



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYOS EXPERIMENTALES DE ADHERENCIA Y CORROSIÓN ACELERADA
PARA BARRAS DE ACERO DE REFUERZO RECUBIERTAS CON ADITIVO
ANTICORROSIVO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

FELIPE LEVI GONZALEZ GUTIERREZ

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNANDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO ASTROZA EULUFI
WALDEMAR CAVIERE ACEVEDO

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ESTRUCTURAL
POR: FELIPE LEVI GONZALEZ GUTIERREZ
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: FRANCISCO HERNANDEZ PRADO

ENSAYOS EXPERIMENTALES DE ADHERENCIA Y CORROSIÓN ACELERADA
PARA BARRAS DE ACERO DE REFUERZO RECUBIERTAS CON ADITIVO
ANTICORROSIVO

Estudio experimental de adherencia para evaluar los efectos que producen las pinturas anticorrosivas en la interacción entre las barras de refuerzo y el concreto para elementos de hormigón armado. Adicionalmente, se busca conocer la capacidad de protección que otorgan dichas pinturas una vez que las barras de acero ya han sido embebidas dentro de elementos de hormigón armado.

La corrosión del acero es una de las mayores causas que afectan el desempeño a largo plazo de una estructura, en especial las sometidas a condiciones abrasivas. Actualmente existe una variedad de técnicas y precauciones de diseño que buscan disminuir los efectos que ambientes severamente agresivos puedan causar en las estructuras. En este estudio se busca conocer el funcionamiento de estas pinturas frente a un deterioro acelerado de barras y de manera aparte contrastar la adherencia de los refuerzos embebidos en probetas cúbicas de hormigón.

Se realizarán ensayos de adherencia “Pull-out” mecánicos y pruebas de corrosión acelerada en ambientes electroquímicos controlados. Por último, Se obtienen valores de desplazamiento y esfuerzos dentro de los ensayos de adherencia y además, medir la pérdida de masa de barras por la corrosión. Con estos datos se podría conocer la factibilidad, respecto a la normativa vigente en Chile, del uso de estos materiales anticorrosivos para barras de acero.

Agradecimientos

La palabra que define como es vivir con ellos es esfuerzo. Es inexplicable poder formar un párrafo que contenga todos los momentos que con ustedes he vivido. Los momentos más amargos y los más alegres. Para entender la admiración que siento por ellos se debería poder proyectar en una gran pantalla todos los recuerdos que tengo de la lucha que día a día han dado por mí y aún así faltarían muchos que pasan inadvertidos. A mis padres Pepe y Mely les debo todo. Hasta el último día de sus días y de mis días, voy a ser para y por ustedes como ustedes lo han sido conmigo. Me lo han dado todo y lo que no tengo es porque no debo solamente. Han puesto a mi lado a la persona que más amo en esta tierra y por quien daría, al igual que ustedes, la vida por verla sonreír. Muchas gracias a mi hermana Katalina y a la promesa tácita de compañerismo.

Aquí deseo hacer un repaso rápido en apremio al tiempo. Pero que no se confunda con que esto es ligero. Pienso que todo este recorrido concluye con un conjunto de gente que sin ella no pensaría lo que hoy pienso y quizás muy probablemente no sería lo que hoy soy.

Mi familia es variada, pero aquí menciono con mucho cariño al Gerson, al Janrro y al Alfonso. Grandes amigos de mi infancia que en cada cumpleaños aparecían el 25 de diciembre y los sacaban de sus juguetes a celebrar el cumpleaños de un cabro chico petulante y mimado.

A esos adultos que con sabiduría me aconsejaron y con muy poca disciplina me trataron. A mi tía Tina, Angela, Cocó, Lali y a mi tío Ivan y al Ale. A mi tata Alejo, a la Mami Ana y la Alicia. Y a mi compadre Jorge que me acompañe y cuide.

A temprana edad tomamos la decisión de castrar mi joven escolaridad de mujeres y entrar al foco de luz de la nación a estudiar. Un lugar que formó mi carácter y que me mostró por primera vez un matiz de personalidades tan variados como particulares. Resultando de esto mi visión crítica y mi afanada forma de discutir. Entré con la revolución pingüina y salí con uno de los movimientos estudiantiles quizás más importantes de la historia. El 2011 cuando tuvimos el coraje de paralizar un país y gritar las cosas que estaban mal. En ese adorable lugar guardo el recuerdo de los siguientes amigos: el Victor, Daryl, Pino, Willy, Paja, Cosa, Maxi, Afro, Cabezón, Pato, Sierralta y Caracci. También el necesario contacto de mis amigas la Fabi, Barbara, Nayra, Kathy, Yanara y Simona.

Desde este punto en adelante mi vida tomó un cambio brutal. Tomé la decisión de estudiar teatro y termine aquí haciendo ingeniería. Le agradezco a mis amigos y compañeros de sección que pusieron el hombro a todas esas noches de pasión y lectura. Muchas Gracias al Jairo, Negro, Zenel, Ian, Tedy, Roberto, Chacón, Koreano, Mati, Jaime, Alfi, Cojo, Max y a la

Fran, Karen, Michelle y Valentina.

No puedo sino agradecer también a todos ellos que en los últimos años me han acompañado en las victorias y las derrotas. Me han acompañado en los patios y en mi oficina a pasar un buen rato y tener una buena conversación. Profundas y pasajeras. Con esto me refiero al Dani, Chung, Roberto, Nico, Coni, Nicolini, Pinto, Baldo, Max, Barbi, Toms, Marce, Vale, Coto, Habash, Ariel, Basti, Jorgito, Xavi, Diego, Luquitas, Beto, Pame, Sol y al Papito. Con esto aprovecho de agradecer el importante apoyo que fueron mis profesores Francisco Hernandez, Rodrigo Astroza y Waldemar Cavieres por entregarme esta única oportunidad.

Creo que ya van quedando pocos, pero no menos importantes. Me quiero referir a mis amigos más cercanos a el Cañete, Jo, Milsa, Negra, Lucho, Vale, Javi Bustos y Celis, muchas gracias.

Si alguno está leyendo esto y siente que no lo nombré, le pido disculpas. La madrugada es un momento inspirador, pero no el más indicado para la diligencia. No puedo terminar sin agradecer a estas tres importantísimas personas al Ocho, al Rene y a la Dani. Puedo decir que sin ellos todo este trabajo hubiese sido imposible.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación y Generalidades	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Aspectos normativos	4
2.2. Determinación de la tensión de adherencia en ensayos pull-out en hormigón armado	5
2.2.1. Resistencia básica de adherencia norma ACI-318 2014	6
2.3. Distribución de tensiones para una barra empotrada	6
2.3.1. Distribución teórica	7
2.4. Mecanismos de corrosión	9
2.5. Experiencias de corrosión acelerada	10
2.5.1. Montajes experimentales	10
2.5.2. Penetración del agua	12
3. ESTUDIO EXPERIMENTAL	13
3.1. Condiciones de los ensayos	13
3.2. Barras de acero	14
3.3. Productos anticorrosivos	15
3.3.1. MCI Coating for Rebar	15
3.3.2. Pintura anticorrosiva de maestranza	17
3.4. Caracterización del hormigón	18
3.4.1. Cemento	18
3.4.2. Áridos	18
3.4.3. Dosificación	19
3.5. Probetas de hormigón armado	21
3.5.1. Probetas de adherencia	21
3.5.2. Probetas de corrosión	22
3.5.3. Fabricación de las probetas	24
3.6. Metodología de los ensayos	33
3.6.1. Metodología de los ensayos de adherencia	33
3.6.2. Metodología de los ensayos de corrosión	37

3.6.3. Matriz de ensayo	38
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	41
4.1. Ensayos preliminares	41
4.1.1. Preliminares de adherencia	41
4.1.2. Preliminares de corrosión	41
4.2. Desarrollo de los procedimientos	42
4.3. Resultados	43
4.3.1. Resultados de Adherencia	43
4.3.2. Resultados de Corrosión	51
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
5.1. Análisis de resultados de adherencia	57
5.2. Análisis de resultados de corrosión	58
6. CONCLUSIONES	61
6.1. Resumen	61
6.2. Conclusiones	61
6.3. Limitaciones	62
Bibliografía	63

Índice de Tablas

2.1. Parámetro Ceb para barras de adherencia	9
2.2. Resumen de parámetros de ensayos similares	11
3.1. Características nominales de las barras de acero de refuerzo	14
3.2. Características de los resaltes	15
3.3. Granulometría áridos para ensayos de corrosión acelerada y adherencia.	18
3.4. Características físicas	19
3.5. Grados de exposición que provocan corrosión	19
3.6. Dosificación para probetas de corrosión acelerada y adherencia	20
3.7. Matriz de ensayos de adherencia	39
3.8. Matriz de ensayos de corrosión	40
4.1. Valores de resistencia de adherencia nominales por norma ACI-318	44
4.2. Carga máxima ensayo 10 M	45
4.3. Carga máxima ensayo 10 P	46
4.4. Carga máxima ensayo 10 N	47
4.5. Carga máxima ensayo 16 M	48
4.6. Carga máxima ensayo 16 P	49
4.7. Carga máxima ensayo 16 N	50
4.8. Peso de las barras de corrosión acelerada	56
5.1. Cargas y tensiones máximas de probetas de adherencia	57
5.2. Densidad de barras y peso	59
5.3. Pérdida de masa	59
5.4. Diámetro barras corroídas durante 28 y 43 días	59
5.5. Promedio de diámetros barras corroídas	60

Índice de Ilustraciones

2.1. Esquema típico de un pull-out test perno-roca	4
2.2. Reacción y tensión de adherencia en la viga	7
2.3. distribución gráfica de tensiones y el ángulo de la resultante α	7
2.4. Tensión de adherencia vs. deslizamiento	9
2.5. Esquema de metodología [1]	11
3.1. Barra tipo y características generales	14
3.2. Imagen referencial de barras con pintura MCI	15
3.3. Barras de corrosión acelerada (CA) y adherencia (AD), pintadas con MCI	16
3.4. Barras de CA, pintadas con anticorrosivo de maestranza	17
3.5. Probeta de adherencia	21
3.6. Corte transversal probeta corrosión	23
3.7. Moldes para probetas de adherencia	24
3.8. Transporte de materiales y moldes de probetas de adherencia	25
3.9. hormigonado de probetas	26
3.10. Moldes de corrosión acelerada (CA)	27
3.11. Fabricación tapas de molde de corrosión acelerada	28
3.12. Fabricación probeta de prueba de adherencia y probetas de corrosión	29
3.13. Alternativa 1 montaje recipiente de corrosión	30
3.14. Alternativa 2 montaje recipiente de corrosión	30
3.12. Construcción recipientes para corrosión acelerada	33
3.13. Esquema de los ensayos de adherencia.	34
3.14. Mordaza de acero.	35
3.15. Esquema de las cámaras en el ensayo de adherencia	35
3.16. conexión en serie de probetas de corrosión	38
4.1. Marcas para lectura con arreglo de seguimiento	42
4.2. Prueba de distancia focal para ensayos de adherencia	42
4.3. Distancia definitiva	43
4.4. Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 10 M	45
4.5. Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 10 P	46
4.6. Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 10 N	47
4.7. Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 16 M	48
4.8. Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 16 M	49
4.9. Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 16 M	50
4.10. Inicio de corrosión simultaneo	51

4.11. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10M nivel 1	52
4.12. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10M nivel 2	52
4.13. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10N nivel 1	53
4.14. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10N nivel 2	53
4.15. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10P nivel 1	53
4.16. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10P nivel 2	54
4.17. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16M nivel 1	54
4.18. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16M nivel 2	54
4.19. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16N nivel 1	55
4.20. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16N nivel 2	55
4.21. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16P nivel 1	55
4.22. Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16P nivel 2	56

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y Generalidades

El objetivo del presente trabajo de título se enmarca dentro de la necesidad brindar protección a las barras de acero de refuerzo en la construcción de elementos sometidos a ambientes severamente agresivos. Uno de los principales procesos de degradación del hormigón armado es la corrosión de sus armaduras por la acción de cloruros del agua de mar para obras en ambientes marinos o las sales producidas en las zonas que sufran periódicamente tiempos de deshielo. Gracias a la alta resistencia que aporta el acero como material de construcción, es importante poder preservar sus propiedades en el tiempo para así mejorar el desempeño a largo plazo de las estructuras[2].

Para lograr esto, se pretende estudiar el comportamiento de un aditivo anticorrosivo elaborado por la empresa Cortec llamado MCI Coating for Rebar. Este producto, basado en agua, ofrece una resistencia superior a la corrosión para refuerzos embebidos, al crear una suave película sobre la superficie de las barras. Se pretende evaluar los efectos comparativos de este producto con la pintura epóxica anticorrosiva Soquina utilizada frecuentemente en maestranzas.

Cortec es una empresa que investiga y desarrolla productos para la inhibición de agentes corrosivos para el uso de múltiples industrias en el mundo. Es por esto que han creado el producto MCI Coating for Rebar enfocado en el área de la construcción. La mayoría de las pinturas anticorrosivas deben ser extraídas de las barras una vez que estas van a ser hormigonadas para no ir en desmedro de la capacidad de adherencia que existe entre las barras de acero y el hormigón de construcción. Según su fabricante MCI Coating for Rebar no sería necesario remover previamente al vaciado del concreto dentro de los elementos estructurales. Además, Cortec garantiza que los efectos de este producto se conservan en el tiempo y brindan una protección adicional a la estructura. En esto último, surgen dos reparos que se desean estudiar. En primer lugar, se encuentra la resistencia a la adhesión (Bond Strength) entre las barras y el hormigón [3]. Por otro lado, se desea conocer la efectividad del recubrimiento frente a la corrosión de barras en distintos niveles de exposición.

Para evaluar estas dos condiciones (adherencia y corrosión) se realizan dos tipos de ensayos

por separado. Por un lado, se emplea un ensayo de tipo “Pull-out” para conocer el desarrollo de tensiones y que se combinan para evaluar sus características conjuntas en un elemento sometido a tracción. Se espera basar este ensayo con las técnicas propias que se utilizan en la construcción de una obra, es por esto que no se pretende estudiar el deterioro de la adherencia debido a los efectos corrosivos. Respecto a esto se propondrá literatura especializada al respecto.

Por último, se desea conocer en que manera cooperan las pinturas anti-corrosivas en la protección interna de elementos estructurales sometidos a ambientes severamente agresivos a través del uso de un ensayo de corrosión acelerada para hormigones armados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Entender el efecto de pinturas anti-corrosivas en la resistencia a la adherencia de elementos de hormigón armado. Además, evaluar los efectos de estas pinturas en la protección a la degradación de barras de refuerzo sujetas a corrosión acelerada.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Verificar si la capacidad de adherencia de las barras de refuerzo se ven afectadas significativamente al ser pre-cubiertas con aditivos anti-corrosivos, a través del diseño e implementación de ensayos “Pull-out” o de tracción.
- Medir los efectos comparativos de la resistencia de barras de acero sujetas a ensayos de corrosión acelerada en un medio severamente abrasivos. Considerando barras normales y barras pre-cubiertas con aditivos anti-corrosivos.
- Evaluar si los aditivos anti-corrosivos pudiesen ser empleados en la práctica chilena de manera que estos cumplan su función sin modificar las propiedades mecánicas de las barras de refuerzo.

1.3. Alcances

En este capítulo 1 se realiza una descripción general del tema a tratar en este trabajo. Se incluyen las motivaciones y los objetivos del trabajo de título.

En el capítulo 2 se expone el trabajo previo para la confección de los ensayos de adherencia y corrosión acelerada. Se buscan experiencias anteriores que entreguen un marco teórico y una metodología que sirvan de referencia para el estudio acabado de los casos que se pretenden analizar. Se busca además un modelo analítico para los fenómenos físicos de ambos ensayos.

En el capítulo 3 se entregan las características materiales de las probetas y los insumos que se utilizan para su confección. Se describen además las metodologías que se diseñaron dentro de este trabajo.

En el capítulo 4 se presentan los resultados preliminares y definitivos de los ensayos para los distintos materiales de recubrimiento de barras de acero, combinación de barras y para el caso de la corrosión aceleradas, dos tiempos diferentes de exposición.

En el capítulo 5 se propone una relación de adherencia para el uso de los productos aditivos superficiales para barras empotradas con los dos tipos de pinturas que se analizan en este estudio.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

2.1. Aspectos normativos

La norma ASTM D4435-84 estandariza un método para medir el trabajo y la capacidad última de adherencia de un perno embebido en roca, pero no del comportamiento mismo del perno. Este ensayo es aplicable para obtener la resistencia mecánica, de cementos grout, resinas (epoxicos, poliéster y relacionados) u otros sistemas de empotramiento de barras.

De manera ideal, se busca que la falla provocada sea de corte en la interfase entre el perno y la roca. Para esto se debe empotrar, en la superficie, un marco que no admita deformaciones para las cargas solicitantes y que contenga un ariete hidráulico con su respectivo transductor de carga que permita ir captando la evolución de la carga durante la prueba, como en la figura 2.1. Para que todo esto tenga sentido se espera que que la producción del ensayo se realice con los mismos procedimientos con que se pretende construir [4].

