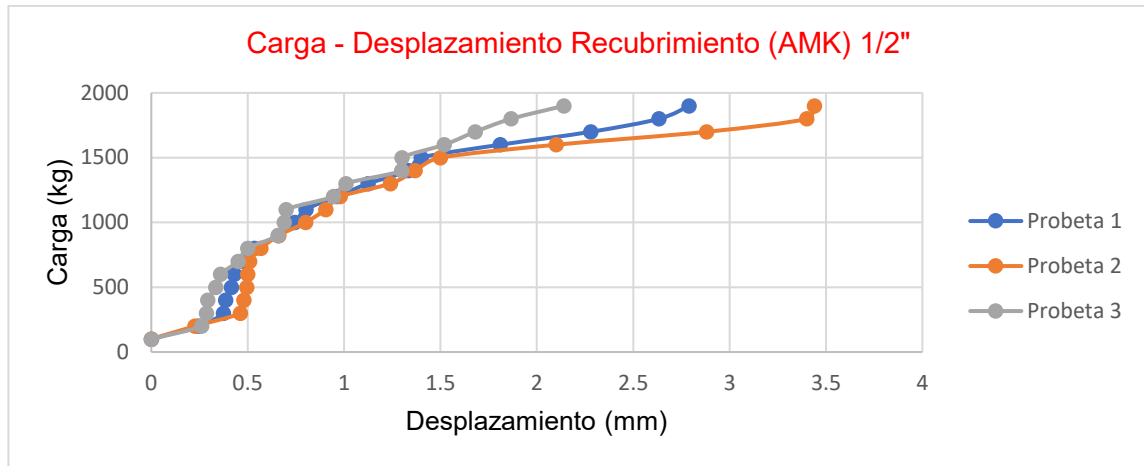


Figura 15. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AMK diámetro ½"

Se presenta una carga máxima de 1900 kg con un deslizamiento de 3.29 mm, en rangos de carga de 0 a 500 kg las tres probetas tienen un deslizamiento similar no mayor a 0.5 mm, incrementando la carga el deslizamiento tiende a variar de 2 a 3.5 mm, esto puede suceder por la dispersión de probetas de ensayos y operadores.

Tabla 7. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AMK diámetro ½"

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm ²)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm ²)
1.27	0	100	2.5	26.32
1.27	0.334	500	12.5	
1.27	0.658	900	22.6	
1.27	1.01	1300	32.6	
1.27	1.52	1600	40.1	
1.27	2.14	1900	47.6	

Se obtienen una tensión de adherencia media de 26.32 kg/cm² con un deslizamiento máximo de 2.14 siendo este el crítico en el ensaye con una carga máxima de 1900 kg.

La siguiente figura corresponde a la carga-desplazamiento con el recubrimiento Mapefer AMK utilizando varilla de 3/8" de diámetro.

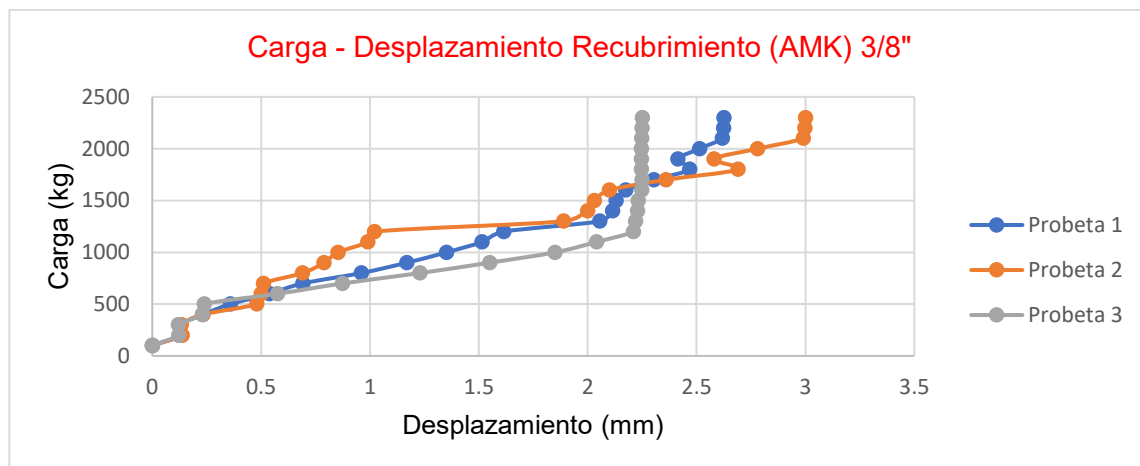


Figura 16. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AMK diámetro 3/8"

Se obtiene una carga máxima de 2300 kg con un desplazamiento de 3 mm y una variación entre las tres probetas de 0.9 mm de desplazamiento. El comportamiento se va incrementando conforme aumenta la carga, en la probeta 2 se ve un comportamiento lineal de 1000 a 1500 kg con el deslizamiento de 1 a 2 mm.

Tabla 8. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AMK diámetro 3/8"

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm ²)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm ²)
0.95	0	100	3.4	37.42
0.95	0.239	500	16.8	
0.95	1.55	900	30.2	
0.95	2.22	1300	43.6	
0.95	2.248	1600	53.6	
0.95	2.251	2300	77.1	

Se obtiene una tensión de adherencia media de 37.42 kg/cm² de acuerdo con los datos obtenidos en el ensaye.

Serie. 3 Fester ACM

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante la figura carga-desplazamiento del recubrimiento Fester ACM con varilla de ½" de diámetro.

