



---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EFECTO DEL AGRIETAMIENTO Y DE LAS  
CONDICIONES CLIMÁTICAS EN LA EVOLUCIÓN DE  
LOS PARÁMETROS DE CORROSIÓN EN TRABES DE  
CONCRETO REFORZADO SUJETAS A FLEXIÓN”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**I.C. MAURICIO ISMAEL PONCE GALERA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2018**

Aunque este trabajo hubiera servido para el Examen de Grado y fuera aprobado por el sínodo, solo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca para poder cursar mis estudios de maestría.

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se estudiaron 16 traveses de concreto reforzado. Las dimensiones de las traveses fueron de 15 x 30 x 350 cm (base x peralte x longitud). La variable de estudio fue el diámetro de acero de refuerzo longitudinal a tensión. Se realizó un control de las cargas sostenidas y revisión del sistema de postensado (magnitud de cargas que generen un momento máximo asociado al 60% del esfuerzo de fluencia). Se realizó la medición velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica del concreto de cada traves. Se realizó la prueba de contenido de cloruros de cada traves. Para la realización de dicha prueba se extrajeron muestras de concreto endurecido. Por su parte, en dicho proceso, se consideró el efecto del humedecimiento semanal para la medición de los parámetros electroquímicos de la corrosión y el ancho de grieta. Se estudiaron diferentes modelos teóricos para calcular el ancho y separación de grietas. Se identificó a que modelo se ajustan mejor los agrietamientos de las traves reales. Se estimó el volumen de agrietamiento presente en las traves. Se realizó un análisis del efecto del volumen de agrietamiento en la evolución de los parámetros de corrosión. Se recopiló información de los factores climáticos y se evaluó el efecto que tiene sobre la evolución de los parámetros de corrosión. Se observó que el agrietamiento en las traves se ajusta bien a algunos modelos teóricos. Se encontró que existe un efecto del volumen de agrietamiento en la evolución de los parámetros de corrosión en su etapa inicial. Se observó que el contenido de cloruros es mayor en zonas donde existe humedecimiento por la medición de los parámetros electroquímicos de corrosión. Por su parte el contenido de cloruros es proporcional al ancho de grieta en etapas iniciales de corrosión. No se observó el efecto de los factores climáticos en la evolución de la corrosión debido a que los factores climáticos difieren en cuanto a condiciones al momento de ser medidas (intemperie) con respecto a las condiciones de las traves (resguardo en laboratorio).

## ABSTRACT

In this research work, 16 reinforced concrete beams were studied. The dimensions of the beams were 15 x 30 x 350 cm (base x high x length). The study variable was the steel diameter of longitudinal tension reinforcement. A control of the sustained loads and revision of the post-tensioning system was carried out (magnitude of loads that generate a maximum moment related with 60% of the yield stress). The corrosion rate, corrosion potential and electrical resistivity of each concrete beam was measured. The chloride content test of each beam was performed. For the realization of this test hardened concrete samples were extracted. For its part, in this process, the effect of the weekly wetting was taken into account for the measurement of the electrochemical parameters of corrosion and crack width. Different theoretical models were studied to calculate the width and cracks separation. It was identified to which model the cracks of the real beams adjusted better. The cracking volume present in the beams was estimated. An analysis of the effect of cracking volume on the evolution of corrosion parameters was carried out. Information on climatic factors was collected and the effect it has on the evolution of corrosion parameters was evaluated. It was observed that the cracking in the beams adjusts well to some theoretical models. It was found that there is an effect of cracking volume on the evolution of the corrosion parameters in its initial stage. It was observed that the chloride content is higher in areas where there is wetting due to the measurement of the electrochemical corrosion parameters. On the other hand, the chloride content is proportional to the crack width in initial stages of corrosion. The effect of climatic factors on the evolution of corrosion was not observed because the climatic factors differ in terms of conditions at the time of measurement (weather) with respect to the conditions of the beams (shelter in the laboratory).

# CONTENIDO

CAPÍTULO 1 .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivo general.....	3
1.3 Objetivos específicos .....	3
1.4 Alcance .....	3
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Estudios experimentales de trabes de concreto reforzado con corrosión .....	4
2.2 Técnicas experimentales para medir la corrosión.....	14
2.3 Potencial de corrosión .....	14
2.4 Velocidad de corrosión .....	16
2.5 Resistividad eléctrica del concreto.....	17
2.6 Contenido de iones libres de cloruro.....	18
2.7 Porosidad efectiva .....	19
2.8 Modelos de agrietamiento.....	20
2.8.1 Modelos de agrietamiento para el cálculo del ancho máximo probable de grieta en trabes de CR .....	21
2.8.2 Modelos de agrietamiento para el cálculo de la distancia media entre grietas en trabes de CR .....	23
2.9 Conclusiones de la revisión de la literatura.....	24
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	27
3.1 Recopilación de información de trabes de CR .....	27
3.1.1 Características de trabes de CR .....	27
3.1.2 Diseño de trabes de CR .....	28
3.1.3 Construcción de trabes de CR .....	31
3.1.4 Ensayo preliminar de trabes.....	32
3.1.5 Monitoreo previo de los parámetros de corrosión .....	34
3.2 Control de cargas sostenidas en trabes de CR .....	37