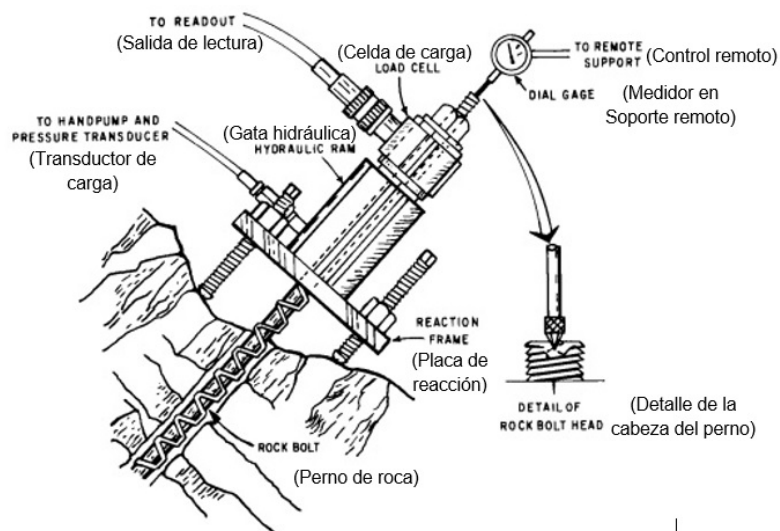


Figura 2.1: Esquema típico de un pull-out test perno-roca

Para determinar las tensiones en el perno, σ_b , en psi (MPa) se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

P = Carga en el perno, lbf (N).

A = Área transversal del perno, in^2 (mm^2).

En el caso de la deformación unitaria, U_b , esta se puede obtener como:

$$U_b = \frac{\sigma_b}{E} \times L \quad (2.2)$$

Donde:

L = Corresponde al largo expuesto entre la roca y la cabeza del perno, in. (mm)

E = Módulo elástico del acero en el perno, psi (MPa).

Es necesario adicionalmente calcular el desplazamiento correcto de la cabeza del perno, U_c , el cual es mismo desplazamiento respecto a la roca:

$$U_c = U_t - U_b \quad (2.3)$$

Donde:

U_t = desplazamiento total de la cabeza del perno.

La norma ACI-318 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural [5] proporciona una formula para determina la resistencia al cortante V_c de un elemento sometido a compresión axial. Dentro del capitulo 11 aparece la siguiente expresión:

$$V_c = \left(1 + \frac{N_u}{14A_g}\right) \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{6}\right) b_w d \quad (2.4)$$

La cantidad N_u/A_g debe expresarse en MPa.

2.2. Determinación de la tensión de adherencia en ensayos pull-out en hormigón armado

Para la conocer la adherencia que existe entre el hormigón y las barras de refuerzo es primordial conocer la resistencia del concreto que influencia los largos de empotrado y la transmisión de las tensiones hacia las estrías de las barras.

Los principales factores que influyen la adherencia entre el acero y el hormigón son[6]:

- La resistencia del hormigón: En la Bibliografía correspondiente se resume por los autores que a mayores resistencias del hormigón se produce una adherencia mayor. Estos se atribuye a la compactación del hormigón y a una reducción en el espesor de la zona de transición que se encuentra entre el hormigón y el hormigón reforzado dentro de un elemento.
- Diámetro de las barras: Un incremento del diámetro reduce la tensión de adherencia máxima. Esto se explica por el espesor de la zona de transmisión, que es más gruesa en barras de mayor diámetro. Con dimensiones más grandes entre cada estría más agua se puede acumular en la superficie de la barra en su elaboración y, por lo tanto, dejar una zona más porosa facilitando el aplastamiento del hormigón en las estrías.
- Carga a lo largo del tiempo: La aplicación de carga sobre elementos estructurales en el tiempo origina grietas que en el largo plazo deterioran la resistencia de la pieza de hormigón y de la misma manera la adherencia que entre el concreto y sus refuerzos.
- Producción del hormigón: La producción del hormigón influye la adherencia de la misma manera que a la resistencia mecánica del hormigón.

2.2.1. Resistencia básica de adherencia norma ACI-318 2014

En el capítulo 17 se mencionan diversas situaciones para calcular la resistencia de adherencia de elementos embebidos en hormigón. Dentro del capítulo se encuentra en la sección 17.4.5.2 la resistencia básica de adherencia en tracción para un anclaje individual en concreto fisurado, N_a , el cual por norma no debe exceder la siguiente ecuación:

$$N_a = \lambda_a \tau \pi d_a h_e f \quad (2.5)$$

Donde λ_a corresponde a 1 para cementos denominados de peso normal y la falla que se espere del anclaje sea por adherencia. Se hace una distinción para la tensión de corte τ en donde esta puede tomar un valor para los casos de hormigones fisurados τ_{cr} y los casos de hormigones no fisurados τ_{uocr} . Este valor para los casos sin agrietamientos tiene un valor 7.0 MPa y para el caso contrario se escoge un valor máximo de 21 MPa. por último, d_a corresponde al diámetro del empotramiento y $h_e f$ a la profundidad del mismo.[7]

2.3. Distribución de tensiones para una barra empotrada

La norma ASTM (D4435-84, 1998) estandariza el ensayo de tipo “pull-out” en roca, dicho ensayo se aplica a pernos adheridos a la roca mediante cemento, resina, entre otros; su objetivo es medir la resistencia contra la deformación y la resistencia última del perno anclado.

La innovación de este estudio con respecto a los anteriores fue comparar los resultados del ensayo de adherencia con concreto de distintas resistencias. De acuerdo con las disposiciones de publicaciones anteriores, (Comité EuroInternational du Beton Rile, 1983) la tensión por adherencia se puede calcular de la siguiente manera:

2.3.1. Distribución teórica

El comité CEB 151 (1982)[8] prescribe que en barras deformadas su tensión $\theta(x)$ es transferida al concreto a través de sus nervaduras llamadas usualmente como resaltes. La componente radial de tensiones que toman los resaltes, que se generan al rededor del hormigón aumenta con la tensión de corte de la viga.

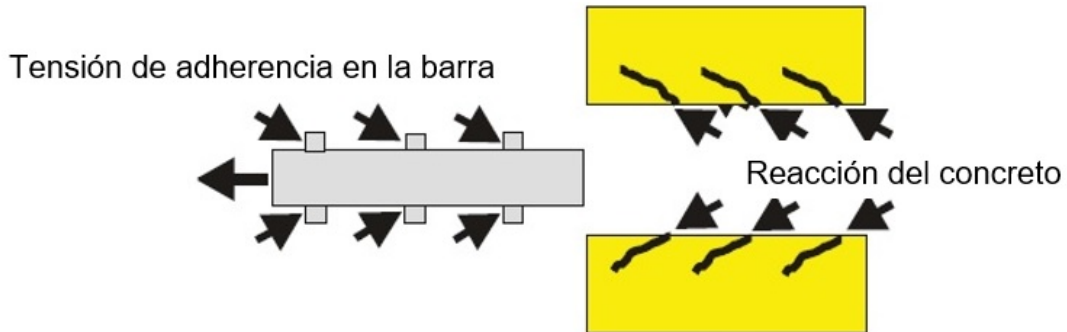


Figura 2.2: Reacción y tensión de adherencia en la viga

El parámetro de tensión que se transmite longitudinalmente tiene como resultante una fuerza inclinada en un ángulo α , como se muestra en la figura 2.3.

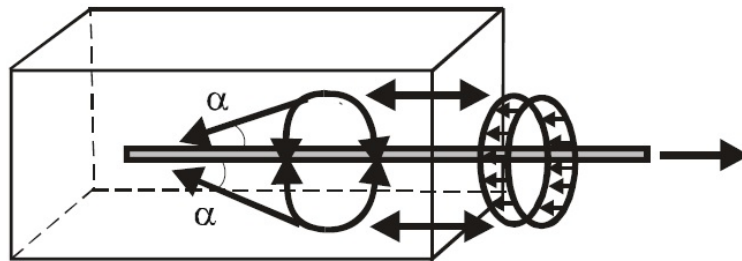


Figura 2.3: distribución gráfica de tensiones y el ángulo de la resultante α

El CEB (1997) provee una formula para calcular la tensión de adherencia tal como se muestra en la figura 2.4. La curva muestra el desarrollo de las tensiones versus el deslizamiento $s(x)$, que se define como el movimiento relativo entre la barra y el bloque de hormigón en donde se encuentra empotrada. Por lo tanto, se necesita medir de manera externa no solamente la extensión de la barra, si no además, desplazamiento resultante de la vara de acero respecto la probeta.

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad 0 \leq s \leq s_1 \quad (2.6)$$

Donde:

τ = Tensión de adherencia.

s = deslizamiento relativo.

$$\tau = \tau_{max} \quad s_1 \leq s \leq s_2 \quad (2.7)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_u) \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right) \quad s_2 \leq s \leq s_3 \quad (2.8)$$

$$\tau = \tau_u \quad s_3 \leq s \quad (2.9)$$

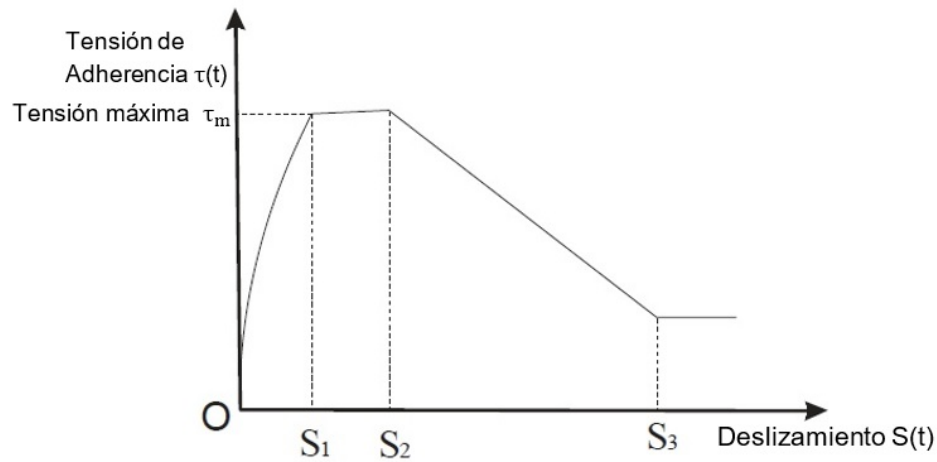


Figura 2.4: Tensión de adherencia vs. deslizamiento

Tabla 2.1: Parámetro Ceb para barras de adherencia

Parámetro	Hormigón no confinado		Hormigón confinado	
	Condición adherencia		Condición adherencia	
	Buena	Otras	Buena	Otras
s_1	0.6 mm	0.6 mm	1.0 mm	
s_2	0.6 mm	0.6 mm	3.0 mm	
s_3	1.0 mm	2.5 mm	espacio entre resaltes	
α	0.4		0.4	
τ_{max}	$2,0f_c^{1/2}$	$1,0f_c^{1/2}$	$2,5f_c^{1/2}$	$1,25f_c^{1/2}$
τ_u	$0,15\tau_{max}$		$0,40\tau_{max}$	

2.4. Mecanismos de corrosión

Las causas y mecanismos de corrosión de barras de refuerzo en el concreto se describen en términos de problemas en la prácticas así como también en la electroquímica propia de los materiales. Los parámetros que afectan a la corrosión son en primer lugar, el ingreso de elementos agresivos, como los cloruros, que degradan la película protectora en la barra y en segunda instancia la cantidad de aquellos elementos necesarios para hacerlo. El primero se encuentra controlado por las propiedades del hormigón, pero en el largo plazo el comportamiento de la corrosión queda condicionado a ambientales tales como deshielos o bordes costeros, además de las propiedades de las barras.

La influencia de los componentes cementosos del hormigón, la relación agua/cemento y la presencia de grietas en la cubierta afectan a la manera en que agentes corrosivos, tales como sales, se introducen dentro de los elementos reforzados con acero recubiertos con concreto. Al respecto de esta relación que tiene el hormigón y las barras de refuerzo existen estudios que explican el impacto de estas características[9].

La corrosión es una de las principales causas de la durabilidad limitada del hormigón armado. El producto de la corrosión, el óxido, reside en la interfaz entre las barras de refuerzo de acero y el concreto, degradando así la unión entre la barra de refuerzo de acero y el concreto. Sin embargo, el óxido que se adhiere bien al acero subyacente ayuda a la unión entre el acero y el concreto. Además, el tratamiento superficial del acero con agua para formar un revestimiento, antes de la incorporación del acero en el hormigón, aumenta la resistencia de la unión. Además, la resistividad eléctrica de contacto entre la barra de acero y el hormigón aumenta con la resistencia de la unión, lo que sugiere que la fase interfacial (óxido o una similar a la corrosión) ayuda al enlace.

Se descubrió que la corrosión de las barras de refuerzo de acero en concreto inmerso en una solución saturada de Ca (OH) causa inicialmente que la resistencia de la unión aumente mientras aumenta la resistividad de contacto (adherencia). Este comportamiento persistió hasta 5 semanas de corrosión. La corrosión adicional, más allá de 5 semanas, provocó que la fuerza de unión disminuyera mientras la resistividad de contacto continuaba aumentando. Esto significa que una ligera corrosión (<5 semanas) aumentó la resistencia de la unión, mientras que la corrosión severa (>5 semanas) disminuyó la resistencia de la unión [10].

2.5. Experiencias de corrosión acelerada

Existen diversas publicaciones que han desarrollado metodologías para inducir una corrosión dentro de elementos de hormigón armado. Se pueden encontrar experiencias desde ensayos a tiempo real en donde las probetas se pueden ver expuestas a periodos de meses, como también ensayos electroquímicos acelerados donde se sumerge un espécimen dentro de una solución acuosa salina para lograr resultados en cuestión de días.

Como es el caso del estudio publicado por Director Xianglin Gu de la universidad Tongji [11]. En dicha publicación se utilizaron elementos tipo losa de 600x200x60 mm con 3 diámetros de barras: de 10 mm, 14 mm y 16 mm. Luego de los procesos correspondientes de curado del hormigón las probetas fueran dispuestas en cámaras de simulación de ambientes salinos con periodos que iban de las 5 a las 10 semanas de almacenaje. Durante ese tiempo las probetas eran rociadas con una concentración de clorhidrato de sodio de 50 g/L, para luego ser dispuestas dentro de otra cámara con niveles de humedad controlada de un 85 % a 25C por periodos que fueron de las 12 hasta las 24 semanas.

Otro estudio que aporta una metodología para el ensayo de corrosión acelerada que corresponde al publicado el año 2005 por Y. Du, L. Clark y A. Chan titulado Residual capacity of corroded reinforcing bars [1]. En donde se utilizaron cilindros de hormigón de 50 mm de diámetro y 300 mm de largo, con una barra de acero de 16 mm de diámetro y 450 mm de largo colocada en el centro de la probeta. El mecanismo de corrosión que se utilizó en este estudio fue de tipo electro químico en donde la probeta se sumergió en una solución de clorhidrato de sodio que vario del 3 al 5 %.

2.5.1. Montajes experimentales

Para este estudio experimental se ha propuesto generar una metodología para los ensayos de corrosión acelerada que permita de usar de la mejor manera la indumentaria y los espacios

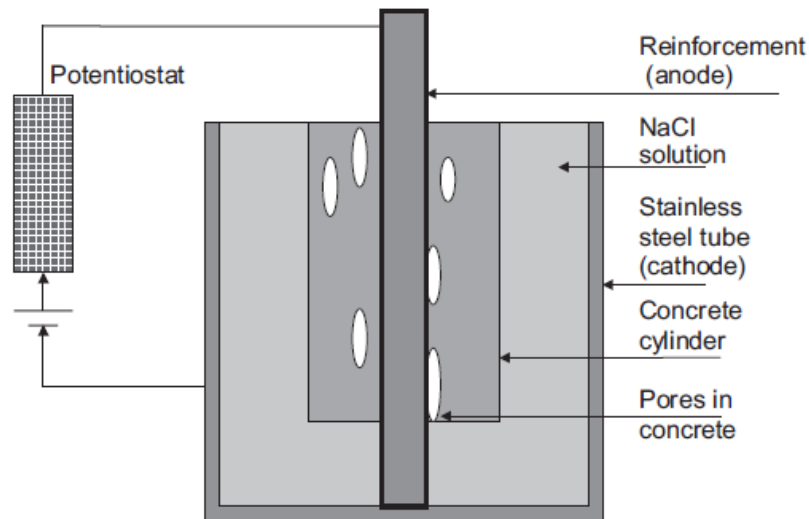


Figura 2.5: Esquema de metodología [1]

disponibles. A modo de resumen se presentan, en la tabla 2.2, los datos de densidades de corrientes, tiempo y pérdida de masa registrados en diversos estudios reunidos.

Tabla 2.2: Resumen de parámetros de ensayos similares

Autor	Densidad de corriente [mA/cm ²]	Tiempo [días]	Perdida de masa [%]
Y. G. Du[12]	2	7	5
	2	28	20
M. Kashani[13]	1.1	28	10
	1.1	56	35
M. Kashani[14]	2.4	5	6.5
	2.4	14	10.5
	1.1	30	19.1
	1.1	38	26.5
	1.1	50	32
Y. G. Du [1]	1	7	5
	1	28	25

Además, de las variables mencionadas anteriormente existen diferentes configuraciones de probetas que han sido puestas a procesos de corrosión electroquímica. En específico se trata la diferencia en calidades de hormigón y recubrimientos. Se conoce por normativa que dichas variables son cruciales al momento de defender las estructuras de ambientes corrosivos. Por lo tanto, Dichas diferencias recaen en no poder predecir de manera unánime el comportamiento de una metodología en particular.