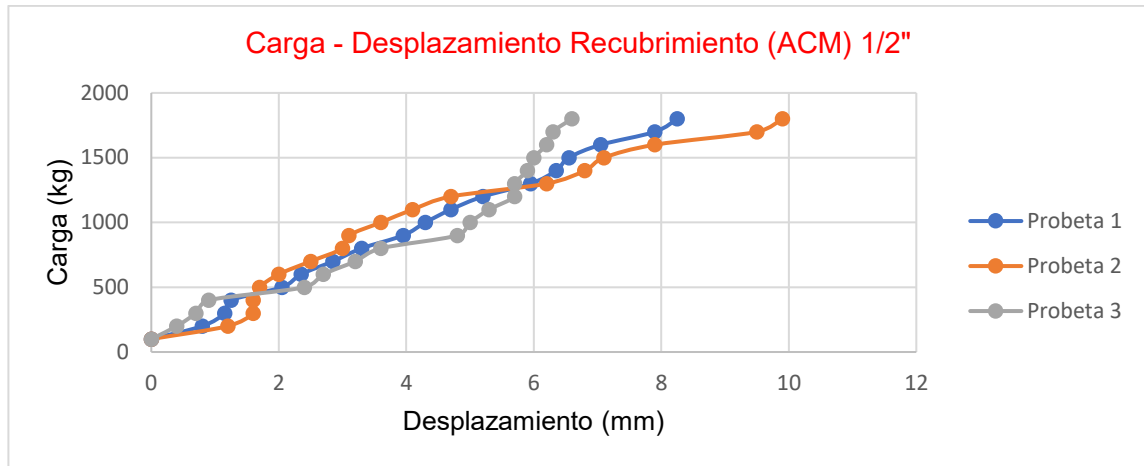


Figura 17. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo ACM diámetro ½"

Las tres probetas ensayadas tienden a tener un desplazamiento no mayor a 10 mm, en rangos de carga de 0 a 1500 kg su desplazamiento es similar, aumentando la carga la probeta 2 tiene un desplazamiento mayor a comparación de la probeta 3 con diferencias de 2 mm aproximadamente.

Tabla 9. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo ACM diámetro ½"

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm ²)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm ²)
1.27	0.4	200	5.0	23.39
1.27	2.4	500	12.5	
1.27	3.2	700	17.5	
1.27	4.8	900	22.6	
1.27	6	1500	37.6	
1.27	6.6	1800	45.1	

Se obtiene una tensión de adherencia media de 23.39 kg/cm² con los datos obtenidos críticos del ensaye.

A continuación, se presenta la figura carga-desplazamiento con el anticorrosivo Fester ACM con varilla de diámetro de 3/8".

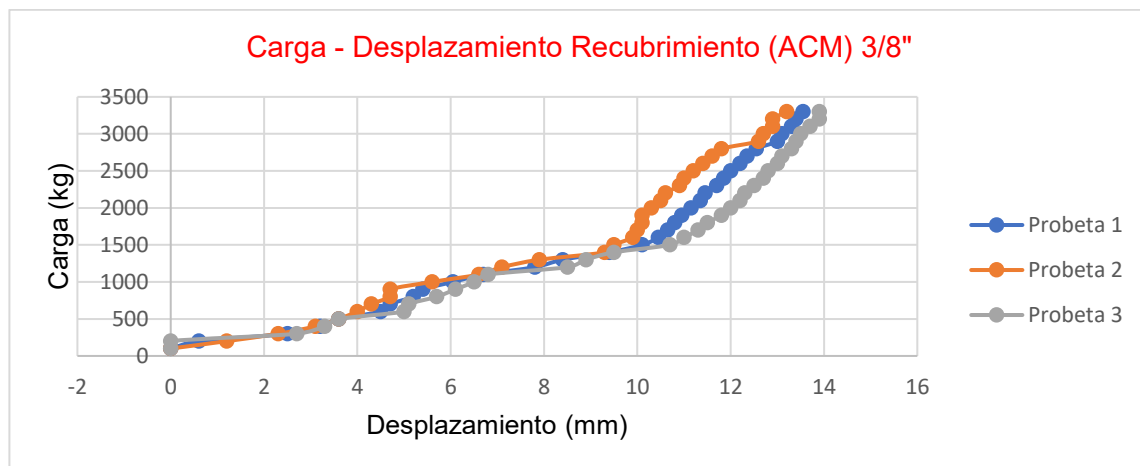


Figura 18. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo ACM diámetro 3/8"

Las tres probetas muestran un comportamiento similar en relación con la carga aplicada con rangos de 0 a 3500 kg con un desplazamiento obtenido mayor de 14 mm, se observa un deslizamiento mayor en rangos de carga de 1500 a 3500 kg a diferencia de las primeras cargas donde se da una relación de 0 a 500 kg con desplazamientos menores a 4 mm.

Tabla 10. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo ACM diámetro 3/8"

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm ²)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm ²)
0.95	2.7	300	10.1	50.82
0.95	3.6	500	16.8	
0.95	6.1	900	30.2	
0.95	10.7	1500	50.3	
0.95	12.8	2500	83.8	
0.95	14	3400	113.9	

Se obtiene una tensión de adherencia media de 50.82 kg/cm² con una carga aplicada máxima de 3400 y un desplazamiento de 14 mm en la probeta 3 y 13 mm en la probeta 2.

Serie 4. Sin anticorrosivo AE

A continuación, se presentan los datos de la ultima serie de ensayos de Pull-out con varillas sin anticorrosivo de diámetro de ½”.