3.3 Medición de parámetros de corrosión de trabes de CR .....	40
3.4 Obtención del contenido de iones libres de cloruro en trabes de CR .....	43
3.4.1 Ubicación e identificación de longitud y ancho de grieta .....	43
3.4.2 Extracción de polvos de concreto endurecido y cálculo de porcentaje de cloruros en trabes de CR por ancho de grieta.....	45
3.5 Evaluación del efecto del ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión en trabes de CR .....	48
3.6 Evaluación del efecto de los factores climáticos en el comportamiento electroquímico de barras de AR longitudinal a tensión y del concreto.....	49
CAPÍTULO 4 RESULTADOS .....	50
4.1 Resistencia a compresión axial del mortero .....	50
4.2 Control de cargas sostenidas en trabes de CR .....	51
4.3 Parámetros electroquímicos de corrosión de trabes de CR.....	52
4.4 Contenido de iones libres de cloruro en trabes de CR.....	57
4.5 Agrietamiento en trabes de CR.....	58
4.6 Factores climáticos de la ciudad de Mérida .....	61
CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	64
5.1 Control de cargas sostenidas en trabes de CR .....	64
5.2 Parámetros de corrosión en trabes de CR.....	65
5.3 Contenido de iones libres de cloruro en trabes de CR.....	71
5.4 Efecto del ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión en trabes de CR.....	74
5.5 Efecto de los factores climáticos en el comportamiento electroquímico de barras de AR longitudinal a tensión y del concreto.....	79
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES .....	89
REFERENCIAS.....	90
APÉNDICE A.....	95

APÉNDICE B.....	100
APÉNDICE C .....	104
APÉNDICE D .....	112



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Detalle longitudinal de AR en trabes con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm .....	29
Figura 3.2 Sección transversal de trabes con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm.....	29
Figura 3.3 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 10 mm de diámetro .....	30
Figura 3.4 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 13 mm de diámetro .....	30
Figura 3.5 Sistema de carga en cuatro puntos.....	31
Figura 3.6 Diagrama de fuerzas cortantes .....	31
Figura 3.7 Diagrama de momentos flexionantes .....	31
Figura 3.8 Aislamiento de AR longitudinal del transversal .....	32
Figura 3.9 Curva carga – desplazamiento para trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	33
Figura 3.10 Curva carga – desplazamiento para trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	33
Figura 3.11 Potenciales de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	34
Figura 3.12 Velocidades de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	35
Figura 3.13 Resistividad eléctrica del concreto en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	35
Figura 3.14 Potenciales de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	36
Figura 3.15 Velocidades de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	36
Figura 3.16 Resistividad eléctrica del concreto en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	37

Figura 3.17 Sistema de cargas sostenidas.....	38
Figura 3.18 Silletas metálicas.....	38
Figura 3.19 Detalle de aplicación (izquierda) y conservación (derecha) de las cargas sostenidas .....	39
Figura 3.20 Colocación de sistema de postensado .....	40
Figura 3.21 Equipo Gecor6 .....	41
Figura 3.22 Esquema de medición de los parámetros de corrosión en centros de claro de traves de CR .....	42
Figura 3.23 Esquema de medición de los parámetros de corrosión en extremos de traves de CR .....	42
Figura 3.24 Medición del ancho de grietas en traves de CR con microscopio .....	44
Figura 3.25 Vista de grieta medida con el microscopio .....	44
Figura 3.26 Patrón de agrietamiento y zona de influencia por humedad en traves de CR .....	45
Figura 3.27 Esquema de perforación de traves de CR .....	46
Figura 3.28 Determinación del contenido de cloruros libres en muestras de polvo con el equipo Conductronic .....	46
Figura 3.29 Resane de trabe perforada con mortero 1:3 .....	47
Figura 3.30 Prueba de resistencia a compresión axial de mortero 1:3.....	47
Figura 3.31 Longitud agrietada de las traves .....	48
Figura 3.32 Secciones consideradas en el análisis de volúmenes de agrietamiento en traves de CR .....	49
Figura 4.1 Potencial de corrosión – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 10 mm de diámetro .....	53
Figura 4.2 Potencial de corrosión – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 13 mm de diámetro .....	53
Figura 4.3 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 10 mm de diámetro.....	54
Figura 4.4 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 13 mm de diámetro.....	55