2.5.2. Penetración del agua

Una condición inicial de la experiencia es poder suponer un comportamiento del agua en la probeta. la interacción de la barra cargada en su manto en conjunto el agua produce los efectos de corrosión química en la superficie de la barra. Para poder iniciar la fuente de poder que suministre los amperes a las vigas se debe poner en funcionamiento dentro de un plazo que el agua haya penetrado lo suficiente la superficie de las barras. Es por esto, que la profundidad de penetración del agua y la porosidad de la capa superficial del hormigón son variable de considerable importancia, especialmente en relación con el espesor de la cubierta de hormigón.

Por un tema conceptual se deben distinguir dos fenómenos: permeabilidad y penetración: permeabilidad Se relaciona con el paso de un fluido a través de un material saturado bajo la acción de un diferencial de presión; La penetración está vinculada al movimiento de la humedad a un material debido a fuerzas de succión.

En publicaciones se puede encontrar una relación entre la acumulación del volumen absorbido i por unidad de área de la superficie de entrada y la raíz cuadrada del tiempo transcurrido t . Esto podría ser escrito como:

$$i = A + S\sqrt{t} \quad (2.10)$$

Donde S es la sortividad del material y A es una constante, los datos experimentales muestran con frecuencia un pequeña interceptación en $t = 0$. El término S se define como una medida de la capacidad del medio para absorber o expulsar el líquido por capilaridad. Los valores de S se encuentran en el rango de $0.7-3.72 \text{ mm}/\sqrt{h}$ para muestras de concreto curadas en húmedo durante 10 días y luego se acondiciona a $40 \bullet \text{C}$ antes de la prueba.

De la misma manera, W. J. McCarter [15] resume de diversos textos sobre el tema una relación para la profundidad de ingreso del agua en hormigón. La penetración d tiene una raíz cuadrada en relación con el tiempo, y está representada por la siguiente ecuación:

$$d = d_0 + S_0\sqrt{t} \quad (2.11)$$

donde d_0 es una condición de borde y S_0 es el water sorptivity para el caso de penetración. Esta no es la misma S_0 que la dada por ecuación 2.10. Los valores de S_0 de la ecuación 2.11 son extraídos de diferentes experiencias de investigación sobre la penetración de agua, mientras que los valores de S de la ecuación 2.10 se derivan de datos sobre el volumen de agua absorbido acumulado en probetas de concreto. Los valores de S_0 se han determinado sobre las primeras 24 horas de absorción. Los rangos típicamente se encuentran desde $3.0 \text{ mm}/\sqrt{h}$ a $25.0 \text{ mm}/\sqrt{h}$, la resistencia a la compresión a los 28 días de curado va de los 23-42MPa, para esos datos.

Capítulo 3

ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1. Condiciones de los ensayos

En el primer caso, los ensayos de adherencia se idearon pensando en el equipamiento disponible en el laboratorio del departamento de ingeniería civil de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la universidad de Chile. Dicho departamento cuenta con una máquina universal Instron 8802. Este es un sistema de prueba servohidráulico de alta resistencia, para pruebas de fatiga de 250 kN que es utilizada tanto como para ensayos estáticos como dinámicos, con cargas cíclicas y monotónicas.

Además, se cuenta con una mordaza especial diseñada para probar adherencia, fabricada anteriormente por el memorista Sebastian Olea para sus ensayos de barras de fibra de vidrio [16]. Para diseñar esta mordaza se modelaron distintos espesores de plancha de acuerdo a la resistencia última de las barras de acero, que corresponde a las 18 toneladas. Con la plancha de 16 milímetros se obtuvieron deformaciones menores de medio milímetro en la zona más solicitada. El acero usado fue ASTM 36.

3.2. Barras de acero

Las barras de acero que se utilizaron corresponden a unas barras de refuerzo Gerdau para hormigón armado del tipo A630-420H, elementos de sección circular, con nervios longitudinales y nervios inclinados respecto a su eje. Acorde a los expuesto más adelante en la tabla 3.7 y 3.8.

Tabla 3.1: Características nominales de las barras de acero de refuerzo

Características nominales			
Diámetro <i>mm</i>	Masa <i>kg/m</i>	Sección <i>mm²</i>	Perímetro <i>cm</i>
10	0,617	0,785	3,14
16	1,58	2,01	5,03

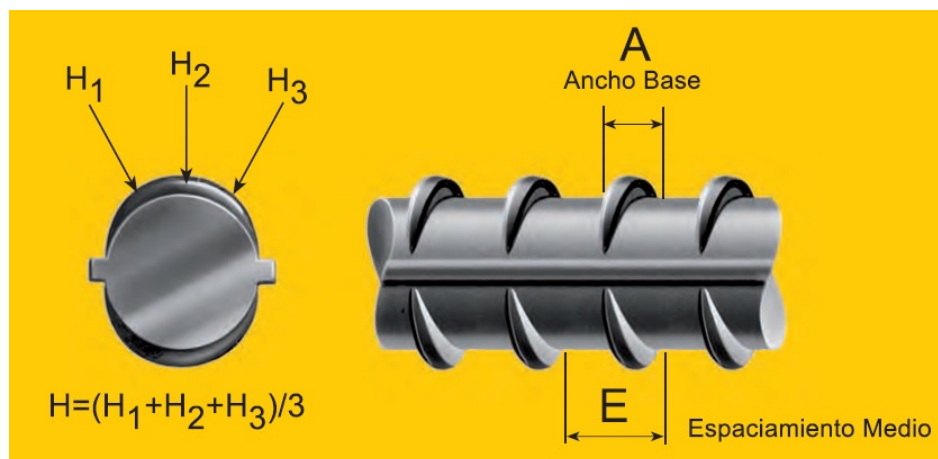


Figura 3.1: Barra tipo y características generales

De acuerdo a lo que entrega el proveedor, en la tabla 3.2 se especifican los valores de las características generales de las barras de 10 y 16 mm que se utilizan en este estudio. Estos requisitos que deben cumplir las barras se encuentran estandarizados en la Nch204.Of2006 Acero - barras laminadas en caliente para hormigón armado.

Tabla 3.2: Características de los resaltes

Barra	Dimensiones de los resaltes		
	Espaciamientos medios máximo <i>mm</i>	Altura media mínima <i>mm</i>	Ancho base máximo <i>mm</i>
10	7	0,4	2,5
16	11,2	0,64	4

3.3. Productos anticorrosivos

3.3.1. MCI Coating for Rebar

Uno de los productos puestos a prueba en ambos ensayos corresponde a la pintura Migrating Corrosion Inhibitors (MCI[®]) Coating for Rebar, de la empresa Cortec[®]. Esta pintura anticorrosiva creada en base a agua se utiliza para otorgar una protección frente al óxido de las barras dentro de su periodo de almacenaje y además, no necesita ser removida, según el fabricante esta pintura otorgaría una resistencia, frente a la corrosión, a los elementos de hormigón estructural reforzados. Estos ensayos quedan identificados con el código AD10M y AD16M para el caso de los ensayos de adherencia. Para la corrosión acelerada se encuentran identificadas las probetas como las CA10M Y CA16M.



Figura 3.2: Imagen referencial de barras con pintura MCI

El fabricante aporta a través de un catálogo algunos datos sobre los materiales que componen la pintura, su forma uso y el tiempo de protección que otorga. El grosor de la película seca recomendado es de 25-50 micras (0.025-0.05 mm). La protección para almacenaje en interiores puede ser considerada en un largo plazo (hasta 5 años) y de corto a medio plazo (6-24 meses) sin protección a los efectos de erosión en los patios de que se encuentren en el exterior.[17]

Como primera acción se procede a limpiar la superficie de las barras de otros residuos para aplicar una capa del producto. Esto se lleva a cabo utilizando una escobilla de acero inoxidable de alambres de 0.35 mm que eliminan astillas e impurezas de la superficie de las barras, además con un paño se quita el la suciedad restante. El producto se muestra como un líquido viscoso de color beige que tiene un secado aproximado de 30 minutos. En la figura 3.3 se puede ver la progresión de secado del material, donde las barras de la izquierda se encuentran ya secas y el producto toma un color transparente con tonalidades verde opaco.



Figura 3.3: Barras de corrosión acelerada (CA) y adherencia (AD), pintadas con MCI

El principio químico que se utiliza por este producto se basa en su composición química de amino-carboxilo, que es una de las formas más eficaces para proteger barras que funcionan como cátodo y ánodo simultáneamente. Esto se produce debido a que estos compuesto crean una película de aminoácidos al rededor de la barra que se ordenan de tal manera que en el interior (interfaz película-barra) tienen una característica hidrofílica, en cambio por fuera queda su parte hidrofóbica que evita el ingreso del agua a la barra y así previene los efectos corrosivos. Adicionalmente, Beza Bavarian y Lisa Reiner publicaron un estudio donde se expone que el inhibidor migra a través de la estructura capilar de hormigón, primero por difusión líquida a través de la humedad que normalmente está presente en hormigón, luego por su alta presión de vapor donde, finalmente, siguiendo líneas y microgrietas. El proceso de difusión requiere tiempo para llegar a la superficie de la barra de refuerzo y formar una capa protectora. Este tiempo no aparece especificado dentro del estudio.[17]

3.3.2. Pintura anticorrosiva de maestranza

Esta pintura corresponde a un Anticorrosivo de Maestranza elaborado por la empresa SOQUINA[®]. Este producto formulado en base a resinas alquídicas modificadas y pigmentos orgánicos e inorgánicos que le dan a la película un color negro. Se emplea para proteger estructuras metálicas, como rejas, defensas y muebles. El fabricante limita su uso para ambientes poco agresivos.

Las resinas alquídicas son un poliéster cuya cadena principal se encuentra modificada con moléculas de ácidos grasos que al igual que los aminoácidos actúan como una barrera hidrofílica. La diferencia es la adherencia que se logra a las superficies metálicas. Estas pinturas tienen un buen comportamiento protector para barras de acero tanto en ambientes urbanos como marinos.[18]

Para su uso se debe tener una superficie metálica limpia, libre de aceites, focos de corrosión, polvo y suciedad. Se deben esperar por lo menos 24 horas para aplicar una segunda capa y su fabricantes se refiere a un tiempo de 7 días en su secado final.



Figura 3.4: Barras de CA, pintadas con anticorrosivo de maestranza

3.4. Caracterización del hormigón

3.4.1. Cemento

El cemento utilizado para la confección de las probetas de ambos ensayos según la norma NCh148.of68 y corresponden a un Clase Portland Puzolánico, Grado Alta Resistencia. El producto es comercializado por cementos Melón y lleva por nombre Melón Extra. Este producto está formulado a base de clinker, puzolana y yeso en un proceso de molienda conjunta.

3.4.2. Áridos

Los áridos juegan un papel importante en el hormigón a través de su granulometría y su resistencia. Las propiedades químicas también tienen efectos sobre la degradación y corrosión del hormigón y su enfierradura. En la tabla3.3 se indican los valores porcentuales del tamaño de los granos que componen los áridos utilizados en este estudio.

Tabla 3.3: Granulometría áridos para ensayos de corrosión acelerada y adherencia.

ASTM	Serie nominal mm	Gravilla	Arena gruesa	Arena fina
2'	50			
1 1/2'	37.5			
1'	25	100		
3/4'	19	90		
1/2'	12.5	50		
3/8'	9.5	23	100	100
4	4.75	1	94	93
8	2.36		63	85
16	1.18		41	75
30	0.6		27	60
50	0.3		16	33
100	0.15		9	12

La tabla3.4 indica los valores de las características físicas de áridos que cumplen lo establecido según la norma NCh163:2013 en donde se establecen los ensayos correspondientes para obtener dichos valores de aceptación.[19]

Tabla 3.4: Características físicas

Características	Gravilla	Arena gruesa	Arena fina
Tamaño máx. nominal mm	19	4.75	4.75
Módulo de finura	6.86	3.34	2.15
Finos bajo malla 0.080 %	0.7	5.1	4.3
Densidad real Seca kg/m ³	2.669	2.609	2.551
Densidad real SSS kg/m ³	2.701	2.662	2.59
Densidad neta kg/m ³	2.756	2.757	2.654
Absorción %	1.2	2.1	1.5
Materia Orgánica	-	Más clara	Más clara
Vidrio color patrón N		1	1
Interpretación		np	np
Chancado %	72	-	-
Rodado %	28	-	-
Laja %	0	-	-

3.4.3. Dosificación

El hormigón que se utilizó fue pensado en base a los requisitos mínimos que presenta la NCh170.[20] En dicho documento se encuentran los requisitos de durabilidad debido a exposición a agentes externos. En la motivación de este trabajo se analizan los efectos de ataques externos que provocan corrosión y a partir de esto utilizar una mezcla que se considere suficiente.

Tabla 3.5: Grados de exposición que provocan corrosión

Grado		Agente externo	Exposición en condiciones de servicio
C0	no agresivo	No aplica	Hormigón seco o protegido de la humedad ambiental
C1	leve	CO ₂	Hormigón húmedo expuesto a altas concentraciones de CO ₂
C2-A	moderado	Cloruro	Hormigón sumergido completamente en agua que contiene cloruro
C2-B	severo	Cloruro	Hormigón húmedo expuesto aire salino
C2-C	muy severo	Cloruro	Hormigón húmedo expuesto a ciclos de humedad y a una fuente externa de cloruro proveniente de productos descongelantes, sal salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen

Los materiales utilizados y la dosificación para la preparación de la mezcla de hormigón se encuentran expuestos en la tabla 3.6. Dentro de los laboratorios de IDIEM se realizaron dos ensayos de compresión a unas muestras apartadas de la fabricación de probetas que arrojaron una resistencia a la compresión en probeta cilíndrica de 11.7 cm igual a de 362.09 kgf/cm^2 lo que corresponde a 35.5 Mpa, con lo que los hormigones estarían cumpliendo con el requisito normativo para hormigones expuestos a ambientes corrosivos severos.[20]

Tabla 3.6: Dosificación para probetas de corrosión acelerada y adherencia

Materiales	Cantidades (kg)
Cemento	300
Gravilla	820
Arena gruesa	868
Arena fina	191
Agua Libre	195
A/C	0.65

3.5. Probetas de hormigón armado

Se utilizaron dos probetas comprendiendo los elementos disponibles para la metodología de ensayo. En el primer caso, las probetas de adherencia se confeccionaron pensando en el equipamiento disponible en el laboratorio del departamento de ingeniería civil de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la universidad de Chile.

3.5.1. Probetas de adherencia

Las probetas de adherencia se componen de dos secciones principalmente, una parte cubica de 22x22x22 cm. Compuesta de hormigón con las especificaciones que se exponen en este mismo capítulo. Además, este cubo de hormigón lleva empotrada una barra de acero de un largo de 100 cm en su centro que se encuentra embebida 22 cm, con un largo libre por sobre el hormigón de 68 cm.

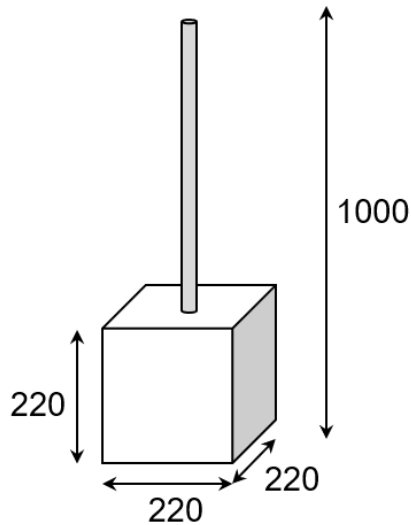


Figura 3.5: Probeta de adherencia

Las dimensiones de esta probeta se encuentran dadas por el tamaño de la mordaza que sujeta la sección cubica. En los ensayos anteriores realizados, con el mismo equipamiento, surgió un problema de confinamiento y de porte entre la probeta y la mordaza de acero[16]. Este problema se debió a que al utilizar una probeta de 20x20x20 cm queda un espacio entre el hormigón y la mordaza de acero que tiene dimensiones internas 2 cm mayores en cada dimension. Esto provocó un golpe inicial a la muestra que en algunos caso llevó a una falla instantánea del ensayo. Es por esto mismo, que se busca que cada probeta tenga un calce preciso con la mordaza, para no generar dicha ruptura.

3.5.2. Probetas de corrosión

Los ensayos de corrosión acelerada pasaron por una fase de diseño donde se barajaron dos principales opciones basada en la literatura especializada en este tipo de experimentos. Diversos factores influenciaron la decisión de la mejor alternativa, pero los dos más importantes tuvieron que ver con el espacio disponible y la contención del agua por evaporación.

Paralelamente a este estudio, el personal del laboratorio de ensayos de ingeniería civil de la Universidad de los Andes se encuentra estudiando el comportamiento de barras de acero sometidas a corrosión electro inducida. Para ello se utilizan contenedores de policloruro de vinilo (PVC) confeccionados de manera manual para poder contener una barra de acero de refuerzo cumpliendo la función de ánodo y una barra de acero inoxidable que cumple la función de cátodo en el proceso de electrolisis.

Alternativa 1

Como primera alternativa se consideró el diseño de una probeta con forma de prisma rectangular que llevase las barras de refuerzo colocadas como una armadura superior en una viga armada. Cada espécimen incluía una barra de acero inoxidable que pudiese funcionar como cátodo al momento de generar la acción corrosiva acelerada.