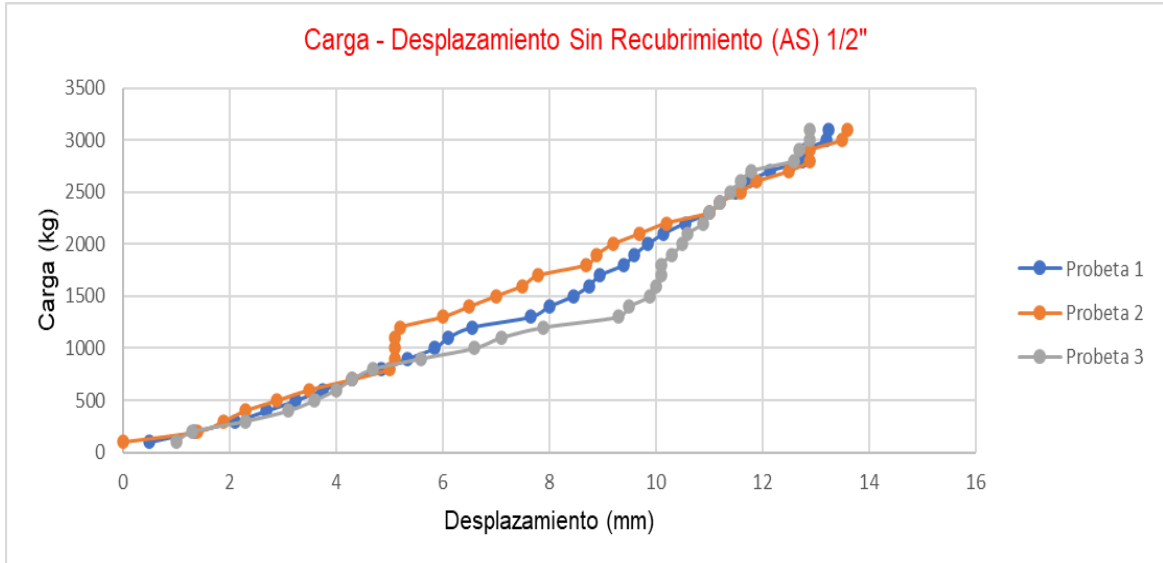


Figura 19. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AE diámetro ½”

Se observa una dispersión de datos en rangos de carga de 1000 a 2000 kg, en este ensayo se obtuvo una carga máxima aplicada de 3100 kg similar a la prueba con anticorrosivo Sikatop AE que se obtuvo una carga máxima de 3300 kg, con la diferencia que este ensaye se obtiene un desplazamiento máximo de 13.7 mm a diferencia de los 4 mm del desplazamiento máximo del anticorrosivo AE.

Tabla 11. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AE diámetro ½”

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm ²)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm ²)
1.27	1	100	2.5	38.85
1.27	4	600	15.0	
1.27	7.9	1200	30.1	
1.27	10.3	1900	47.6	
1.27	11.2	2400	60.2	
1.27	12.9	3100	77.7	

Se obtiene una tensión de adherencia media de 38.85 kg/cm² obteniendo la carga máxima de 3100 con relación a su deslizamiento de 12.9 mm.

A continuacion, se presentan los datos obtenidos del ensaye con la figura carga-deslizamiento utilizando varillas de 3/8" de diametro sin recubrimiento de algun anticorribo.

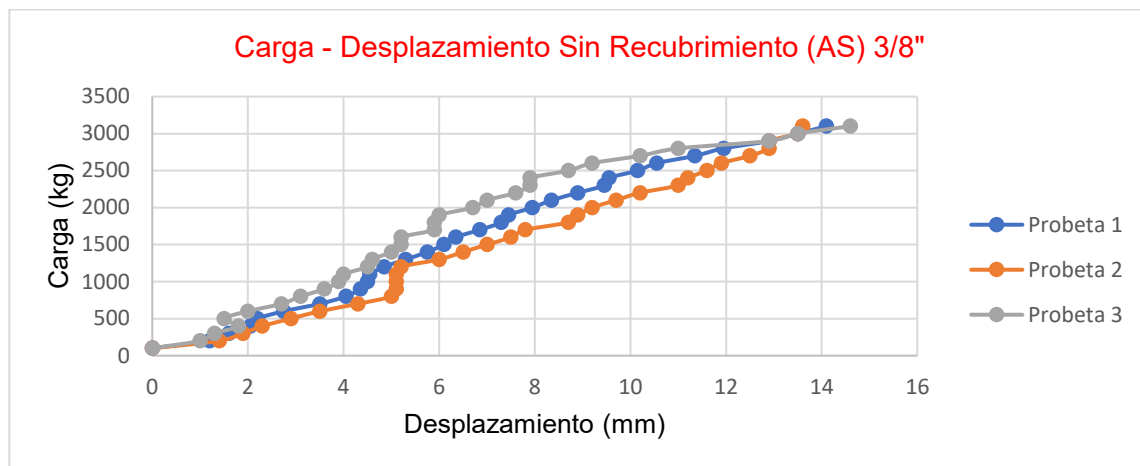


Figura 20. Carga – Desplazamiento Anticorrosivo AS diámetro 3/8"

En la figura se puede apreciar una carga máxima aplicada de 3100 kg similar al ensaye con varillas de 1/2" y un deslizamiento de 14.6 mm, mayor al ensaye del diámetro anterior el cual su desplazamiento máximo fue de 12.9 mm

Tabla 12. Ensayo Pull-out Tensión de adherencia Anticorrosivo AS diámetro 3/8"

DIÁMETRO DE LA VARILLA (CM)	DESLIZAMIENTO (mm)	CARGA (KG)	TENSIÓN DE ADHERENCIA (kg/cm2)	TENSIÓN DE ADHERENCIA MEDIA (kg/cm2)
0.95	0	100	3.4	51.93
0.95	2	600	20.1	
0.95	4.5	1200	40.2	
0.95	6	1900	63.7	
0.95	7.9	2400	80.4	
0.95	14.6	3100	103.9	

Con los datos obtenidos se obtuvo una tensión de adherencia media de 51.93 kg/cm2.