Figura 4.5 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 10 mm de diámetro.....	56
Figura 4.6 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 13 mm de diámetro.....	56
Figura 4.7 Patrón de agrietamiento, ancho de grieta (en mm) y zona de influencia por humedad de las traves T1 y T9.....	57
Figura 4.8 Contenido de cloruros libres por peso de cemento en traves de CR con AR de 10 mm de diámetro.....	58
Figura 4.9 Contenido de cloruros libres por peso de cemento en traves de CR con AR de 13 mm de diámetro.....	58
Figura 4.10 Ubicación del momento de agrietamiento en el diagrama de momentos para traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	59
Figura 4.11 Ubicación del momento de agrietamiento en el diagrama de momentos para traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	60
Figura 4.12 Porcentaje promedio de humedad relativa.....	62
Figura 4.13 Temperatura media .....	62
Figura 4.14 Precipitación diaria .....	63
Figura 5.1 Porcentaje de pérdida de cargas sostenidas a través del tiempo .....	64
Figura 5.2 Promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de traves .....	65
Figura 5.3 Promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	66
Figura 5.4 Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	67
Figura 5.5 Acumulados con base en el mismo origen de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	68
Figura 5.6 Promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro .....	69
Figura 5.7 Acumulados de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro .....	70

Figura 5.8 Promedio de contenido de cloruros por peso de cemento para trabes con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	72
Figura 5.9 Promedio de contenido de cloruros por ancho de grieta considerando la zona no mojada de las trabes de CR .....	73
Figura 5.10 Promedio de contenido de cloruros por ancho de grieta considerando la zona mojada de las trabes de CR .....	73
Figura 5.11 Ancho de grieta – longitud de trabes.....	74
Figura 5.12 Distancia media entre grietas – diámetro .....	76
Figura 5.13 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en el potencial de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro..	77
Figura 5.14 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro..	77
Figura 5.15 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en la velocidad de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro..	78
Figura 5.16 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro..	78
Figura 5.17 Humedad relativa y promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	80
Figura 5.18 Humedad relativa y promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	80
Figura 5.19 Humedad relativa y promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	81
Figura 5.20 Temperatura media y promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	82
Figura 5.21 Temperatura y promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro .....	82
Figura 5.22 Temperatura y promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	83
Figura 5.23 Precipitación y promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro .....	84

Figura 5.24 Precipitación y promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro .....	84
Figura 5.25 Precipitación y promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....	85
Figura A. 1 Potencial de corrosión – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 10 mm de diámetro .....	95
Figura A. 2 Potencial de corrosión – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 13 mm de diámetro .....	96
Figura A. 3 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 10 mm de diámetro.....	97
Figura A. 4 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 13 mm de diámetro.....	97
Figura A. 5 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 10 mm de diámetro.....	98
Figura A. 6 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 13 mm de diámetro.....	99
Figura B.1 Esquema de grietas en traveses T1 a T4 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	100
Figura B. 2 Esquema de grietas en traveses T5 a T8 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	101
Figura B. 3 Esquema de grietas en traveses T9 a T12 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	102
Figura B. 4 Esquema de grietas en traveses T13 a T16 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	103
Figura D. 1 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “no mojado” (NM) y ancho de grieta de 0.00 mm .	112
Figura D. 2 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “no mojado” (NM) y ancho de grieta de 0.10 mm .	112
Figura D. 3 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “no mojado” (NM) y ancho de grieta de 0.15 mm .	113
Figura D. 4 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “mojado” (M) y ancho de grieta de 0.00 mm.....	113

Figura D. 5 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición "mojado" (M) y ancho de grieta de 0.10 mm.....	114
Figura D. 6 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición "mojado" (M) y ancho de grieta de 0.15 mm.....	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características de las traves de CR .....	6
Tabla 2.2 Criterio de evaluación del potencial de corrosión .....	15
Tabla 2.3 Relación entre Ecorr, factores diversos y la condición de corrosión del acero de refuerzo .....	16
Tabla 2.4 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión .....	17
Tabla 2.5 Criterio de evaluación de la resistividad eléctrica real en especímenes de concreto .....	18
Tabla 2.6 Límites de contenido de cloruros para nuevas construcciones .....	19
Tabla 2.7 Umbrales de cloruros para edificaciones en el norte de estado de Yucatán .....	19
Tabla 2.8 Criterios de evaluación de porosidad efectiva .....	20
Tabla 2.9 Ecuaciones para determinar el ancho de grieta máximo probable en traves de CR .....	22
Tabla 2.10 Distancia media entre grietas de traves de CR .....	23
Tabla 4.1 Resistencia a compresión axial promedio del mortero .....	50
Tabla 4.2 Pérdidas de carga en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	51
Tabla 4.3 Pérdidas de carga en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	52
Tabla 4.4 Volúmenes de agrietamiento promedio, velocidad de corrosión promedio y potencial de corrosión promedio para traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.....	61
Tabla C. 1 Ubicación relativa de grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	104
Tabla C. 2 Ubicación relativa de grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	105
Tabla C. 3 Anchos de grieta en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	106