Para contener estas probetas debido a su forma era necesario habilitar un espacio donde estas se pudiesen encontrar de manera horizontal y el cableado no estuviese directamente en contacto con el agua para que el circuito fuese cerrado manera entre el cátodo y el ánodo de barras de refuerzo. Para lograr se pensó en una piscina con el suficiente volumen para sumergir completamente las probetas.

Finalmente, esta alternativa tuvo que ser descartada, ya que en el laboratorio no se encuentra el suficiente espacio para poder colocar dicho estanque que albergue todas las probetas. Por otro lado, si la piscina no se encuentra en condiciones de humedad y temperatura controlada se pueden tener perdidas grandes de agua debido a la evaporación.

Alternativa 2

La segunda alternativa que se diseñó fueron contenedores individuales de probetas. Las probetas de corrosión corresponden a elementos cilíndricos de 117 mm de diámetro compuestos de hormigón armado con enfierradura colocada de manera longitudinal. El largo de la probetas se compone de una sección de hormigón de 300 mm, que incluye 3 barras de acero y una barra de Acero inoxidable. Dichas barras cuentan con un largo excedente de 100 mm a cada lado de la probeta, lo que entrega un largo final de 500 mm para cada elemento a ensayar.

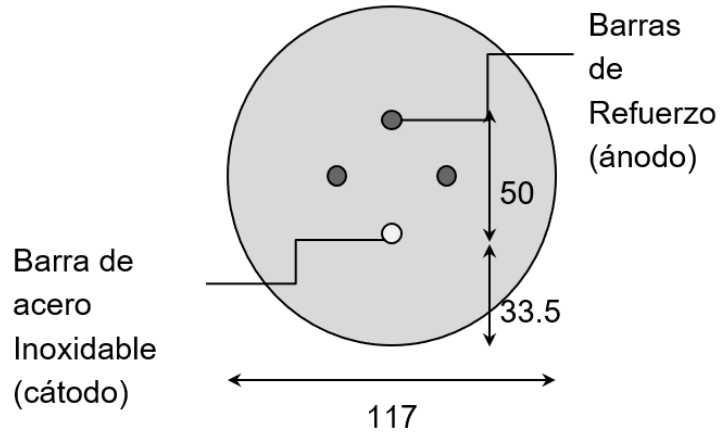


Figura 3.6: Corte transversal probeta corrosión

3.5.3. Fabricación de las probetas

Para la confección de la mezcla de hormigón que se utilizó en este estudio se contó con el apoyo de IDIEM Y de su laboratorio de hormigones de prueba. El laboratorio cuenta con una mezcladora de una capacidad de utilización aproximada de 100 litros; pesas calibradas para medir la cantidad de material y la densidad seca y húmeda de los áridos; una mesa vibradora que elimina el exceso de aire que se acumula en las probetas, además de un vibrador manual para los casos donde la probeta fuese muy difícil de transportar hacia la mesa. Las instalaciones cuentan con un cuarto de curado que mantiene una humedad controlada de un 80 % para el mejor fraguado de las probetas.

Se realizó el curado respectivo de 28 días para alcanzar características del hormigón en cada probeta.

Fabricación probetas para adherencia

Para las probetas de adherencia se confeccionaron moldes cúbicos con un volumen interno de 220x220x220 tal como se muestra en la figura 3.7. El material que se seleccionó para la confección de las probetas fueron tableros de fibra (MDF) de madera, recubierto por ambas caras con melamina blanca (láminas impregnadas con resinas melamínicas). Este recubrimiento le otorga una superficie totalmente cerrada y libre de poros, lo cual ayuda a evitar que el hormigón exuda agua a través de la madera durante el proceso de fraguado.



Figura 3.7: Moldes para probetas de adherencia

Los materiales y moldes para las probetas de adherencia fueron transportadas de su lugar de confección al laboratorio de hormigones de IDIEM en la figura3.8. Todas las probetas de adherencia fueron hechas en dos series de hormigonado para poder asegurar una mejor uniformidad en la mezcla de cada espécimen. Cada uno de los especímenes utiliza de manera individual 10.65 Litros de mezcla y un total de 191.66 Litros para las 18 probetas. La betonera utilizada en IDIEM tiene una capacidad de funcionamiento de 100 Litros donde se asegura un buen amalgamado de los materiales.



Figura 3.8: Transporte de materiales y moldes de probetas de adherencia

Cada una de estas probetas fueron hormigonadas dentro de la cámara de curado para evitar tener que movilizar cada una de ellas para su fraguado tal cual como se muestra en la figura 3.9. Para evitar la acumulación de burbujas se utilizó un vibrador inalámbrico de 25 mm . La forma de vibrado de cada una de las probetas consistió en introducir en las cuatro esquinas del cubo de hormigón manteniéndose aproximadamente 1 minuto hasta que dejen de aflorar burbujas y se forme una capa de lechada en la superficie.



Figura 3.9: hormigonado de probetas

Fabricación probetas de corrosión

Los moldes para el hormigonado de las probetas de corrosión se extrajeron de una tubería hidráulica de PVC de 125 mm de diámetro. Cada molde se cortó de un largo 32.4 cm y fueron niveladas con esmeril angular para asegurar el paralelismo de sus caras. Las correspondientes tapas plásticas que existen para este tipo de tubería no aseguraban un buen acabado, ya que acumulaban espacio dentro del molde difícil de rellenar una vez puesta. Es por esto que se optó por la fabricación manual de una tapa de madera que se ajustara de mejor manera.



Figura 3.10: Moldes de corrosión acelerada (CA)

Las tapas de los moldes fueron fabricadas a partir de una plancha de 12 mm de grosor de pino radiata (llamado usualmente como terciado estructural). Luego de ser marcados y trazados los círculos se cortaron con una sierra de vaivén eléctrica (caladora), que otorga el acabado necesario para sellar los moldes. Un paso adicional que es necesario remarcar es el uso de un taladro de pedestal para realizar las perforaciones en las tapas. el punto anterior fue necesario de realizar para asegurar que las barras se mantuvieran paralelas entre ellas y el molde. Con esto se evita que un factor de forma influya de manera significativa en la penetración del agua durante el ensayo.



(1) Perforado de tapas CA



(2) Tapas de moldes de CA

Figura 3.11: Fabricación tapas de molde de corrosión acelerada

Cada una de las probetas utiliza nominalmente 3.98 litros de hormigón. En total se utilizaron para los 12 especímenes 47.78 litros de mezcla, los cuales fueron confeccionados dentro de una sola serie. El vibrado de las probetas se realizó durante 1 minuto sobre una mesa de vibrado de las dependencias de IDIEM, este proceso se realizó de manera particular para cada uno de los especímenes.



(1) hormigonado de las probetas



(2) Probetas en la cámara de curado



(3) Probetas de adherencia (EA)

Figura 3.12: Fabricación probeta de prueba de adherencia y probetas de corrosión

Fabricación recipientes probetas de corrosión

Para ensayar las probetas se fabricaron recipientes a partir de tuberías para drenaje sanitario gris con un diámetro exterior de 160 mm. Estos tubos fueron cortados cada 500 mm y tapados en uno de sus extremos por una tapa sanitaria para la medida de 160 mm.

Se sugieren dos formas de realizar el ensayo. En la alternativa 1 representado en la figura 3.13 se puede ver una probeta que queda totalmente sumergida. Para ambos casos el ingreso de agua se hace por la parte superior del recipiente, pero la conexión eléctrica se realiza por la parte superior de la probeta. En la segunda alternativa se maneja la posibilidad de

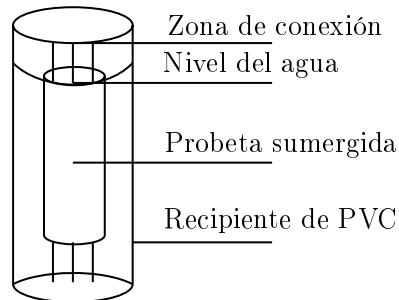


Figura 3.13: Alternativa 1 montaje recipiente de corrosión

perforar la tapa inferior y pasar a través de los orificios las barras. Con esto la conexión de la probeta se puede realizar en la parte inferior de la probeta. Para esto adicionalmente se crea un pedestal con el mismo material de tubería gris. El problema que surge con esta alternativa es la forma de evitar filtraciones de agua en la probeta. Una eventual fuga de agua podría hacer mucho más dificultoso el ensayo en el nivel de agua que mantienen las probetas y en la concentración salina que se está manejando en el ensayo

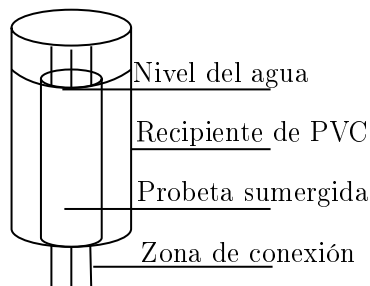


Figura 3.14: Alternativa 2 montaje recipiente de corrosión

Al hacer un ensayo previo de ambas alternativas se determino que la alternativa 1 es inviable ya que la corrosión se concentra en los lugares de la probeta que se encuentren más expuestos (sector sin hormigón). Además, se produce un corte de las barras en la zona de conexión debido a la humedad. Al revisar el interior de la probeta las barras no mostraron signos de corrosión, por lo tanto se descarta de plano la alternativa. Por otro lado, la alternativa 2 se construyó pasando los fierros por la tapa y luego sellando cualquier fuga con silicona. El problema que surge es que la silicona al paso de los días colapsa como sellador.

Como solución al problema de filtraciones se ideó un sistema de armado de contenedores usando anillos circulares de goma (O-rings) tal cual como se muestra en la figura 3.12. Estos anillos se colocan en la barra de tal manera que la tapa quede sellada por ambos lados.



(1) Probeta asentada



(2) O-rings interiores



(3) Sellado O-rings



(4) Sellado probeta



(5) Tapa Sanitaria



(6) O-rings exteriores sellados



(7) Repaso de sellado



(8) Tubería Lijada

Figura 3.12: Construcción recipientes para corrosión acelerada

3.6. Metodología de los ensayos

Los ensayos se realizaron principalmente entre 2 instalaciones. Por un lado el laboratorio de dinámica de estructuras de la facultad de ciencias físicas y matemáticas donde se transcurrieron los ensayos de adherencia de la Universidad de Chile. Además, se trabajó con la colaboración del laboratorio de ingeniería civil de la universidad de los Andes para la confección de las probetas de corrosión acelerada.

3.6.1. Metodología de los ensayos de adherencia

Montaje experimental

Una vez que las probetas de hormigón cúbicas cumplieron su curado en las dependencias de IDIEM dentro de su cámara de humedad controlada durante 28 días, éstas fueron desmoldadas y guardadas con envoltura plástica para contener su humedad.

En primer lugar es necesario montar la mordaza cúbica de acero que empuja la probeta. Para ello la máquina universal debe tener un juego de muelas en su base de por lo menos 26 mm para generar un buen agarre de la mordaza. Además, en el otro extremo de la máquina se debe colocar otro juego de muelas con la menor holgura para sostener de buena forma la barra de acero de la probeta tal como se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.13: Esquema de los ensayos de adherencia.

La mordaza a utilizar fue construida por una maestranza especializada y se encuentra en el laboratorio de dinámica de estructuras. La mordaza de las probetas cubicas de adherencia se fabricó a partir de una plancha de acero de 16 milímetros de espesor que corresponde a la figura3.14. El acero usado fue ASTM36.



Figura 3.14: Mordaza de acero.

Una vez que la máquina universal se encuentra configurada se debe colocar las cámaras fotográficas en modo manual para poder ajustar los parámetros básicos de exposición, apertura, velocidad e ISO. Las cámaras utilizadas corresponden a la marca Cannon, modelo Rebel T6. Cada una de estas opciones debe ser chequeada antes de dar inicio al ensayo para asegurar una buena calidad de imagen. En la figura 3.15 se muestra la iluminación y postura de las cámaras fotográficas que harán el registro para la fotometría.

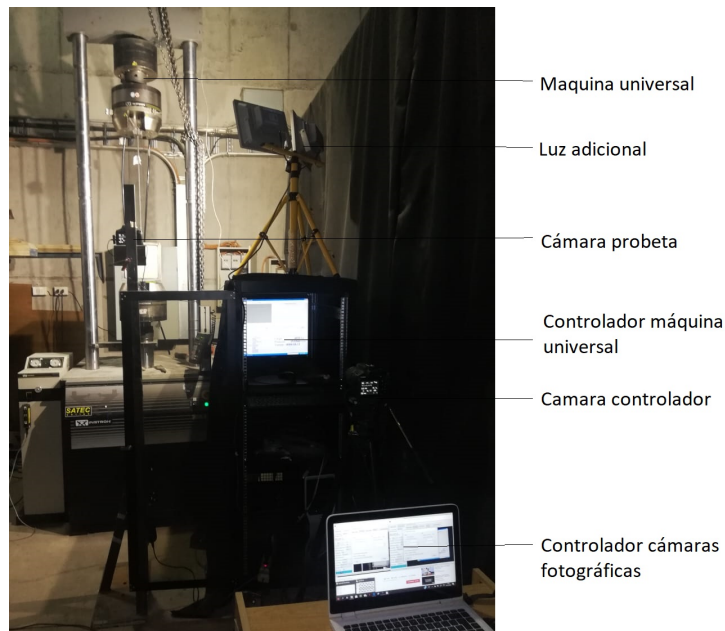


Figura 3.15: Esquema de las cámaras en el ensayo de adherencia

Fotometría para deformaciones

Como ya se explicó en capítulos 2 de antecedentes el comportamiento de las tensiones de adherencia se encuentran ligados a la deformación por arranque que sufra la probeta. Es por esto que se vuelve una necesidad no solamente conocer la deformación total del sistema, sino además como se mueven de manera relativa la pieza de hormigón con la barra anclada. Debido a esto se consideró como una alternativa la utilización de cámaras fotográficas Cannon Rebel T6 que registren el ensayo.

Tomando las consideraciones de calidad de imagen y precisión se tomó la decisión de registrar una secuencia de fotografías y no un vídeo. Para hacer esto se necesita un controlador remoto que permita hacer la secuencia. Un programa que permite esta aplicación y que fue utilizado durante los ensayos fue DSLR Remote pro de la empresa Breeze Systems. La frecuencia de muestreo es una foto cada 5 segundos que es el límite que entrega la cámara.

Para lograr hacer la unión entre las deformaciones y las tensiones entregadas por la máquina, se controla la pantalla de ensayo con otra cámara conectada. En la función "Time Lapse" de DSLR se puede programar una fecha y hora para que ambas cámaras comiencen a disparar las fotografías de manera sincronizada a la hora del computador donde se encuentran conectadas.

Configuración de cámaras fotográficas

La exposición es la barra que aparece con $[-2 -1 0 +1 +2]$ que varia según la marca de la cámara que se utilice. Estos números indican que si la exposición está sobre-expuesta saldrá una foto con mas iluminación que la ideal ($+1 +2$) o sub-expuesta en que la foto saldría oscura ($-2 -1$). El rango ideal para que una foto esté bien expuesta es por el valor (0). Este valor es dependiente de los otros que se explican a continuación, se debe asegurar una exposición lo más cercana al 0.

Modificar la abertura se utiliza para indicar cuantos abrimos el diafragma, que se indica por valor f. Se define que a menor numero f de apertura más abierto esta el diafragma y más luz dejara pasar, y a mayor numero f de apertura mas cerrado el diafragma y dejara pasar menos luz. Es decir que un diafragma f/1.8 dejara pasar mas luz que un diafragma f/16.

Se debe tener en cuenta que la apertura de diafragma afecta a la profundidad de campo, y con valores alto de f, todo queda más enfocado y mas nítido (en el fondo) y por el contrario a f más bajos la apertura es mayor y tendremos menos profundidad de campo, con el cual se consigue el "fondo borroso" en la fotografía. Para las condiciones de este ensayo, las cámaras se colocan cerca de la probeta, es por esto que los valores de f pueden ser más pequeños otorgando más luz a la imagen.

La abertura a su vez se encuentra compensada por la velocidad de disparo o tiempo de exposición. Este es el tiempo que dejara pasar, el obturador, luz al sensor. A más tiempo tiempo de exposición mas luz captara el sensor de la cámara y a menos tiempo menos luz le dará tiempo a captar. Con este parámetro se puede decidir si queremos captar objetos en movimiento.

A pesar que en la fotografía la velocidad con que se realiza el ensayo es lenta, se busca

que la imagen no se vea interrumpida por algún movimiento repentino y por lo tanto, se necesitan tiempos de exposición lo más corto posible. Esto a su vez provoca que menos luz entre en la cámara oscureciendo la imagen y por lo tanto, se debe configurar la velocidad en contraste con la abertura para mantener una buena exposición.

Uno de los últimos parámetros es el ISO. Este corresponde a la sensibilidad de las emulsiones fotográficas adaptada internacionalmente. A mayor ISO el sensor será más sensible a la luz aunque generará ruido en la fotografía (granulado o puntitos en la fotografía). Como aquí se necesita la mayor calidad posible para el análisis de cada imagen es necesario colocar esta opción en su valor más bajo.

Para poder alcanzar una buena imagen para la secuencia en primer lugar se debe establecer fijo el ISO, para luego iterar de manera manual en la mejor combinación entre abertura y velocidad para obtener una exposición adecuada a la luz del laboratorio.

Procesamiento de imágenes

Para procesar los conjuntos de imágenes se utilizó un arreglo en el programa Matlab. Dicho código carga las fotografías y convierte las imágenes en matrices de unos con dimensiones de 3456x5184.