Con los datos obtenidos de las 4 series, se comenta que la tensión de adherencia media es mayor en las varillas con diámetros de 3/8", el deslizamiento mayor se obtuvo del ensaye con varillas sin anticorrosivo con el diámetro menor utilizado el cual fue 14.6 mm, la carga máxima antes de la falla se obtuvo del ensaye con anticorrosivo Fester con una carga de 3400 kg y la mínima fue de 1900 kg en el ensaye del anticorrosivo Mapefer AMk con varillas de 1/2" de diámetro.

3.3 Prueba vigas a tensión

En los ensayos a tensión se ha analizado la adherencia entre el concreto y la varilla de acero, por medio de la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento.

Los datos obtenidos son: la carga aplicada en el extremo superior de la varilla y el deslizamiento en el extremo pasivo, para poder calcular el factor de revestimiento, esto mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{2.25 \cdot d}{\Delta l_{average}} \quad d = \sqrt{\pi \phi \left(\frac{\phi}{4} + 7 \right)}$$

Donde:

d = longitud de la sección transversal de la muestra en (cm)

$\Delta l_{promedio}$ = distancia media entre fisuras, considerando las cuatro caras.

Se realizaron ensayos de 6 probetas con los anticorrosivos que se estuvieron estudiando, a continuación, se muestran los resultados en la tabla.

Tabla 13. Resultados de ensaye de tensión de adherencia

Anticorrosivo Fester CM-100 (ACM)					
Probeta	Diámetro varilla	Carga (máx)	Desplazamiento mm (máx)	η	Promedio
ACM-1	1/2"	1460	2.145	1.26	1.89
ACM-2		2300	7.302	1.46	
ACM-3		2130	3.782	2.95	
ACM-4	3/8"	1700	3.503	3.43	2.54
ACM-5		2500	2.250	3.02	
ACM-6		2100	4.861	1.16	
Anticorrosivo Mapefer 1K (AMK)					
Probeta	Diámetro varilla	Carga (máx)	Desplazamiento mm (máx)	η	Promedio
AMK-1	1/2"	3020	1.320	3.49	3.02
AMK-2		3810	9.250	2.51	
AMK-3		3100	3.600	3.07	
AMK-4	3/8"	2090	6.800	2.86	4.09
AMK-5		2120	5.300	6.98	
AMK-6		2105	4.900	2.43	

Anticorrosivo Sikatop Epocem (AE)					
Probeta	Diámetro varilla	Carga (máx)	Desplazamiento mm (máx.)	η	Promedio
AE-1	1/2"	2480	12.80	2.71	3.45
AE-2		3350	14.00	4.05	
AE-3		2915	13.70	3.58	
AE-4	3/8"	1770	6.60	2.61	2.56
AE-5		1350	3.47	2.32	
AE-6		2730	9.50	2.74	
Sin anticorrosivo (AS)					
Probeta	Diámetro varilla	Carga (máx.)	Desplazamiento mm (máx.)	η	Promedio
AS-1	1/2"	3040	12.90	4.86	4.77
AS-2		2970	11.20	3.50	
AS-3		2900	10.90	5.95	
AS-4	3/8"	1280	6.50	4.02	3.48
AS-5		2070	8.40	2.90	
AS-6		1680	7.80	3.52	

Se realizó una comparación utilizando el promedio de los resultados obtenidos de las tres probetas para los diámetros de ½" y 3/8". Asimismo, se incorporó la línea de tendencia, representada mediante una línea discontinua y ajustada con una función polinómica de segundo grado. Finalmente, se incluyeron las barras de error, calculadas con base en la desviación estándar de los datos, con el propósito de representar la variabilidad de las mediciones.