Tabla C. 4 Anchos de grieta en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	107
Tabla C. 5 Longitud de grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	108
Tabla C. 6 Longitud de grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	109
Tabla C. 7 Distancia entre grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro .....	110
Tabla C. 8 Distancia entre grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro .....	111



# CAPÍTULO 1

## 1.1 Planteamiento del problema

El concreto reforzado se utilizó por primera vez en 1850 por Joseph Lambot. Se utilizaron barras de acero y una malla de cables para construir una escultura. Esta experiencia fue de gran importancia al incrementar el campo de aplicación del concreto. En dicha época su uso estaba limitado debido a su pobre desempeño ante esfuerzos de tensión (Bastos de Souza & Pontes de Deus, 2014). Desde el comienzo del siglo pasado las estructuras de concreto reforzado (CR) han sido ampliamente utilizadas alrededor del mundo.

Por otro lado, la durabilidad y capacidad de las estructuras de concreto expuestas a ambientes marinos pueden ser seriamente afectadas por la corrosión (Bazant, 1979). Algunos estudios han demostrado que los costos por daños debidos a la corrosión son muy elevados y tienen un mayor impacto en las naciones industrializadas. En Estados Unidos, Uhlig (1940) estimó el costo total relacionado con el control de la corrosión. En la década de los 70's se realizaron estudios similares en países como Estados Unidos, Reino Unido y Japón. En dichos estudios se encontró que el costo total anual por daños debidos a la corrosión se encontraba entre el 1% y 5% del Producto Nacional Bruto (PNB) de cada país (CC Technologies, 2001).

Existen diversos procesos degenerativos que afectan a la mayoría de las estructuras de CR. Dichos procesos afectan la capacidad de servicio, llegando en casos extremos al colapso. La causa más común del deterioro en el CR es la corrosión en el acero de refuerzo (AR). Esto da lugar a una secuencia de eventos debidos al incremento de volumen asociado con la transformación del acero en óxido. Se generan esfuerzos de tensión dentro del concreto que lo rodea, causando agrietamiento y eventualmente desprendimiento del recubrimiento del concreto (C.L. Page, 1982). El nivel de la corrosión relacionada con los esfuerzos, duración y magnitud de las cargas externas son factores que influyen en el comportamiento de la estructura (Ballim & Reid, 2003). El AR embebido en concreto cuenta con protección mecánica (recubrimiento) y química, la última es una capa alcalina pasivante, y se genera a lo largo de la superficie

de la barra de acero (León Chablé, 2017). La fase inicial de la corrosión es la despasivación del AR. Dicha fase ocurre cuando la concentración de cloruros en barras de refuerzo alcanza un valor crítico en la superficie, tal que la capa pasiva desaparece (Muthulingam & Rao, 2015). Algunos estudios han demostrado que la velocidad de penetración de cloruros depende de la geometría del elemento, porosidad de concreto, relación agua-cemento, tiempo de curado, condiciones climáticas y cloruros solubles (Alonso 2000; Castro-Borges 2013; da Silva 2009).

De la revisión de la literatura se encontró que se han realizado numerosos estudios que evalúan el comportamiento de barras de AR y elementos estructurales con corrosión. Las variables estudiadas han sido la cantidad de AR, el diámetro de las barras de AR, el recubrimiento, el nivel de corrosión, la técnica de corrosión (Apostolopoulos 2008,2013; Papadopoulos 2011; Bastos de Souza 2014; Du 2005; Rodríguez 1995,1997; Gu 2010; Torres 2007;Balim 2003; Gao 2016;da Silva 2009; Visairo 2016; Guevara 2009; Alonso 2000).

En la mayoría de las investigaciones, las dimensiones y la cantidad y distribución del AR de las trabes estudiadas son diferentes que las utilizadas en la práctica común (León 2017; Ballim 2015). Las técnicas de corrosión acelerada más utilizadas han sido la inclusión de cloruros en la fabricación del concreto, la aplicación de corriente impresa, los ciclos de mojado y secado con agua contaminada por cloruros y la corrosión por exposición a un ambiente natural (León 2017; Visairo 2016). En pocas de las investigaciones se aplicaron cargas que representen las asociadas a las condiciones de servicio. Por tanto se deben complementar los criterios de durabilidad utilizados en las normas vigentes para el diseño de estructuras de concreto. Actualmente dichas normas asocian la durabilidad a las propiedades de los materiales utilizados y al proceso de fabricación de los elementos de concreto reforzado. Las estructuras en su mayoría se encuentran sometidas a cargas permanentes que generan esfuerzos internos. Debido a la baja resistencia del concreto ante esfuerzos de tensión se generan agrietamientos a lo largo del elemento. Dichos agrietamientos facilitan el acceso de agentes externos que propician o aceleran el proceso de corrosión en el AR. Por tanto se deben considerar los niveles de esfuerzo en las

estructuras de concreto reforzado y asociarlos a un nivel de riesgo para el cual estas estructuras tienden a sufrir daños por corrosión.