Cada una de las probetas tiene 3 puntos pintados con tiza líquida rosa de la marca Lavoro Art. El código de este color para la programación web HTML se identifica como #FF1493, también se puede encontrar como rosa profundo o rosa fluorescente. Este color fue seleccionado en base a su composición en la escala RGB (Rojo, Verde y Azul) R:255, G:20, B:147. Este color es de fácil identificación respecto a otros colores del laboratorio y permite que el código no mal interprete brillos y tome una mala lectura.

3.6.2. Metodología de los ensayos de corrosión

Como se mencionó anteriormente existen varios tipos de simulación de corrosión en laboratorio. Una de las formas es la introducción deliberada de iones cloruro de manera de romper la capa protectora del acero y comenzar el proceso de corrosión. Otra manera y una de las más cercanas para reproducir valores temporales similares a la real es la humidificación y secado de probetas con agua con contenidos de cloruros de sodio, la cual puede tomar varios meses en causar daños a la enferradura. Por último, tenemos el método de corrosión acelerada donde se usa una corriente impresa para conducir corrosión, la cantidad de pérdida de masa está relacionada con el energía eléctrica consumida una vez que la pasividad ha sido comprometido, y puede ser modelado usando la ley de Faraday.[21]

Para los ensayos de corrosión se aplicó una intensidad de corriente de 2 mA/cm^2 para todas las probetas. Por una cuestión de espacio en los laboratorios de ingeniería de la universidad de los Andes se conectaron las probetas de a dos por fuente de poder. Esto ayudó a acotar los instrumentos necesarios para poder realizar todas las probetas de manera simultánea.

Para poder garantizar que la corriente fuera la misma para las dos probetas conectadas, se debió hacer una conexión en serie de las probetas. Tal como se muestra en la figura 3.16. Debido a los límites de voltaje que se alcanzaba con esta configuración solo era posible

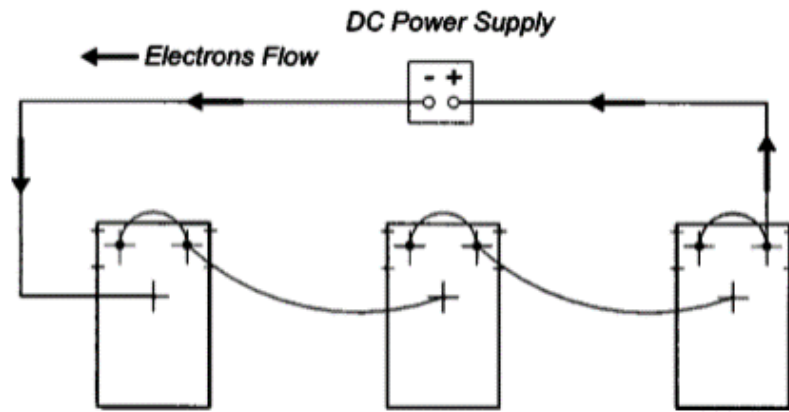


Figura 3.16: conexión en serie de probetas de corrosión

mantener 1 o dos probetas conectadas al mismo aparato.

Tal como se muestra más adelante en la tabla 3.8 un set de probetas fue desconectada ya transcurrido los 28 días de ensayo, con lo que se define el primer nivel de corrosión. El segundo nivel se establece a los 43 días totales de ensayo, se deben desconectar 15 días después del primer grupo de probetas. Estos valores se extrapolaron de las experiencias resumidas de otros autores expuestas en la tabla 2.2 del capítulo 2 de Antecedentes.

3.6.3. Matriz de ensayo

Después de analizar las características disponibles para la realización de ensayos de los productos anti-corrosivo. Se llega a la construcción de la matriz de ensayo que se analiza.

Las variaciones que componen este estudio experimental se dividen en: una variación de dos tipos de diámetro de barra; un tipo de probeta de control donde no se utilice ningún recubrimiento para barras además de la mezcla de hormigón y acero; un tipo de probeta con el producto en cuestión y otro espécimen que tenga sus barras recubiertas con pintura tradicional anticorrosiva.

Para el caso del ensayo de adherencia cada uno de los tipos de probetas tiene 3 replicas para validar los resultados. El código que se utiliza para denominar los grupos de probetas en la tabla 3.7 se compone de un prefijo AD con él llamamos a todos los ensayos de adherencia. El nombre de cada uno de los especímenes también lleva el diámetro de barra y el tipo de recubrimiento que este tiene. La N corresponde a un ensayo natural sin recubrimiento adicional; los ensayos tipo P usan la pintura anticorrosiva de maestranza Soquina y los tipo M corresponden a aquellos que utilizan el otro anti corrosivo MCI coating for Rebar.

Para los ensayo de corrosión se considera a cada barra como el elemento a estudiar, por lo tanto la matriz de ensayo se diseña con una viga de 3 barras para cada tipo recubrimiento.

Al igual que el caso de adherencia el código que se utiliza para denominar los grupos de probetas en la tabla 3.8 se compone de un prefijo que en este caso se escoge como CA, con este llamamos a todos los ensayos de corrosión acelerada. El nombre de cada uno de los

Tabla 3.7: Matriz de ensayos de adherencia

Probetas ensayo de adherencia					
Nombre	Cantidad de probetas	Diámetro de barras [mm]	Sin anticorrosivo	Con anticorrosivo normal	Con anticorrosivo MCI
AD-1	3	10	S/ant.		
AD-2	3	16	S/ant.		
AD-3	3	10		C/ant normal	
AD-4	3	16		C/ant normal	
AD-5	3	10			C/ant MCI
AD-6	3	16			C/ant MCI

especímenes también lleva el diámetro de barra y el tipo de recubrimiento que este tiene. Nuevamente la N corresponde a un ensayo natural sin recubrimiento adicional; los ensayos tipo P usan la pintura anticorrosiva de maestranza Soquina y los tipo M corresponden a aquellos que utilizan el otro anti corrosivo MCI coating for Rebar.

Tabla 3.8: Matriz de ensayos de corrosión

Probetas ensayo de corrosión acelerada y carga cíclica						
Nombre	Cantidad de barras	Diámetro de barras [mm]	Sin anticorrosivo	Con anticorrosivo normal	Con anticorrosivo MCI	Nivel de corrosión [%]
CA-1	3	10	S/ant.			10
CA-2	3	16	S/ant.			10
CA-3	3	10		C/ant normal		10
CA-4	3	16		C/ant normal		10
CA-5	3	10			C/ant MCI	10
CA-6	3	16			C/ant MCI	10
CA-7	3	10	S/ant.			20
CA-8	3	16	S/ant.			20
CA-9	3	10		C/ant normal		20
CA-10	3	16		C/ant normal		20
CA-11	3	10			C/ant MCI	20
CA-12	3	16			C/ant MCI	20

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Ensayos preliminares

La fase preliminar se utilizó para verificar los índices y parámetros que rodean los ensayos. Tal cual como se expuso en el capítulo 3 sobre metodología se realizaron un conjunto de pruebas para contrastar los valores referenciales resumidos de la bibliografía.

4.1.1. Preliminares de adherencia

Se realizó un conjunto completo de la matriz de ensayo que involucra cada uno de los tipos de probetas adherencia de la Tabla 3.7. Para la obtención de los datos la máquina universal fue utilizada en tracción pura con una razón de desplazamiento versus tiempo de 6 mm/min.

4.1.2. Preliminares de corrosión

Para poder verificar la efectividad corrosiva del ensayo se realizaron dos pruebas con plazos de tiempo de 14 y 19 días, respectivamente. Las probetas que se utilizaron son del tipo CA-1, fabricadas de manera adicional. Las dos probetas que se utilizaron de prueba corresponden a la alternativas de armado de probetas de corrosión vistas en el capítulo 3, en la figura 3.13 y 3.14.

En el primer caso la corrosión fue cercana a nula dentro de la zona de interés, ya que, la corrosión se concentro en el límite de la enfierradura expuesta por fuera del hormigón. Esto provocó que a los 14 días las barras se cortaran y se perdiera la conexión de corriente dentro de la misma. Una vez la probeta se encontraba desconectada se procedió a romper el hormigón y se comprobó el estado inmutado de las barras.

En el segundo caso, se alcanzó un 8% de corrosión medido como la pérdida de masa en forma de óxido férrico respecto la densidad nominal del acero. En este caso se pudo controlar la capa de agua que podía quedar en contacto con las barras y con esto se evitó la desconexión de la probeta.

4.2. Desarrollo de los procedimientos

Los procedimientos de los ensayos de adherencia no incurrieron en grandes cambios, para obtener los resultados de carga. La variación que sucedió en una primera etapa fue el cambio de tiza sólida, por el uso de un marcador de tiza líquida Lavoro art para lograr un mejor color de la marca que facilita el reconocimiento de colores para el código de análisis de imágenes tal como se muestra en la figura 4.1.

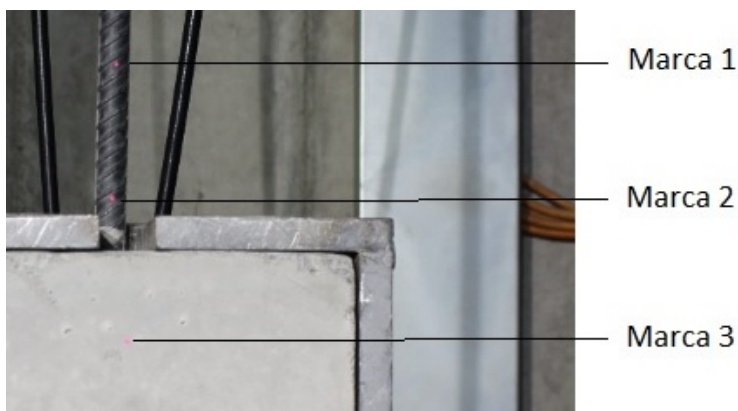


Figura 4.1: Marcas para lectura con arreglo de seguimiento

Otro cambio en los experimentos de adherencia fue la posición de la cámara que apunta a la probeta durante el ensayo. Cuando se evaluó al primera serie de ensayos de la barras de 10 milímetros se utilizó un tiro de cámara muy cercano a las probetas lo que provocó la salida del área de hormigón de las fotos 4.2.

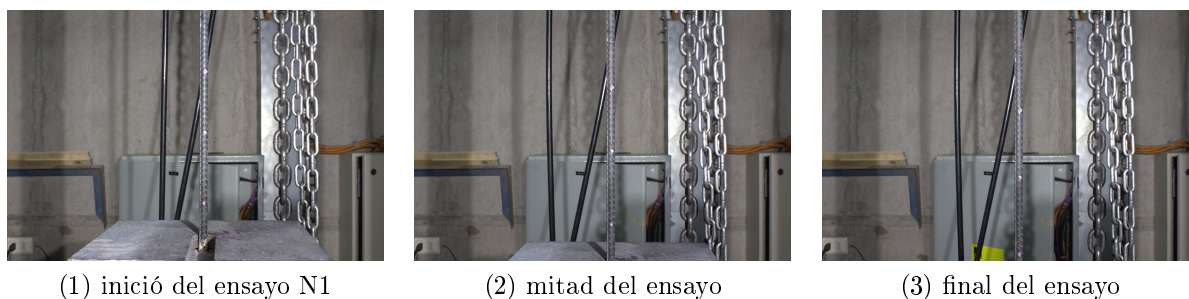


Figura 4.2: Prueba de distancia focal para ensayos de adherencia

Para conocer de manera completa como se comportan los desplazamientos relativos entre la probeta de hormigón y la barra fue necesario colocar la cámara a una distancia superior que la primera serie de pruebas, como en la figura 4.3. Un punto que también se debe considerar con este cambio es la distancia que hay entre marcas. Si una de las marcas entra dentro del área de búsqueda de la marca siguiente pueden haber problemas en las lecturas.

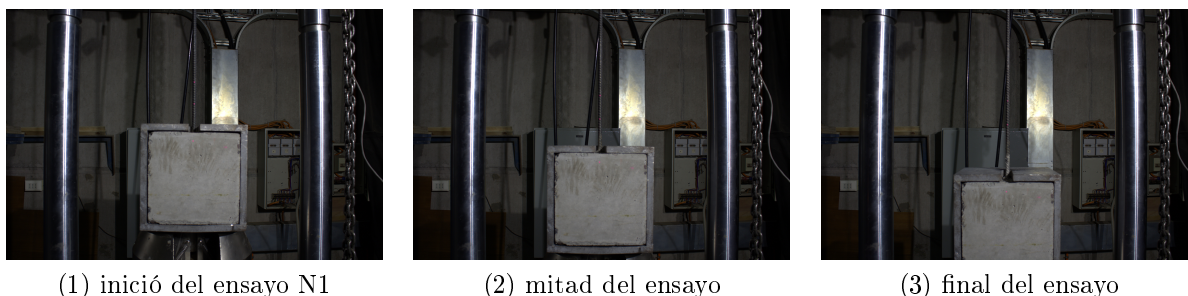


Figura 4.3: Distancia definitiva

4.3. Resultados

Los resultados que se exponen a continuación se dividen en tres fuentes de análisis de los cuales se pueden rescatar análisis concretos. Lo primero corresponde a un conjunto de gráficos que enfrentan el ya denominado deslizamiento (slipping) entre la barra de acero y el bloque cubico de hormigón.

La segunda parte de resultados corresponde a los ensayos de corrosión aceleradas donde por un lado se analiza los efectos a través del porcentaje de perdida de masas de cada una de las barras y su conjunto, respecto a los valores de referencia que se tienen de barras en buen estado. Adicionalmente, se realizó un peritaje al diámetro de cada una de las barras. Para esto se utilizó un calibre digital o vernier digital. Se tomaron mediciones a lo largo de las barras y se marcaron los menores diámetros y las eventualidades que aparecieron.

4.3.1. Resultados de Adherencia

Se observa en cada uno de los ensayos de 10 milímetros un desarrollo de fuerza similar a la curva de tensiones del acero, llegado en todos las series de pruebas a la deformación plástica de las barras. Las cargas máximas de cada una de las series de los ensayos con el producto MCI Coating for Rebar se observan en la tabla 4.2. La falla de adherencia se encuentra en la caída estrepitosa de carga, en donde para todos los casos existe un remanente de fuerza una vez llegado a este punto de falla.

En el capítulo 2 de este estudio se habla sobre una resistencia básica de adherencia la cual se puede calcular a través de una formula que aparece dentro de la norma ACI 318. Ahí se detalla que la resistencia que debe tener un anclaje según sus condiciones materiales y sus características físicas como largo y ancho del empotrado. En la figura4.1 se pueden ver estos valores en Kgf para los casos de hormigones agrietados y no agrietados.

Tabla 4.1: Valores de resistencia de adherencia nominales por norma ACI-318

Barra [mm]	Na cr [kgf]	Na uncr [kgf]
10	1571	4714
16	2514	7543

Los resultados expuestos más adelante grafican la resistencia obtenida a través de la máquina universal, las cuales fueron emparejados con su correspondiente deslizamiento (entender que no es el alargamiento de la barra sino el movimiento relativo de la barra versus el hormigón) obtenido a través de la fotometria. entre la marca 2 y la marca 3 se puede determinar el deslizamiento que debe ser corregido a su vez por la elongación que se produce entre la marca 2 y el hormigón. Para ello con la marca 1 y 2 se puede saber la deformación unitaria de la barra durante el ensayo y así descontar es valor del deslizamiento.

El primer ensayo que se realizó luego de la prueba fueron los especímenes denominados como AD-10M. Este ensayo corresponde a 3 probetas cúbicas como las expuestas en el capítulo de metodología. Cada una de estas barras tienen 22 cm de empotramiento y una capa de pintura MCI Coating for Rebar. La primera y segunda serie procedieron con normalidad y luego de la falla de adherencia se dejó continuar el ensayo para captar un comportamiento no-lineal de descarga. Mientras que la serie 3 se detuvo automáticamente por la máquina debido a la pérdida de carga.