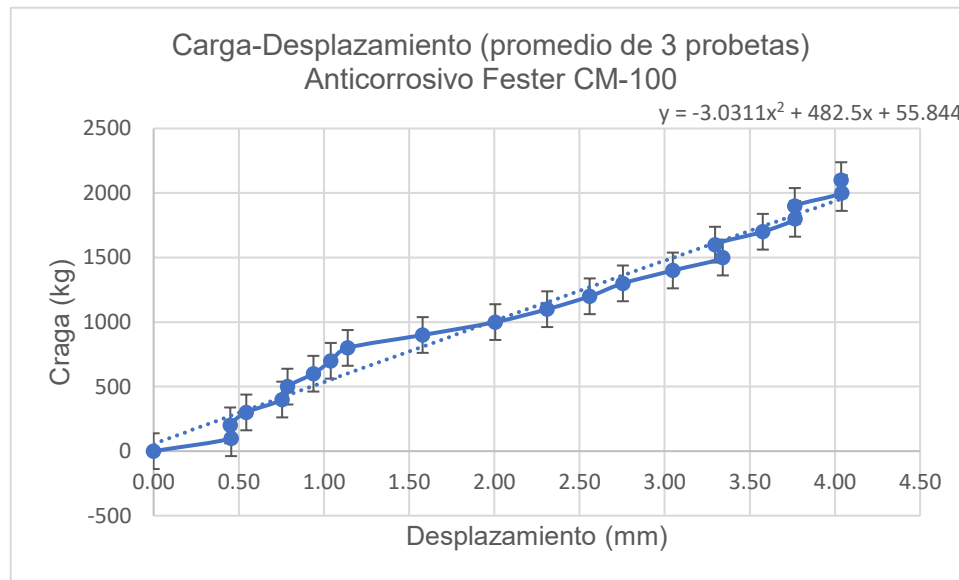


Figura 21. Carga-desplazamiento, promedio varilla ½" ACM

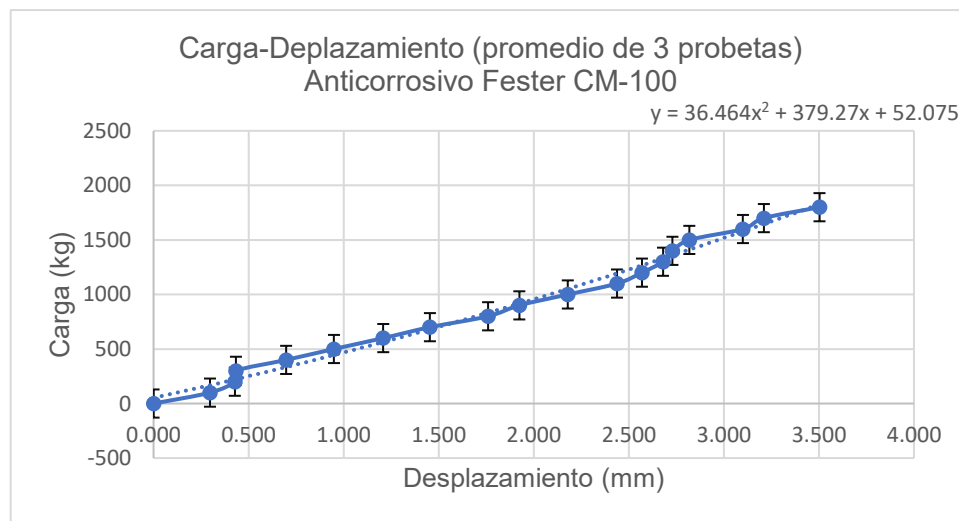


Figura 22. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8" ACM

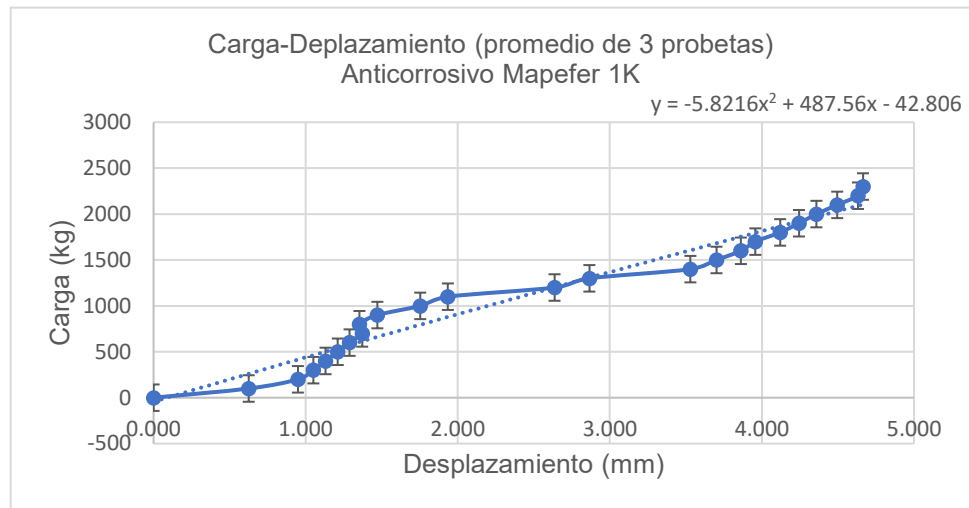


Figura 23. Carga-desplazamiento, promedio varilla ½ AMK

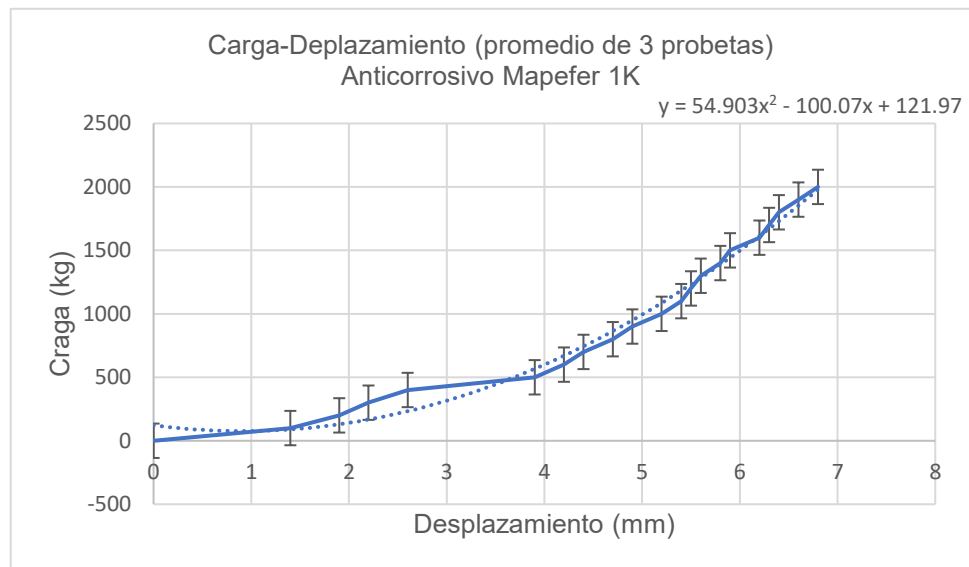


Figura 24. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8" AMK

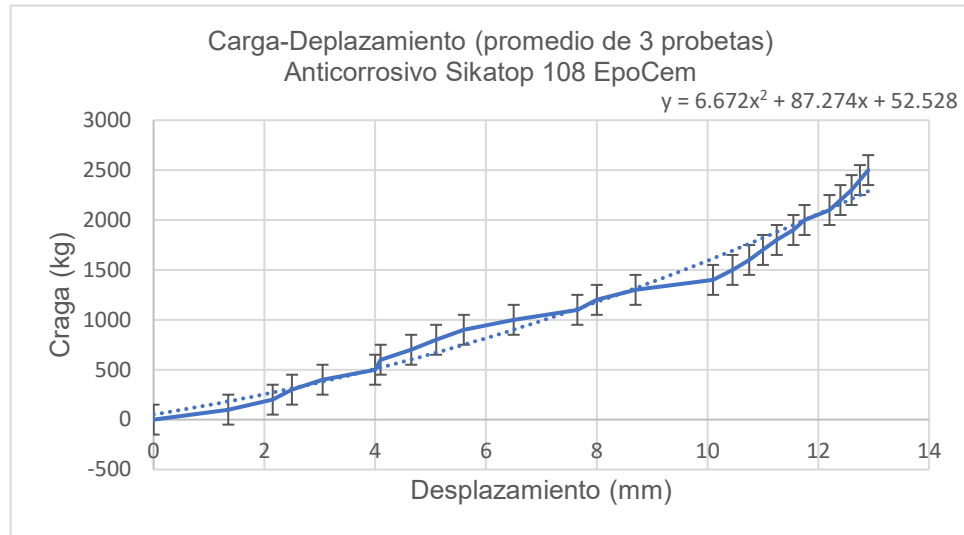


Figura 25. Carga-desplazamiento, promedio varilla ½" AE

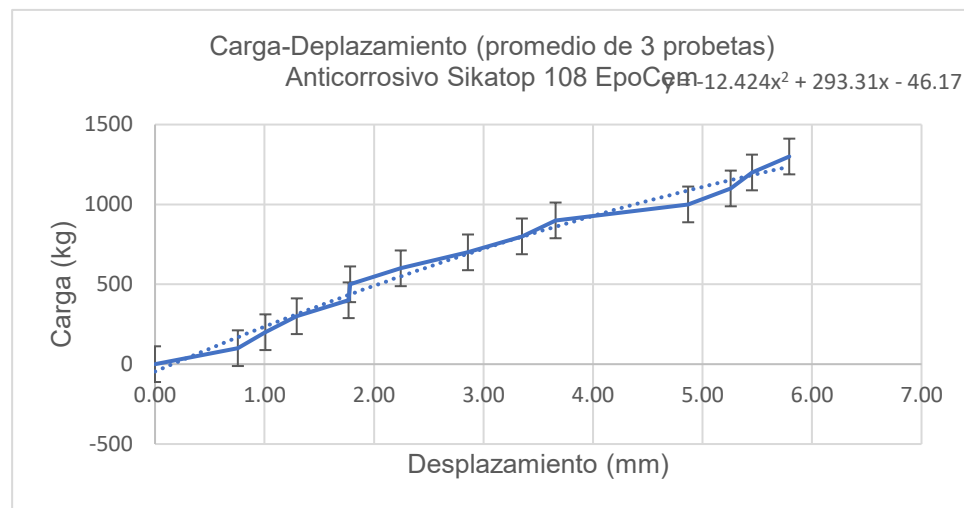


Figura 26. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8" AE

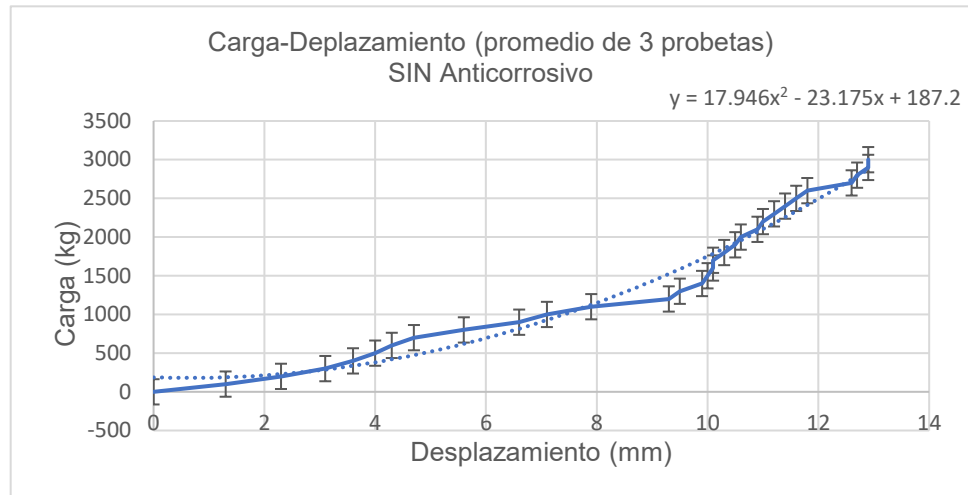


Figura 27. Carga-desplazamiento, promedio varilla 1/2" AS

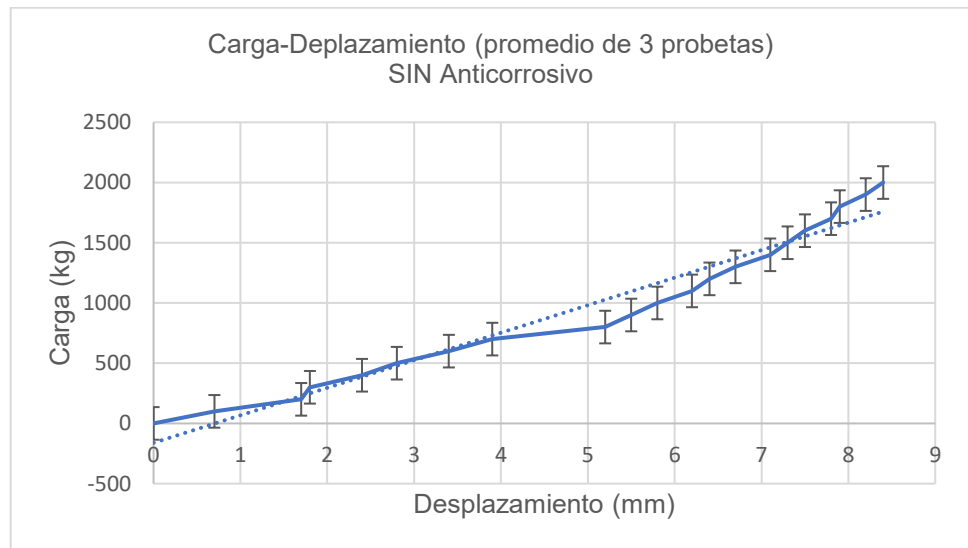


Figura 28. Carga-desplazamiento, promedio varilla 3/8" AS

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Con los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, se comprueba que existe una intervención en la adherencia, ya que esta afecta la capacidad de adhesión entre los materiales. Como consecuencia, se reduce la resistencia mecánica frente a los esfuerzos internos que se generan.
2. Al realizar el ensayo de tensión de adherencia, es posible establecer una comparación entre los tres productos anticorrosivos evaluados y la varilla sin recubrimiento anticorrosivo, con el fin de calcular y obtener, mediante tablas, los parámetros correspondientes. Los resultados muestran que los productos