## **1.2 Objetivo general**

Evaluar el efecto del agrietamiento y de las condiciones climáticas en la evolución de los parámetros de corrosión en trabes de concreto reforzado sujetas a flexión: efecto del diámetro a tensión.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Determinar el efecto del diámetro del acero de refuerzo longitudinal a tensión en la evolución de la corrosión
- Determinar el efecto del ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión
- Determinar el efecto de las condiciones climáticas en la evolución de la corrosión

## **1.4 Alcance**

En este trabajo se evaluó la evolución de los parámetros de la corrosión en trabes de CR. La variable de estudio fue el diámetro de las barras de AR longitudinal a tensión. Se midieron diferentes parámetros asociados a la corrosión como son: la velocidad de corrosión instantánea, el potencial de corrosión, la resistividad eléctrica del concreto y el contenido de cloruros por peso de cemento (ppc) en el concreto. Dichas medidas fueron tomadas de trabes de CR a escala natural con diferentes cantidades de AR longitudinal a tensión. Se aplicaron cargas sostenidas durante el monitoreo de la corrosión. Se asoció el efecto de dichas cargas en la evolución de los parámetros de corrosión, así como las variaciones que presentan durante su desarrollo. Se evaluó el efecto del ancho de grieta en el contenido de cloruros libres. Se evaluó el efecto del ancho, longitud y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión en las trabes de CR. Se evaluó el efecto de los factores climáticos de la ciudad de Mérida en la evolución de los parámetros de corrosión.

## **CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LITERATURA**

En este capítulo se presenta la revisión de la literatura. Dicha revisión se enfocó en estudios experimentales de traveses de concreto reforzado con corrosión, de los parámetros utilizados para determinar la corrosión y en modelos para determinar el agrietamiento de traveses de concreto reforzado.

### **2.1 Estudios experimentales de traveses de concreto reforzado con corrosión**

González et al. (1995) estudiaron la relación que existe entre los valores promedio de picaduras por corrosión y los valores máximos de picaduras en barras de acero embebidas en concreto y/o mortero. Se estudiaron un total de 28 traveses con cuatro técnicas de corrosión inducida. Las variables fueron la relación agua/cemento del concreto, el espesor del recubrimiento, el agrietamiento del recubrimiento, el diámetro de barras de AR longitudinal y la técnica utilizada para inducir la corrosión. Para la primera variable se consideraron relaciones agua/cemento de 0.38, 0.5 y 0.6. Para la segunda variable se consideraron espesores de recubrimiento de 2, 3 y 5 cm. Para la tercera variable se consideraron traveses con y sin agrietamiento. Para la cuarta variable se consideraron diámetros de barras de AR de 6, 8 y 16 mm. Para la quinta variable se consideró la adición de cloruros durante la elaboración del concreto (2 y 3% de  $\text{CaCl}_2$ ), ciclos de mojado y secado, inmersión en agua contaminada por cloruros y aplicación de corriente impresa. Una vez finalizado el proceso de corrosión en traveses reforzados se demolieron los traveses y se extrajeron las barras de AR. Se midió la pérdida de masa, la pérdida de diámetro promedio y la profundidad de picaduras en las barras de AR. Se concluyó que para AR embebido en concreto y/o mortero contaminado con cloruros el valor de picadura máxima es de 4 a 8 veces el valor promedio de picadura y que dicho intervalo es congruente con estudios anteriormente realizados que evalúan la corrosión de los metales en el suelo o en la atmósfera. Haciendo una comparación de corrosión inducida mediante contaminación por cloruros y la corrosión inducida mediante corriente impresa se concluyó que, la relación

de picadura máxima y la picadura promedio es de menor magnitud en la corrosión inducida mediante contaminación por cloruros.