Tabla 4.2: Carga máxima ensayo 10 M

Carga max (kg)		
1	2	3
4915	5315	4858

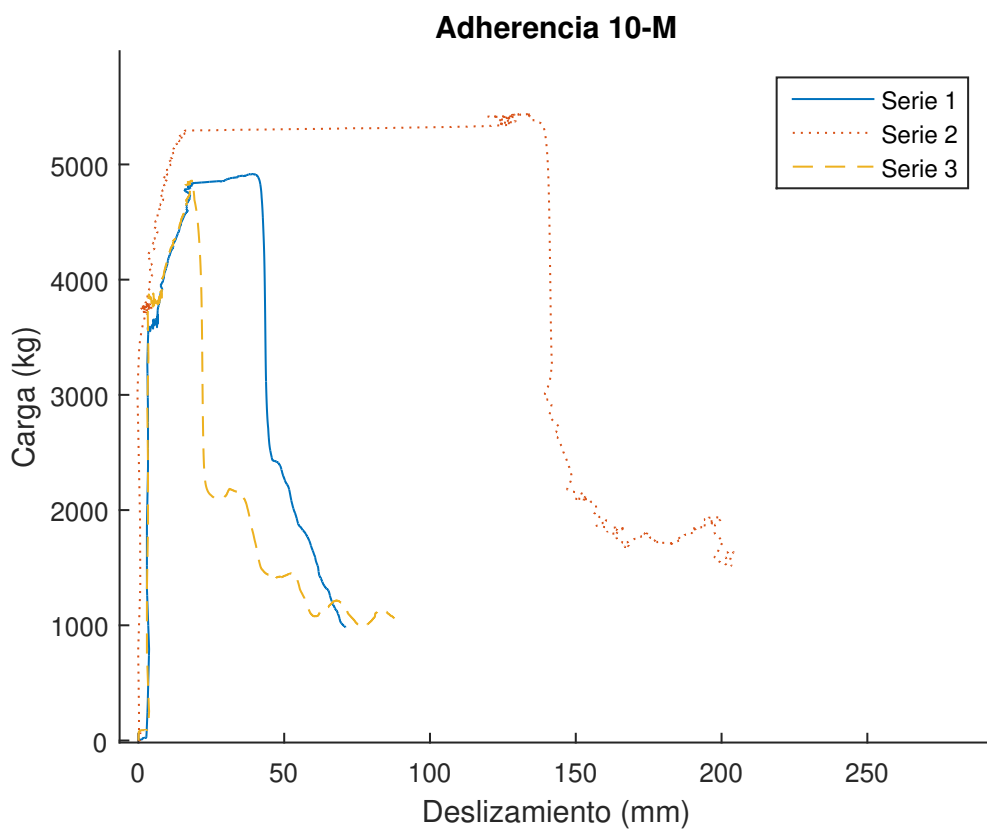


Figura 4.4: Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 10 M

El primer ensayo AD-10P son 3 probetas con barras de 10 mm. Cada una de estas barras tienen una capa de pintura anticorrosiva de maestranza. La primera probeta tuvo la carga máxima registrada de las 3 con 5515 kg y tuvo un descenso drástico que detuvo el ensayo. Mientras que la serie 2 y 3 no se detuvieron y reflejaron un comportamiento no lineal que paró al cabo de que ambos mostraron 2 peaks.

Tabla 4.3: Carga máxima ensayo 10 P

Carga max (kg)		
1	2	3
5515	5500	5489

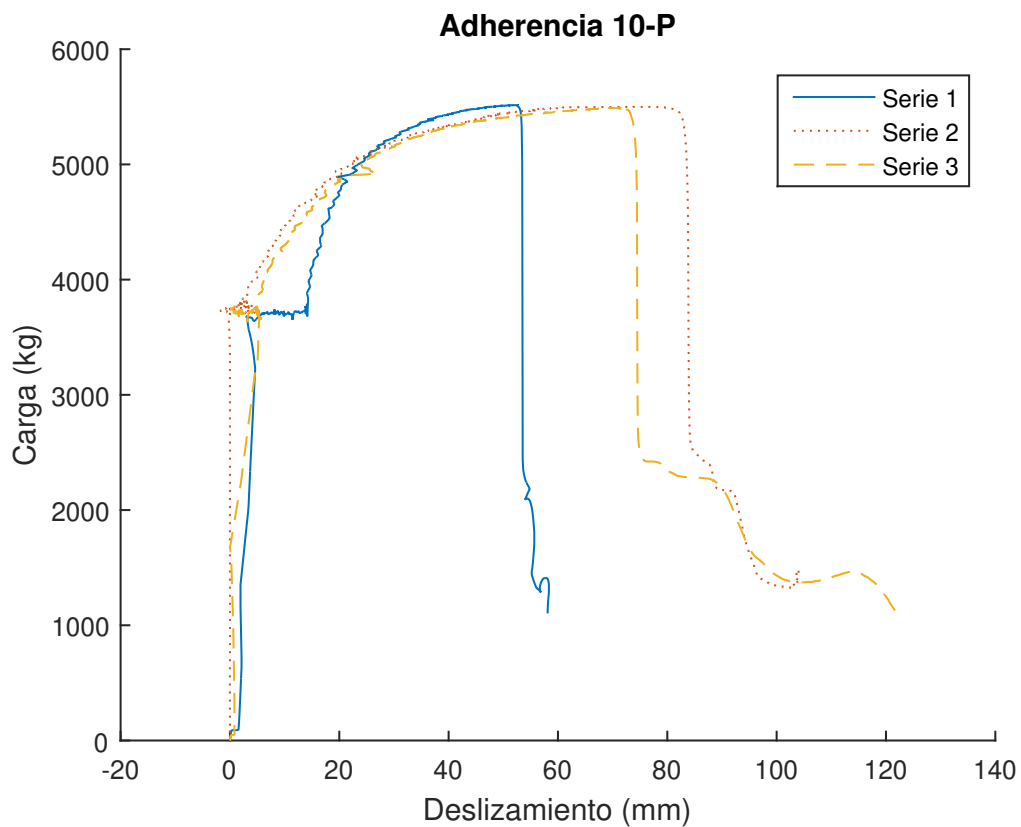


Figura 4.5: Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 10 P

Los ensayos AD-10N corresponden a las probetas sin recubrimiento de pinturas. Estos reflejaron un comportamiento similar al de los ensayos anteriores, pero con la salvedad de que la 1 y 3 serie desarrollaron un desplazamiento lineal frente a una carga constante. La segunda serie una vez que hubo una baja considerable de carga paró automáticamente.

Tabla 4.4: Carga máxima ensayo 10 N

Carga max (kg)		
1	2	3
5388	5612	5559

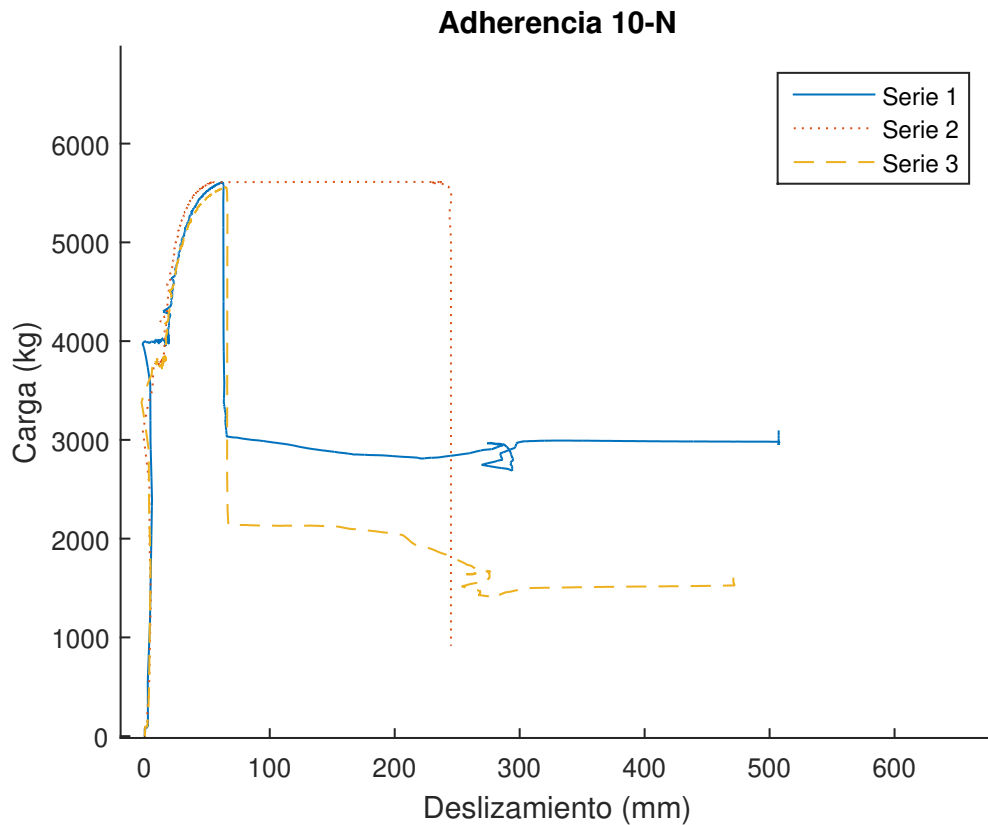


Figura 4.6: Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 10 N

Los ensayos AD-16M al igual que los 10M tienen una capa de pintura MCI Coating for Rebar en todo el largo empotrado dentro del cubo de hormigón, pero ahora utilizando una barra de 16 mm de diámetro. La primera probeta tuvo un largo desarrollo de carga de manera no lineal con una baja con solo una pérdida del 33 % de esfuerzo. La segunda y tercera serie procedieron con normalidad y luego de la falla de adherencia pararon automáticamente por la máquina debido a la pérdida de carga.

Tabla 4.5: Carga máxima ensayo 16 M

Carga max (kg)		
1	2	3
11857	10084	12730

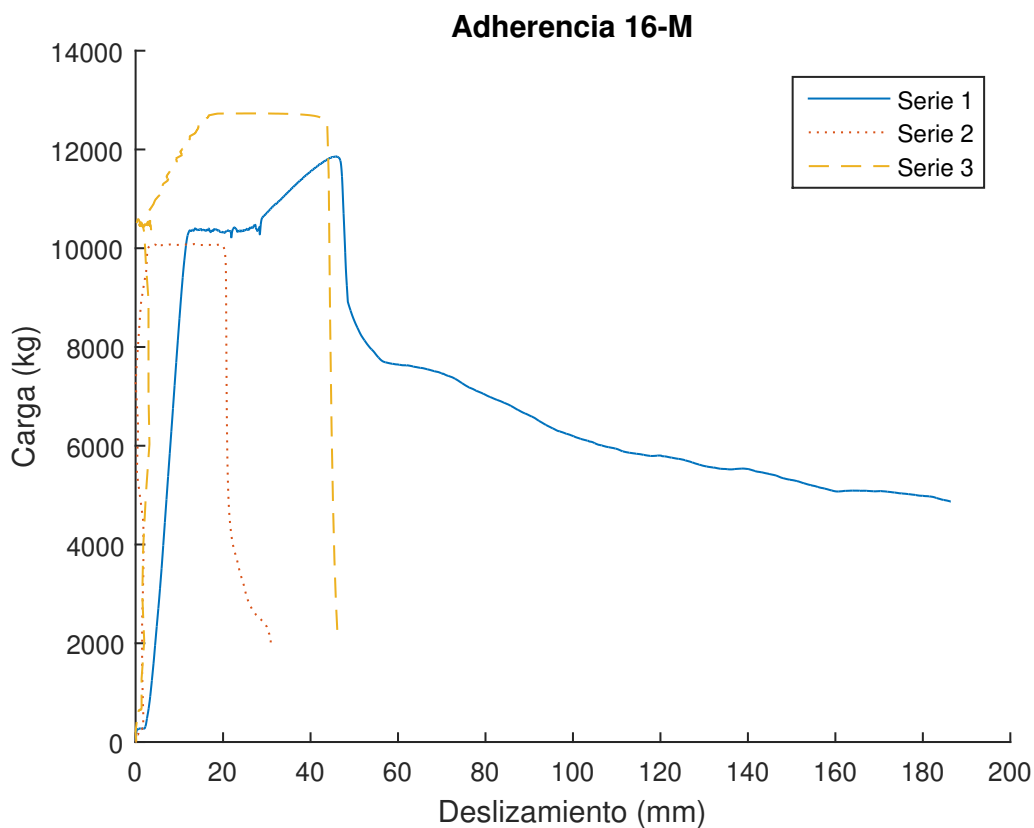


Figura 4.7: Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 16 M

Los ensayos AD-16P son las probetas de 16 mm con barras recubiertas con pintura de maestranza. Dos de estos ensayos desarrollaron la zona elástica de las barras de acero, pero fallaron dramáticamente una vez que llegaban o se encontraban cerca del inicio de la plasticificación. al serie 2 apenas con la carga tuvo una falla en su hormigón con lo que no hubo suficiente tiempo entre foto (menos de 5 segundos), por lo que se descarta esa muestra en particular.

Tabla 4.6: Carga máxima ensayo 16 P

Carga max (kg)		
1	2	3
10326		11175

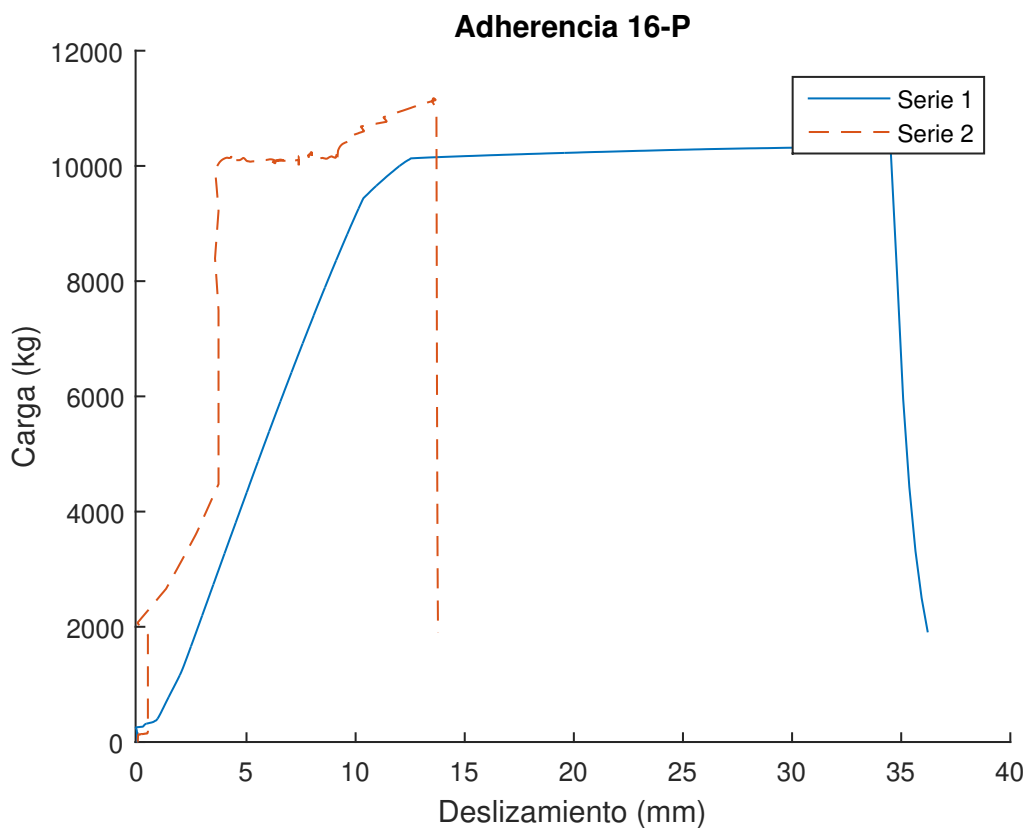


Figura 4.8: Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 16 M

Para los ensayos 16N se puede apreciar el promedio más alto de carga con 12295 del conjunto de ensayos de barras de 16 mm. Todos los ensayos tuvieron un desarrollo casi lineal con pendiente negativa una vez que se identifica una perdida drástica de carga.

Tabla 4.7: Carga máxima ensayo 16 N

Carga max (kg)		
1	2	3
11362	12599	12924

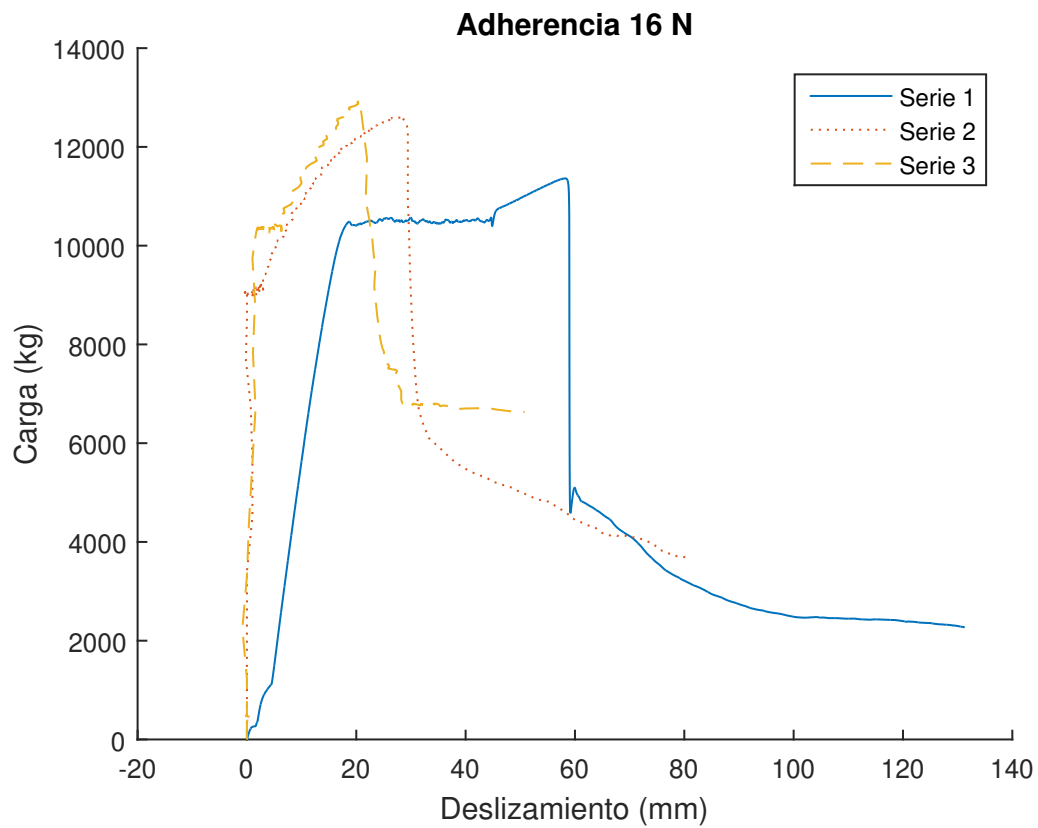


Figura 4.9: Gráfico de deslizamiento versus carga probeta 16 M

4.3.2. Resultados de Corrosión

Para los ensayos de corrosión se aplicó una intensidad de corriente de 2 mA/cm^2 para todas las probetas. Por una cuestión de espacio en los laboratorios de ingeniería de la universidad de los Andes se conectaron las probetas de a dos por fuente de poder. Esto ayudó a acotar los instrumentos necesarios para poder realizar todas las probetas de manera simultánea.