anticorrosivos AMK y ACM, aplicados sobre el acero, proporcionan una mejor adherencia, ya que alcanzan cargas máximas más elevadas y presentan un menor deslizamiento de la varilla. En contraste, las probetas AE y AS soportan cargas inferiores a 3000 kg y registran deslizamientos superiores a 14 mm, lo que indica un desempeño inferior en términos de adherencia.
3. En la prueba de pull-out se obtiene una mayor tensión de adherencia en las varillas con de 3/8" diámetro, sin embargo, de acuerdo con la literatura consultada, se esperaría que las varillas de mayor diámetro presentaran una mayor tensión de adherencia debido a su mayor área de contacto. No obstante, al incrementarse el diámetro de la varilla, el recubrimiento efectivo de concreto disminuye, lo que puede influir en el comportamiento de la adherencia.

RECOMENDACIONES

1. De acuerdo con los resultados obtenidos, el anticorrosivo que presentó el mejor desempeño como puente de adherencia entre el acero y el concreto fue Fester CM-100 (ACM). Por ello, se recomienda realizar estudios adicionales sobre su composición química, con el fin de conocer los componentes que lo integran y comprender los mecanismos mediante los cuales favorece la adherencia entre ambos materiales.
2. Para obtener información más precisa sobre el comportamiento de los anticorrosivos, se considera necesario realizar análisis y ensayos de caracterización química de los productos. Esto permitirá comprender mejor su comportamiento al entrar en contacto con el acero y su influencia en las propiedades de adherencia.