Arya y Ofori-Darko (1996) estudiaron el efecto de la frecuencia de grietas en el desarrollo de la corrosión en traveses de CR. Se consideraron 29 traveses en total, los cuales se dividieron en dos grupos. En el grupo A se consideraron 28 traveses con dimensiones de 13.5 x 10 x 136 cm, para el AR se consideraron tres barras de 8 mm de diámetro, de las cuales una era de acero inoxidable y se colocó entre las otras barras de refuerzo. Dichas barras tuvieron un recubrimiento de 42 mm. Para el grupo B se consideró un traveso con dimensiones de 17 x 18 x 400 cm, una barra de AR de 20 mm de diámetro. Dicho refuerzo se conformó por 19 segmentos. De los cuales, 10 segmentos fueron de barras huecas de acero inoxidable con una longitud de 352 mm y 9 segmentos de barras sólidas de acero convencional con una longitud de 10 mm. La variable de estudio fue la cantidad de grietas en los traveses de CR. Para la variable de estudio en traveses del grupo A se consideraron las siguientes cantidades de grietas por traveso; 0, 1, 4, 8, 12, 16 y 20. Dichas grietas se indujeron mediante la inserción de cuñas de plástico durante el proceso de fabricación de los traveses. Se consideraron cuatro réplicas para cada traveso. Para los traveses del grupo B se colocaron arandelas de nylon entre las uniones de los segmentos para garantizar un aislamiento eléctrico entre ellos. Cada segmento se conectó externamente mediante cables de acero inoxidable. Esto se realizó con el fin de permitir cualquier combinación eléctrica entre los segmentos y calcular la aportación que tiene cada segmento en la densidad de corriente. Se indujo la corrosión en traveses del grupo A mediante ciclos de mojado y secado con una solución con un 3.5% de cloruros (NaCl) tres veces por semana durante siete meses. Para la segunda etapa se aplicaron los ciclos de mojado tres veces por mes durante cinco meses. Para el grupo B se agregó un 5% de NaCl por peso de cemento durante la fabricación del traveso. Para ambos grupos (A y B) se estimó la corrosión midiendo la densidad de corriente y aplicando la ley de Faraday para calcular la pérdida de masa. Se concluyó que a medida que disminuye la cantidad de grietas disminuye la corrosión en el AR. Por tanto se establece que para controlar mejor la corrosión en el AR es preferible reducir el número de grietas.

Rodríguez et al. (1997) estudiaron el comportamiento a flexión de traves de CR con corrosión. Se construyeron 31 traves de CR de 15x20x230 cm (base x peralte x longitud). Las variables de estudio fueron el diámetro y número de barras de AR longitudinal, la separación del AR transversal y el nivel de corrosión. En la Tabla 2.1 se presenta el número de traves y los detalles del AR refuerzo longitudinal y transversal correspondiente.

Tabla 2.1 Características de las traves de CR

Grupo	Cantidad	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	AR tensión	AR compresión	Separación de estribos (cm)
1	1 (TP)	428	2 Φ 12 mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm / 15
11	2 (TP)	509	2 Φ 10mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm /17
	4 (TC)	346	2 Φ 10mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm /17
12	2 (TP)	489	4 Φ 12mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm /17
	4 (TC)	356	4 Φ 12mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm /17
13*	2 (TP)	530	2Φ 12mm + 2 Φ 12mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm /17
	4 (TC)	377	2 Φ12mm + 2 Φ 12mm	2 Φ 8mm	Φ 6mm /17
21	2 (TP)	509	4 Φ 12mm	4 Φ 8mm	Φ 6mm /17
	4 (TC)	326	4 Φ 12mm	4 Φ 8mm	Φ 6mm /17
31	2 (TP)	499	4 Φ 12mm	4 Φ 8mm	Φ 6mm /8.5
	4 (TC)	377	4 Φ 12mm	4 Φ 8mm	Φ 6mm /8.5

\*El acero de refuerzo longitudinal a tensión se prolonga más allá de los extremos de las traves de CR

La primera columna indica la clasificación por grupos de traves de acuerdo con la cantidad de AR, la segunda columna indica la cantidad de traves con corrosión (TC) y sin corrosión (TP), la tercera columna es la resistencia a compresión axial del concreto (f'c), la cuarta columna indica la cantidad de AR longitudinal a tensión, la quinta columna indica la cantidad de AR longitudinal a compresión y la sexta columna indica la separación del AR transversal. Para las traves con corrosión, se agregó cloruro de calcio durante la fabricación de concreto. La cantidad de cloruro agregado consistió en un 3% del peso del cemento utilizado. Adicionalmente, se aplicó corriente impresa al AR hasta alcanzar un nivel de corrosión deseado. Posteriormente, se ensayaron las traves hasta la falla mediante un sistema de cargas en cuatro puntos. Se obtuvo la pérdida de masa y la profundidad de picaduras del AR longitudinal y transversal. Se observó desprendimiento del concreto debido a la corrosión. Por tanto, la sección

transversal se vio disminuida. Se concluyó que la corrosión en el AR transversal afecta más el comportamiento de las traveses que la corrosión en AR longitudinal. Esto se debe a que una corrosión severa en el AR transversal puede inducir el cambio de una falla por flexión a una falla por cortante.