Para poder garantizar que la corriente fuera la misma para las dos probetas conectadas, se debió hacer una conexión en serie de las probetas. Tal como se muestra en la figura 3.16. Debido a los límites de voltaje que se alcanzaba con esta configuración solo era posible mantener 1 o dos probetas conectadas al mismo aparato.



Figura 4.10: Inicio de corrosión simultaneo

Cada una de las barras fueron limpiadas meticulosamente con escobillas de plástico y ácido clorhídrico para extraer las mayores acumulaciones de corrosión y poder identificar los daños más significativos en las barras.

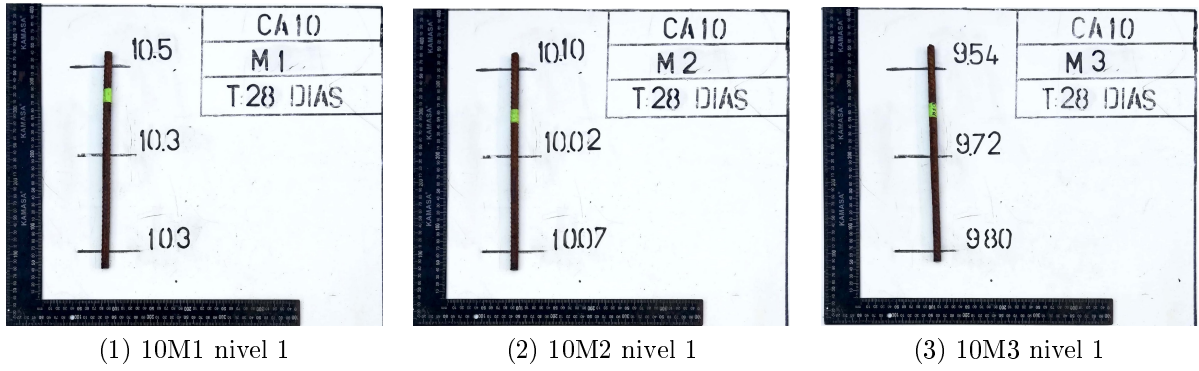


Figura 4.11: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10M nivel 1

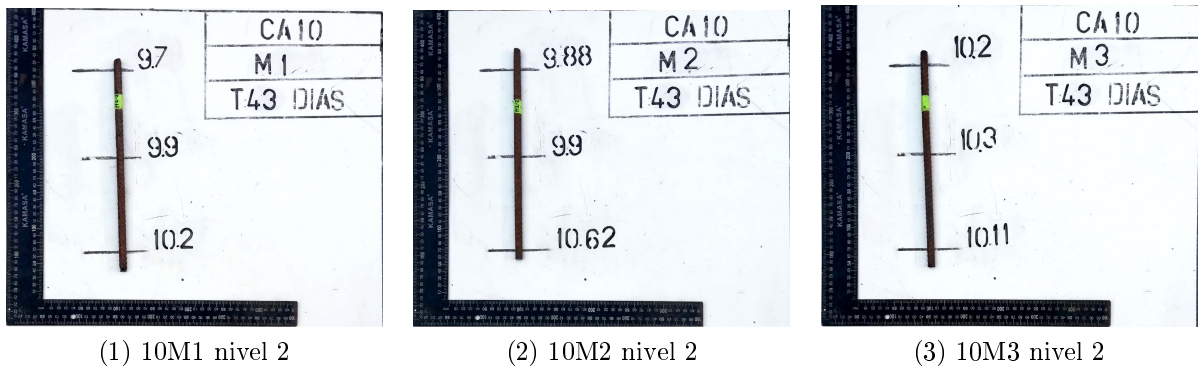


Figura 4.12: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10M nivel 2

Las barras fueron pesadas de manera individual en el laboratorio de sólidos de la universidad de Chile una vez que ya se encontraban limpias. En la tabla 4.8 se pueden observar los pesos en gramos y además del peso promedio para cada uno de los ensayos dependiendo de su nivel de corrosión correspondiente a 28 y 43 días de exposición.

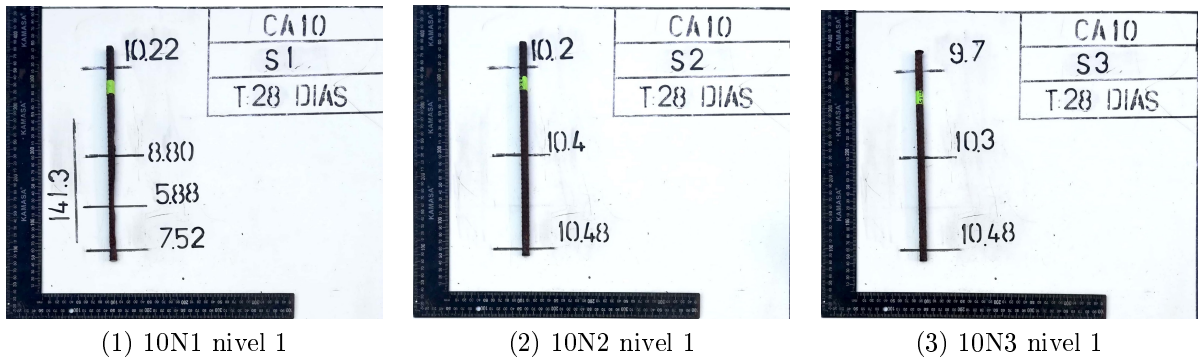


Figura 4.13: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10N nivel 1

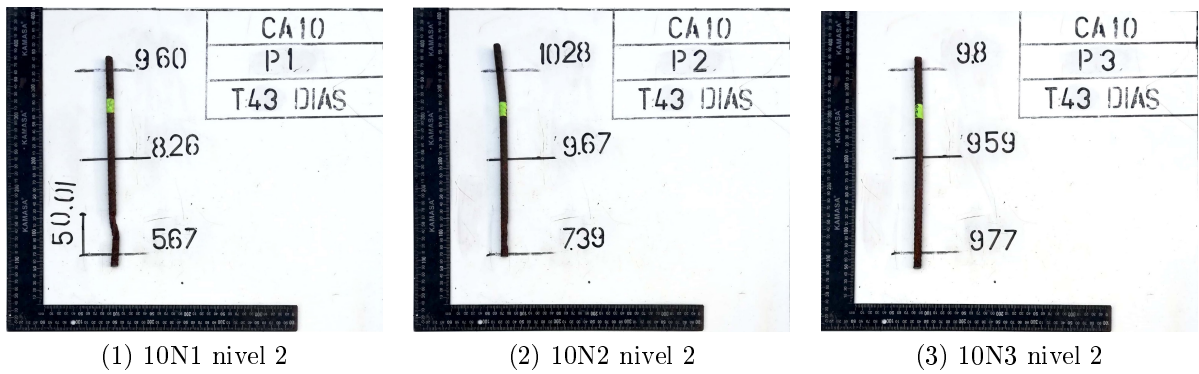


Figura 4.14: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10N nivel 2

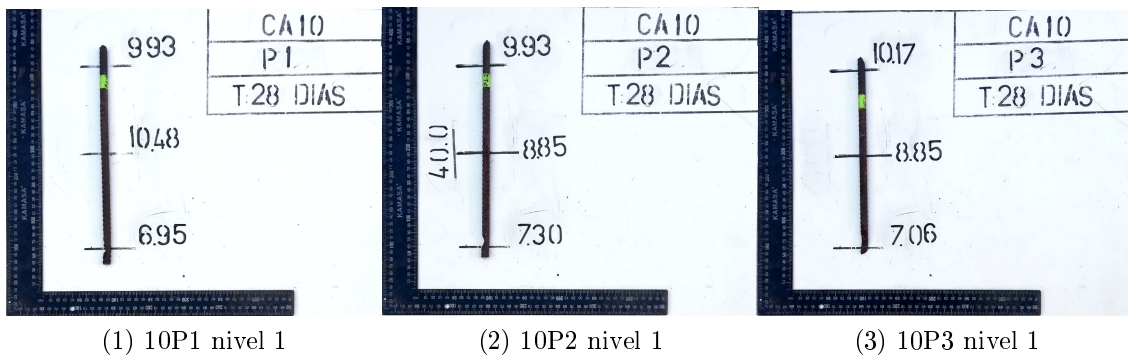
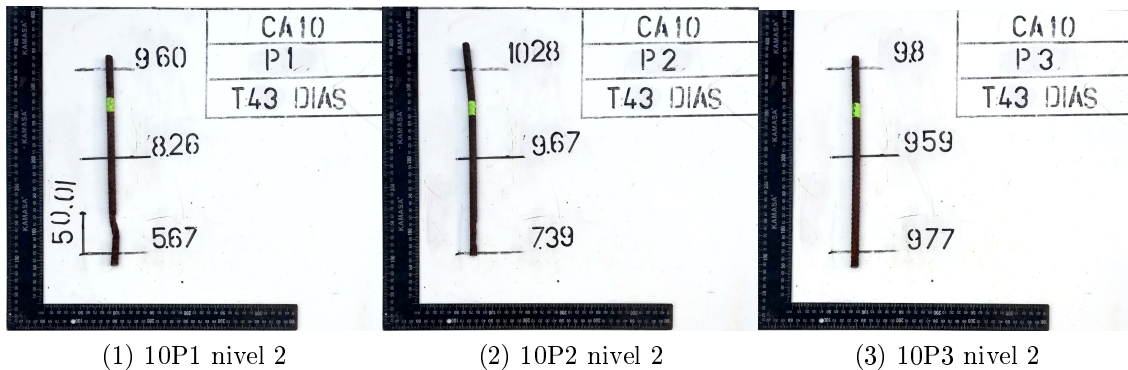


Figura 4.15: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10P nivel 1

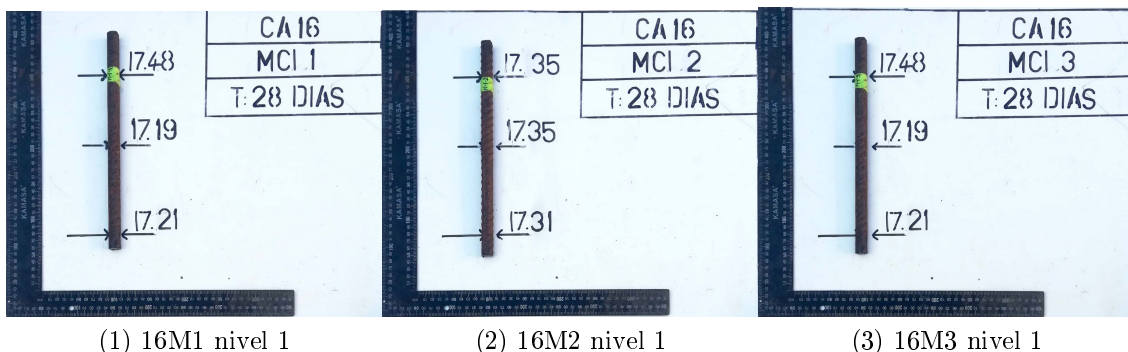


(1) 10P1 nivel 2

(2) 10P2 nivel 2

(3) 10P3 nivel 2

Figura 4.16: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 10P nivel 2

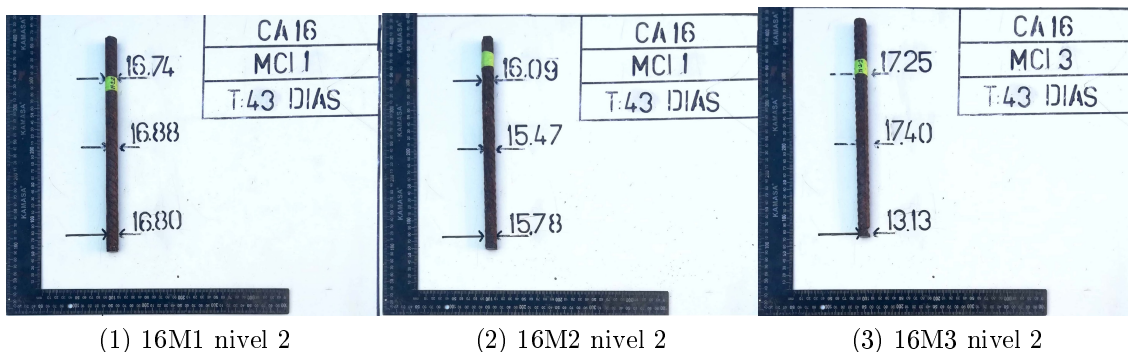


(1) 16M1 nivel 1

(2) 16M2 nivel 1

(3) 16M3 nivel 1

Figura 4.17: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16M nivel 1



(1) 16M1 nivel 2

(2) 16M2 nivel 2

(3) 16M3 nivel 2

Figura 4.18: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16M nivel 2

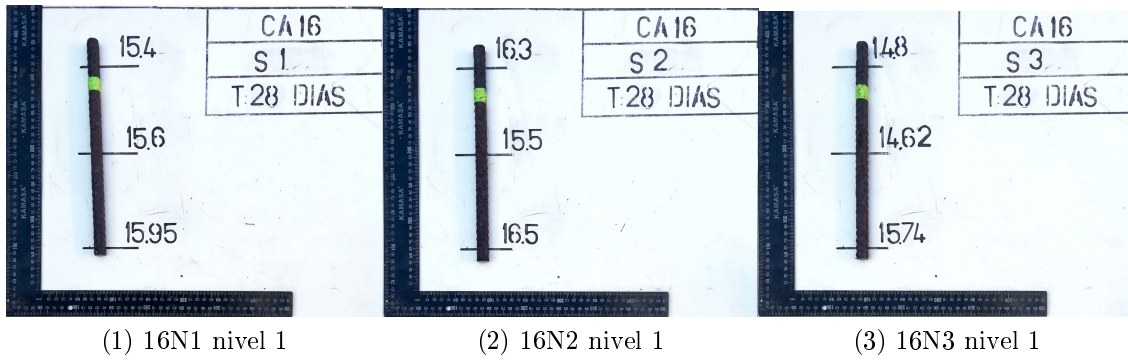


Figura 4.19: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16N nivel 1

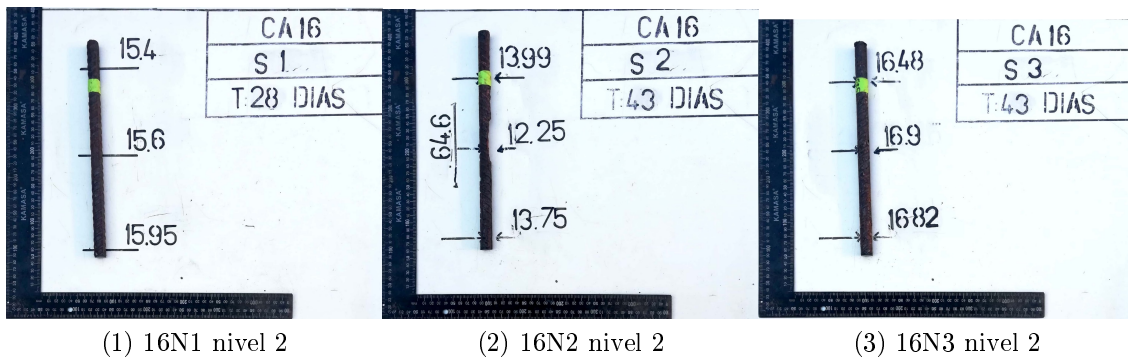


Figura 4.20: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16N nivel 2

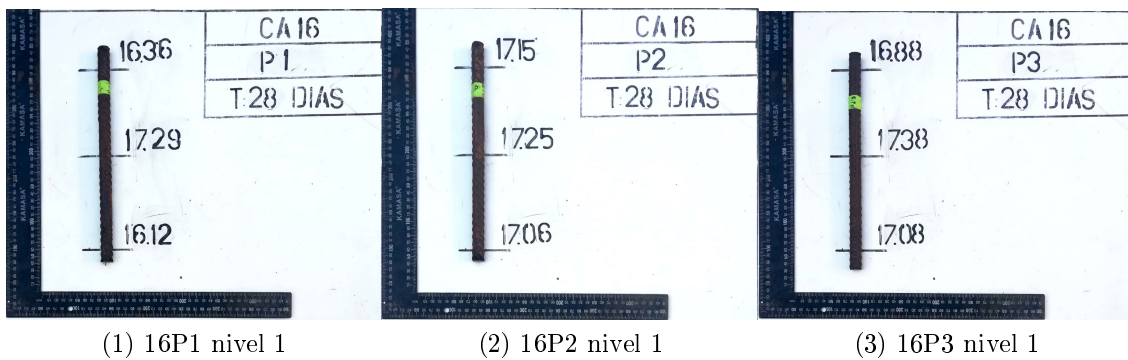


Figura 4.21: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16P nivel 1

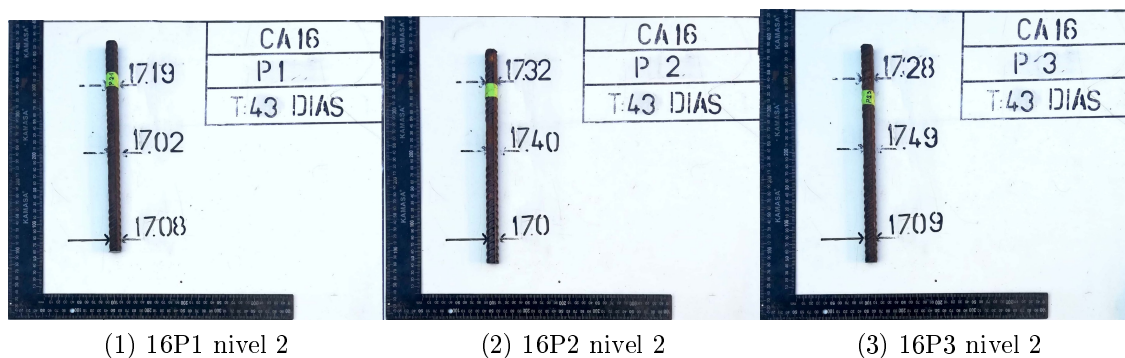


Figura 4.22: Puntos característicos de las barras de corrosión acelerada 16P nivel 2

Tabla 4.8: Peso de las barras de corrosión acelerada

diametro	tipo	num.	Nivel 1 (grs)	Prom. (grs)	Nivel 2 (grs)	Prom. (grs)
10	M	1	181,39		175,25	
		2	183,06	177,51	173,55	176,45
		3	168,07		180,55	
	P	1	180,16		160,22	
		2	171,69	169,36	172,03	169,20
		3	156,24		175,34	
	N	1	148,8		165,61	
		2	176,29	166,44	153,76	163,64
		3	174,23		171,55	
16	M	1	472,37		440,05	
		2	469,76	470,21	460,42	452,18
		3	468,49		456,06	
	P	1	468,9		470,93	
		2	472,66	470,76	473,16	471,64
		3	470,73		470,84	
	N	1	448,9		448,49	
		2	458,03	452,49	399,26	437,23
		3	450,53		463,95	

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados de adherencia

De los ensayos de adherencia se exponen 3 principales diferencia respecto a la matriz de ensayo. En primer lugar, se puede hablar respecto a las cargas que se obtuvieron para cada uno de los ensayos. Queda explicito que las mayores cargas se encuentran en las probetas "N" que no tienen ningún tipo de aditivo. Además, las tensiones entre los dos tipos de barra y por último la característica residual de resistencia que tuvieron algunos ensayos después de la falla.