3. Se recomienda profundizar en el estudio de la adherencia tanto química como física entre el acero y el concreto, con el propósito de comprender de manera integral los mecanismos que intervienen en la unión de estos materiales y su efecto en el desempeño estructural.
4. En futuras investigaciones sobre el uso de materiales anticorrosivos como recubrimiento del acero, sería conveniente considerar especímenes con diferentes porcentajes de corrosión. Aunque este aspecto se contempló inicialmente en la presente investigación, fue descartado debido a las limitaciones de tiempo. Diversos estudios previos han concluido que un bajo grado de corrosión puede favorecer la adherencia entre el acero y el concreto; sin embargo, sería importante determinar el porcentaje de corrosión que puede establecerse como parámetro y evaluar si la aplicación del anticorrosivo continúa siendo técnicamente viable bajo esas condiciones.
5. Finalmente, sería de gran utilidad para diseñadores estructurales y calculistas establecer parámetros o factores de adherencia que puedan considerarse en el diseño de elementos de concreto reforzado. Actualmente, no existe una normativa o manual que defina criterios específicos relacionados con la influencia de los recubrimientos anticorrosivos sobre la adherencia acero-concreto, por lo que este tema representa una importante área de oportunidad para futuras investigaciones y el desarrollo de lineamientos técnicos.