Ballim y Reid. (2003) estudiaron el comportamiento a flexión de 12 traveses de CR, de las cuales seis se consideraron con corrosión en el AR y seis sin corrosión. Las dimensiones de las traveses fueron de 10x16x150 cm (base x peralte x longitud). El AR longitudinal a tensión consistió en una barra corrugada de 16 mm de diámetro. El AR longitudinal a compresión consistió en dos barras lisas de 8 mm. Para el AR transversal se utilizaron barras lisas de 8 mm a cada 6 cm. La resistencia a la fluencia del AR longitudinal a flexión fue de 5,853 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 407 kg/cm<sup>2</sup>. La variable de estudio fue la magnitud de la carga sostenida. Para la variable de estudio se consideraron dos magnitudes de carga, del 23% y 34% de la carga asociada con la resistencia última, respectivamente. La corrosión se indujo mediante la aplicación de corriente impresa durante 30 días aproximadamente. Previo a la aplicación de las cargas sostenidas se indujo la carbonatación del concreto para generar una corrosión activa. Para la aplicación de la carga sostenida se utilizó un sistema de carga de cuatro puntos. Para mantener dicha carga se utilizó un resorte. Durante la aplicación de la carga sostenida se monitoreó la deflexión al centro del claro de las traveses. Se concluyó que para entender mejor el efecto de la corrosión en el comportamiento estructural es necesario llevar a cabo ensayos utilizando cargas sostenidas e inducir corrosión de manera simultánea. A mayor carga aplicada, mayor es el riesgo de sufrir daños por corrosión. A medida que el nivel de corrosión aumenta, las deflexiones incrementan. Dichas deflexiones son más notorias cuando la corrosión ha generado agrietamientos asociados a las tensiones generadas en el concreto que rodea las barras de AR.

Torres et al. (2003) estudiaron el comportamiento a flexión de traveses de CR con corrosión. Las traveses estuvieron bajo cargas sostenidas. Se consideraron dos traveses sin corrosión y diez traveses con corrosión. Las dimensiones de las traveses fueron de

10x15x150 cm (base x peralte x longitud). El AR longitudinal a tensión consistió de una barra de 9.5 mm de diámetro. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 378 kg/cm<sup>2</sup>. Las variables de estudio fueron la longitud de la zona de corrosión del AR y el nivel de corrosión. Para la primera variable se agregaron cloruros durante la elaboración del concreto. Se agregó de 3% de NaCl con base en el peso del cemento. El concreto con cloruros se colocó en longitudes de 25, 250 y 1000 mm en la parte central de las trabes. Para la segunda variable se aplicó la técnica de corrosión acelerada mediante corriente impresa. Se consideraron tres niveles de corrosión (10, 20 y 30% de pérdida de masa). Durante la corrosión acelerada, se aplicaron ciclos de carga y descarga una vez por semana. Se registraron los patrones de agrietamiento para los ciclos de carga y descarga. Una vez logrado el nivel de corrosión deseado se demolieron las trabes de CR y se extrajeron las barras del AR. Se midió la pérdida de masa y profundidad de picaduras. Se concluyó que la ecuación de Faraday sobreestima la pérdida de masa en función de la corriente impresa. La aparición de grietas evoluciona más rápido cuando la corrosión es uniforme en comparación con la corrosión local. La rigidez disminuye a medida que el nivel de corrosión incrementa. Se observó una pérdida de rigidez a flexión hasta del 32% cuando se tienen picaduras con una pérdida de diámetro del 14%. Existe una relación entre la pérdida de rigidez a flexión con la longitud de la zona con corrosión. Es decir, para corrosión altamente localizada, la pérdida de rigidez a flexión es menor.

Gu et al. (2010) estudiaron el comportamiento a flexión de 15 trabes de CR. Se consideraron nueve trabes con corrosión inducida mediante corriente impresa, tres trabes con corrosión natural y tres trabes sin corrosión. Las dimensiones de las trabes (fabricadas en laboratorio) con corrosión inducida y sin corrosión fueron de 15x20x220 cm (base x peralte x longitud). El AR longitudinal a tensión consistió de dos barras corrugadas de 12, 14 y 16 mm de diámetro, el AR longitudinal a compresión de dos barras lisas de 10 mm, el AR transversal de barras lisas con diámetro de 6 mm y separación de 15 cm. La resistencia promedio a la fluencia del AR longitudinal a tensión de las trabes con corrosión acelerada fue de 3,531 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión axial de las trabes con corrosión acelerada fue de 270 kg/cm<sup>2</sup>. Se



consideró un recubrimiento con un espesor de 25 mm. Las dimensiones de las trabes con corrosión natural (extraídas de un edificio existente) fueron de 16.4x17.5x268 cm, 14.8x19.1x268.5 cm y 14.7x18.7x263.8 cm (base x peralte x longitud). Los diámetros para el AR longitudinal a tensión, el AR longitudinal a compresión y el AR transversal no están especificado. La resistencia promedio a la fluencia del AR longitudinal a tensión de las trabes con corrosión natural fue de 3620 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión axial promedio del concreto de las trabes con corrosión natural fue de 223 kg/cm<sup>2</sup>. Las variables de estudio fueron la técnica de corrosión, el nivel de corrosión y el diámetro del AR longitudinal a tensión. Para la primera variable se consideró corrosión natural mediante la extracción de trabes con corrosión pertenecientes a un edificio sometido durante décadas a ambiente salino. La otra técnica de corrosión fue la aplicación de corriente impresa. Para la segunda variable se consideraron diferentes niveles de corrosión; dichos niveles de corrosión se estimaron en función de los porcentajes de pérdida de masa (10, 20 y 30%). Para la tercera variable se eligieron barras de AR con diámetros de 12, 14 y 16 mm. Las trabes se ensayaron hasta la falla utilizando un sistema de cargas de tres puntos. Posteriormente, se demolieron las trabes, se limpió el AR y se midió la pérdida de masa y profundidad de picaduras. Se observó que las trabes de CR con corrosión natural sufrieron más desprendimientos de recubrimiento que las que fueron sometidas a corrosión inducida. También se observó que el nivel de corrosión fue mayor en las trabes con corrosión inducida (mayor pérdida de masa). Se concluyó que la resistencia y la rigidez a flexión de las trabes de CR disminuyen conforme el nivel de corrosión aumenta. La disminución de la resistencia está asociada a la pérdida de diámetro de las barras de AR, mientras que la pérdida de rigidez se asocia con la pérdida de adherencia entre las barras de AR y el concreto (pérdida de recubrimiento).