En los ensayos de barras de 10 mm se da que las probetas que utilizan el producto anticorrosivo MCI resultaron tener un 8,88 % menos resistencia que las barras sin aditivo. Mientras que las probetas con el recubrimiento tipo pintura tuvo resultados muy cercanos a las probetas de control, se aprecia un 0,33 % de carga menos en el promedio.

Tabla 5.1: Cargas y tensiones máximas de probetas de adherencia

Codigo	Probeta 1 (kg)	Probeta 2 (kg)	Probeta 3 (kg)	PROM (kg)	Tensiones (Mpa)	Rigidez (kg/mm)
AD10M	4915	5315	4858	5029,3	7,85	647
AD10N	5388	5612	5559	5519,7	8,62	432
AD10P	5515	5500	5489	5501,3	8,59	406
AD16M	11857	10084	12730	11557	11,27	1813
AD16N	11362	12599	12924	12295	11,99	2845
AD16P	10326	10750,5	11175	10750,5	10,49	1581

Para las barras de 16 mm se comprueba que la probeta de control tiene de manera contundente una mayor resistencia de adherencia que la pintura o el MCI. A diferencia de los ensayos con barras de 10 mm la pintura mostró un desempeño mucho peor en estos ensayos. Las probetas '16P' obtuvieron una resistencia 12,5% menor que las que no tenían ningún recubrimiento. Mientras que las probetas tipo '16M' consiguieron solo ser un 6% menores el

desempeño máximo.

Por el lado de las tensiones de adherencia se puede comprobar la hipótesis de que la resistencia es inversamente proporcional al diámetro de las barras. La mayor tensión se puede observar para las probetas que tienen una barra de 10 mm empotrada sin aditivos. Mientras que para los otros tipos de probetas de 10 mm se mantienen lógicamente los porcentajes de desempeño, las probetas de 16 mm tienen una baja considerable en sus tensiones respecto a la probeta de control. La probeta de 16 milímetros con pintura tiene 23,9 % menos de resistencia de adherencia; la probeta con MCI tiene un 18,2 % menos que las de 10 mm y la probeta sin aditivos de 16 mm tiene 12,9 % de tensiones resistentes al deslizamiento.

Por otro lado es necesario comentar la capacidad residual que se puede observar una vez que las probetas fallaron por adherencia. En algunos ensayos no se pudo observar dicho comportamiento ya que la maquina al observar una pérdida mayor a un 90 % de carga detenía automáticamente el ensayo. Para las probetas de 10 mm se pudo observar dichas caídas drásticas en una serie para cada de los tipos de ensayo. Para las probetas 10N se puede observar una resistencia residual en un caso 3000 kg en el que después de varios minutos se detuvo el ensayo al observar un comportamiento regular en esta última parte. En la probetas con MCI también se pudo observar este comportamiento en la probeta de la serie 2 pero con una menor carga de que varía entre los 2000 y 1000 kg. Por último, las probetas de pintura a pesar de poder observar el mismo comportamiento residual existe una pendiente mayor en la perdida de carga a medida que la barra se extrae de la probeta.

Para las probetas de 16 mm se observa que el mejor comportamiento residual lo tiene la probeta sin aditivos que después de la falla llega en un comienzo a un 50 % de la resistencia de adherencia. La serie 1 de las probetas 16 M también mostró ese comportamiento de resistencia residual, pero las otras dos series el ensayo se detuvo automáticamente en la falla. Mientras que en los ensayos 16 P no se presento ese comportamiento.

5.2. Análisis de resultados de corrosión

Para poder comparar la perdida de masa de las barras sometidas a corrosión acelerada se realizan respecto a la densidad nominal de una barra de fábrica, las cuales se encuentran en la tabla 5.2. La mayor perdida de masa se observan en las probetas de control para cada uno de los diámetros correspondientes.

Para las barras de 10 mm se observa que el mejor desempeño como protector resultó ser el producto anticorrosivo MCI, mientras que en segundo lugar se encuentra la pintura tradicional. Observando las barras se puede entender este resultado dado que falló el recubrimiento de hormigón.

En el caso de las probetas de 16 mm se observo un buen desempeño de ambos recubrimientos a los 28 días. Pero en las probetas que estuvieron sumergidas por 43 días se puede observar que las barras con recubrimiento MCI tienen un efecto de un 4,6 %.

Tabla 5.2: Densidad de barras y peso

Diámetro (mm)	Densidad (kg/m)	Peso 30 cm (grs)
10	0,617	185,1
16	1,58	474

Tabla 5.3: Perdida de masa

diámetro (mm)	Tipo	28 días (grs)	43 días (grs)	Pérdida 28 días (%)	Pérdida 43 días (%)
10	M	177,51	176,45	4,10	4,67
	P	169,36	169,20	8,50	8,59
	N	166,44	163,64	10,08	11,59
16	M	470,21	452,18	0,80	4,60
	P	470,76	471,64	0,68	0,50
	N	452,49	437,23	4,54	7,76

Tabla 5.4: Diámetro barras corroídas durante 28 y 43 días

diametro	tipo	Barra	Ancho 28 días (mm)			Ancho 43 días (mm)		
10	M	1	10,5	10,3	10,3	9,7	9,9	10,2
		2	10,1	10,02	10,07	9,88	9,9	10,62
		3	9,54	9,72	9,8	10,2	10,3	10,11
	P	1	9,93	10,48	6,95	9,6	8,26	5,67
		2	9,93	8,85	7,3	10,28	9,67	7,39
		3	10,17	8,85	7,06	9,8	9,59	9,77
	N	1	10,22	5,88	7,52	9,6	8,26	5,67
		2	10,2	10,4	10,48	10,28	9,67	7,39
		3	9,7	10,3	10,48	9,8	9,59	9,77
16	M	1	17,48	17,19	17,21	16,74	16,88	16,8
		2	17,35	17,35	17,31	16,09	15,47	15,78
		3	17,48	17,19	17,21	17,25	17,4	13,13
	P	1	16,36	17,29	16,12	17,19	17,02	17,08
		2	17,15	17,25	17,06	17,32	17,4	17
		3	16,88	17,38	17,08	17,28	17,49	17,09
	N	1	15,4	15,6	15,95	15,4	15,6	15,95
		2	16,3	15,5	16,5	13,99	12,25	13,75
		3	14,8	14,62	15,74	16,48	16,9	16,82

Tabla 5.5: Promedio de diámetros barras corroídas

diametro	tipo	Prom 28 días mm	Prom 43 días mm
10	M	10,37	9,933
		10,06	10,133
		9,69	10,203
	P	9,12	7,843
		8,69	9,113
		8,69	9,720
	N	7,87	7,843
		10,36	9,113
		10,16	9,720
16	M	17,29	16,807
		17,34	15,780
		17,29	15,927
	P	16,59	17,097
		17,15	17,240
		17,11	17,287
	N	15,65	15,650
		16,10	13,330
		15,05	16,733

Capítulo 6

CONCLUSIONES

6.1. Resumen

A través de los ensayos aquí realizados se pudo establecer los efectos en la resistencia a la adherencia que cada uno de los aditivos descritos puede tener. Además, se pudo conocer el efecto que estos recubrimientos tienen en la forma en que trabajan las barras una vez que estas se encuentran sometidas a tensiones por sobre su zona de desempeño.

Con los ensayos de corrosión acelerada se pudo estimar el desempeño de dos métodos de protección para barras de acero sometidas a un ambiente severo y se crea una alternativa real para el resguardo de hormigones reforzados en condiciones extremas.

Se logró implementar una adicional para la obtención de deformaciones para ensayos con la máquina universal. Se propone una metodología de laboratorio para poder fotometría en ensayos de hormigón armado.

6.2. Conclusiones

Queda claro las repercusiones que un recubrimiento con un aditivo no especificado puede traer consecuencias graves para el desempeño de elementos de hormigón armado. Entre mayores son los diámetros de barra que se están utilizando las repercusiones en las tensiones de adherencia son mayores. La pintura de anticorrosiva tradicional se descarta por pérdidas de adherencia de un 12,5%. Por otro lado, el desempeño de el producto aquí analizado MCI Coating for Rebar a pesar de afectar las tensiones máximas que se contrastaron con las probetas de control en ambos diámetros experimentados, se puede corregir su efecto calculando con esta precaución un largo de empotramiento mayor que sea equivalente a las barras sin protección.

Por el lado de protección anticorrosiva el producto MCI obtuvo un buen desempeño que no solo garantiza la protección de barras previas al hormigonado, sino que también sigue siendo de utilidad dentro de las piezas hormigonadas. Aunque no se puede establecer directamente un plazo temporal de protección, se puede garantizar que dicha protección va existir durante

el periodo constructivo de la obra. Con esto directamente se está apoyando la protección de la obra y con esto se puede expandir la vida útil de un proyecto edificado.

Otro punto que queda expuesto con los ensayos de adherencia es la resistencia que tienen las barras una vez que la solicitante excede la zona de desempeño en donde estas trabajan. Las probetas que contaban con pintura no generaban mayor empotramiento una vez que se llegaba a la falla mientras que las probetas sin aditivos y las probetas con MCI seguían trabajando en menor medida.

6.3. Limitaciones

Las limitaciones de estos resultados se relacionan a la expansión de las matrices de ensayo aquí propuestas. No solamente se pueden ahora evaluar otros recubrimientos, sino que también se puedan evaluar una gama mas amplia de diámetros de barras que sea contrastable con la realidad de recursos que se utilizan en obras. En esta misma línea también se debe variar el largo de empotramiento para distintas barras y recubrimientos para establecer un modelo de comportamiento de tensiones de corte adherencia.

Una limitación directa a los ensayo de corrosión acelerada se encuentran en los plazos temporales. En términos de ensayo es muy útil en que los efectos corrosivos puedan ser con una mayor velocidad, ya que permiten conocer el comportamiento de vigas frente a los mecanismos de corrosión y analizar datos mucho más rápido. Pero no son la manera real en que se comporta el ambiente y la naturaleza, para poder conocer plazos temporales que sean análogos a la realidad es necesario hacer ensayos a tiempo real, los porcentajes que aquí se alcanzaron tardarían meses y hasta años en ser alcanzados.

También es necesario analizar el papel que estos nuevos aditivos juegan con una gama más amplia de hormigones, que se ha demostrado en este trabajo es fundamental para la protección de barras.

Bibliografía

- [1] Y. Du, L. Clark, and A. Chan, “Residual capacity of corroded reinforcing bars,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 57, no. 3, pp. 135–147, 2005.
- [2] A. A. Almusallam, A. S. Al-Gahtani, A. R. Aziz *et al.*, “Effect of reinforcement corrosion on bond strength,” *Construction and building materials*, vol. 10, no. 2, pp. 123–129, 1996.
- [3] R. A. Treece and J. O. Jirsa, “Bond strength of epoxy-coated reinforcing bars,” *Materials Journal*, vol. 86, no. 2, pp. 167–174, 1989.
- [4] D. ASTM, “4435-04, standard test method for rock bolt anchor pull test,” *American Standard Testing Materials*, 2004.
- [5] A. Committee and I. O. for Standardization, “Building code requirements for structural concrete (aci 318-08) and commentary.” American Concrete Institute, 2008.
- [6] M. T. G. Barbosa, E. d. S. Sánchez Filho, T. M. d. Oliveira, and W. J. d. Santos, “Analysis of the relative rib area of reinforcing bars pull out tests,” *Materials Research*, vol. 11, no. 4, pp. 453–457, 2008.
- [7] A. C. Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14): an ACI Report*. American Concrete Institute. ACI, 2014.
- [8] M. T. G. Barbosa and S. Sánchez Filho, “Investigation of bond stress in pull out specimens with high strength concrete,” *Journal of Researches in Engineering Civil And Structural Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 55–64, 2013.
- [9] J. D. Mozer, A. C. Bianchini, and C. E. Kesler, “Corrosion of reinforcing bars in concrete,” in *Journal Proceedings*, vol. 62, 1965, pp. 909–932.
- [10] X. Fu and D. Chung, “Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar,” *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 12, pp. 1811–1815, 1997.
- [11] X. Gu, H. Guo, B. Zhou, W. Zhang, and C. Jiang, “Corrosion non-uniformity of steel bars and reliability of corroded rc beams,” *Engineering Structures*, vol. 167, pp. 188–202, 2018.
- [12] Y. Du, L. Clark, and A. Chan, “Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars,”

Magazine of Concrete Research, vol. 57, no. 7, pp. 407–419, 2005.

- [13] M. M. Kashani, A. J. Crewe, and N. A. Alexander, “Nonlinear cyclic response of corrosion-damaged reinforcing bars with the effect of buckling,” *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 388–400, 2013.
- [14] ———, “Nonlinear stress–strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling,” *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 417–429, 2013.
- [15] W. McCarter, H. Ezirim, and M. Emerson, “Absorption of water and chloride into concrete,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 44, no. 158, pp. 31–37, 1992.
- [16] S. A. Olea Sepúlveda, “Ensayo de adherencia de barras de anclaje compuestas por fibra de vidrio reforzado,” *Ingeniero Civil en Estructuras, Construcción y Geotécnica*, 2015.
- [17] B. Bavarian, L. Reiner, and C. Kim, “Corrosion protection of steel rebar in concrete by migrating corrosion inhibitors,” *Corrosion 2003*, 2003.
- [18] J. I. I. Laco, F. C. Villota, and F. L. Mestres, “Corrosion protection of carbon steel with thermoplastic coatings and alkyd resins containing polyaniline as conductive polymer,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 52, no. 2, pp. 151–160, 2005.
- [19] N. Of, “Áridos para morteros y hormigones–requisitos.(2013),” *Instituto Nacional de Normalización*, 2013.
- [20] ———, “Hormigón–requisitos generales.(2016),” *Instituto Nacional de Normalización*, 2016.
- [21] S. A. Austin, R. Lyons, and M. Ing, “Electrochemical behavior of steel-reinforced concrete during accelerated corrosion testing,” *Corrosion*, vol. 60, no. 2, pp. 203–212, 2004.
- [22] I. Fernandez, J. M. Bairán, and A. R. Mari, “Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. fatigue and σ – ε behavior,” *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 772–783, 2015.
- [23] J. Gonzalez, C. Andrade, C. Alonso, and S. Feliu, “Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement,” *Cement and concrete research*, vol. 25, no. 2, pp. 257–264, 1995.
- [24] T. A. El Maaddawy and K. A. Soudki, “Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete,” *Journal of materials in civil engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 41–47, 2003.
- [25] M. Moreno, W. Morris, M. Alvarez, and G. Duffó, “Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: effect of carbonation and chloride content,” *Corrosion Science*, vol. 46, no. 11, pp. 2681–2699, 2004.
- [26] S. Dhawan, S. Bhalla, and B. Bhattacharjee, “Reinforcement corrosion in concrete structures and service life predictions—a review,” in *Proceedings of the 9th International Sym-*

posium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, New Delhi, India, 2014, pp. 1–6.