Referencias bibliográficas

1. Alas, M. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Investigación del efecto de la corrosión del acero en estructuras de concreto armado. (2019). Chiclayo, Perú. orcid.org/0000-0002-3653-1394
2. Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Ibrahim, M., Saricimen, H., & Sharif, F. M. (2002). Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(1), 127–137. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00033-6)
3. Barros, C. Universidad de Cuenca. Análisis de la tensión de adherencia del hormigón con el acero de refuerzo en diferentes estados de oxidación y diferentes tratamientos de pasivación y protección. (2021). Ecuador.
4. Carvalho, E. P., Ferreira, E. G., da Cunha, J. C., Rodríguez, C. de S., & Maia, N. da S. (2017). Experimental investigation of steel-concrete bond for thin reinforcing bars. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(11), 1932–1951. <https://doi.org/10.1590/1679-78254116>.
5. Quintana, I. N. & Vidaud, E. J. Prueba de Pull-out para evaluar la adherencia de los materiales de reparación en concreto. *Construcción y tecnología en concreto*. IMCYC. (2014).
6. Reza, H. & Hamid, S. (2016). Nano-silica effects on mechanical properties of concrete in crude oil products environment. *Scientia Iranica*. (2016). DOI: 10.24200/sci.2016.2314
7. Varona, B., Baeza, F., & Bru, D. (2015). Análisis experimental de la pérdida de adherencia hormigón-acero en hormigones sometidos a altas temperaturas. *Tecnología de la construcción*, Vol. 90. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7184>
8. Cedeño, O. M. & González, N. Estudios sobre los esfuerzos de adherencia desarrollados entre el acero y el concreto con cabillas de diámetro 3/8", 1/2", 5/8", 3/4", y 1". *Tekhne5, Revista de ingeniería*.
9. Domínguez, N. (2013). La adherencia en el concreto reforzado; breve revisión histórica de la investigación del fenómeno. *Investigación y ciencia*, vol. 21. Aguascalientes.
10. El-Sayed, H. A., Kamal, M. M., El-Ebiary, S. N., & Shahin, H. (1987). Effects of reinforcement corrosion and protective coatings on the strength of the concrete/Steel bond. *Corrosion Prevention and Control*, 34(1), 18-23.
11. Guanoliquín, E. A. Escuela Politécnica Nacional. Estudio experimental de la influencia de la oxidación en la capacidad de adherencia de las varillas corrugadas utilizadas como acero de refuerzo en el hormigón, mediante el ensayo Pull-out. (2018).
12. Pinto, C. Universidad Nacional de San Agustín. Estudio del coeficiente de conformación superficial en barras de acero de construcción ASTM A615

de ½" de diámetro según norma ABNT NBR 7477:1982. Arequipa-Perú. (2015).

13. Molina, M., Gutiérrez, J. P., García, M. D. (2004). Influencia del diámetro de la barra y del recubrimiento en las características adherentes del hormigón armado. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 43(2), pp. 560–564. doi: 10.3989/cyv.2004.v43.i2.595.
14. Peña, D. Y., Vázquez, C., Báez, S., Anaya, H. A., & Tristancho, J. L. (2004). La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) aplicada al estudio del mecanismo de la corrosión en caliente por sales fundidas. Dyna, 39-47. ISSN: 0012-7353. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614405>
15. Soto, R. Universidad Autónoma de Nuevo León. Restitución de la resistencia a cortante en vigas afectadas por corrosión en los estribos a través de métodos usuales de rehabilitación a cortante. (2012) p.107. DOI: 10.13140/RG.2.1.3721.5766.
16. Varona, F. B., Orts, B.D. Baeza de los Santos, F. J., Chorro, I. S. Universidad de Alicante. Ensayos para evaluar la adherencia residual acero-hormigón a altas temperaturas. XIII PMS. (2012).
17. Pilakaoutas, K. & Achillides Z. Universities of leeds, Sheffield and York. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pull-out conditions. (2004). DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(173)
18. Kalman, T., Strukar, K. & Grubisic, M. (2020). Experimental investigation on bond-slip behavior of selfconsolidating rubberized concrete. Materials Science and Engineering 867. doi:10.1088/1757-899X/867/1/012038
19. Sotomayor, C. (2020). Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto. Universidad Peruana de Ciencias, Artículo técnico N°6.
20. Molina, M. Universidad Politécnica de Madrid. Comportamiento de estructuras de hormigón armado con una deficiente transferencias de tensiones hormigón-acero. Análisis experimental y propuesta de un modelo de evaluación estructural. Madrid. (2005).
21. Osorio, A. Pontificia Universidad Javeriana. Adherencia de la varilla con la mezcla de concreto obedeciendo a la forma y textura de las gravas de la misma procedencia. Bogotá, D. C. (2014).
22. Castiblanco, A. & Vargas, D. Universidad de la Salle. Longitud de desarrollo y adherencia para acero de refuerzo en elementos SFRC. (2018).
23. Molina, H., Gutiérrez, J. & García, M. Estrategias para evaluar estructuras de hormigón armado con patologías por falta de adherencia. University College Dublin.
24. Banea, M., Torres, L., Barris, C. & Turon, A. Estudio de la adherencia entre armaduras de materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) y hormigón. (2008) Hormigón y acero. ISSN: 0439-5689

25. Lorefice, R., Ledesma, M. & Asili, M. Modelación meso mecánica de adherencia hormigón – acero a diferentes edades de carga. Centro de Mecánica Aplicada y Estructuras CMAE-UNSE
26. Ventura, B. & Pérez, P. (1991). La adherencia de aceros lisos y corrugados revestidos con la resina epoxi aplicada manualmente. Hormigón y acero. Vol. 42 ISSN 0439-5689.