Shao-feng et al. (2011) estudiaron la penetración de cloruros en trabes de CR agrietadas. Se consideraron cinco trabes de CR. De las cuales, una fue utilizada como referencia y al resto se les indujo corrosión mediante ciclos de mojado. Las dimensiones de las trabes fueron 15 x 18 x 100 cm. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 340 kg/cm<sup>2</sup>. Para el AR longitudinal a tensión y a compresión se

utilizaron dos barras de 16 mm y 8 mm de diámetro, respectivamente. Se colocó AR transversal para garantizar que no ocurra la falla por corte (diámetro no especificado). El recubrimiento se consideró constante con un espesor de 30 mm. La variable de estudio fue el ancho de grieta en el concreto. Para la variable de estudio se indujo el agrietamiento mediante la aplicación de cargas sostenidas en tres puntos. Dichas cargas se incrementaron gradualmente hasta obtener los siguientes anchos de grieta; 0.1~0.2 mm, 0.2~0.3 mm, 0.3~0.4 mm y 0.4~0.5 mm. Para inducir la corrosión se realizaron 15 ciclos de mojado y secado, de dos semanas cada uno. Los ciclos de mojado consistieron en sumergir las trabes en una solución saturada al 5% de NaCl durante una semana. Para determinar los perfiles de cloruros en las zonas de agrietamiento se utilizó la prueba rápida de cloruros (RCT). Se concluyó que para la penetración de cloruros en el concreto agrietado, el coeficiente de difusión del concreto aumenta a medida que aumenta el ancho de grieta. Se puede establecer un modelo con un coeficiente de difusión equivalente en el concreto agrietado el cual puede ser expresado en función del ancho de grieta.

Lu et al. (2016) estudiaron cinco trabes de CR con corrosión en el AR longitudinal. Se consideraron cuatro trabes con corrosión y una sin corrosión. Las dimensiones de las trabes fueron de 15x10x150 cm (base x peralte x longitud). El AR longitudinal consistió en dos barras corrugadas de 16 mm de diámetro. La resistencia a la fluencia del AR fue de 4078 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 327 kg/cm<sup>2</sup>. Las variables de estudio fueron el espesor de recubrimiento y la separación de grietas. Para la primera variable se consideraron recubrimientos de 2 y 4 cm. Para la segunda variable, se consideraron dos trabes con agrietamientos a cada 15 cm y dos con agrietamientos a cada 20 cm. Los agrietamientos se indujeron utilizando placas de aluminio de 0.1 y 0.2 mm de espesor durante la colocación del concreto. La trabe sin corrosión no tuvo agrietamientos. Para las trabes con corrosión se aplicaron ciclos de mojado y secado con una solución con un contenido de cloruros del 5%. Los ciclos de mojado y secado se aplicaron durante cuatro años. Posteriormente, se demolieron las trabes y se extrajeron las barras de AR. Se midió la pérdida de masa, la pérdida de diámetro promedio y la profundidad de picaduras en las barras de AR. El nivel de

corrosión se definió en función de la pérdida masa. Se concluyó que se puede reducir la pérdida de diámetro del AR al reducir el ancho y profundidad de grieta, así como la separación entre grietas. Existe una reducción lineal de la resistencia a la fluencia y la fractura del acero a medida que el nivel de corrosión aumenta. Por tanto, la degradación del acero asociada a un proceso de corrosión (puntual) reduce la ductilidad de barras de acero

Yu-Chen et al. (2016) estudiaron el comportamiento a tensión de barras de AR con corrosión. Las variables de estudio fueron el diámetro del AR, la técnica de corrosión y el nivel de corrosión. Para la primera variable se consideraron barras de AR de 13, 16, 19 y 29 mm de diámetro. Para la segunda variable se consideraron dos técnicas de corrosión: natural e inducida. Para el estudio del efecto de la corrosión natural se extrajeron barras de acero de un edificio con más de 40 años de antigüedad. Por otro lado, se construyeron travesaños de CR a las que se aplicó corriente impresa en laboratorio para inducir la corrosión del AR. Para la tercera variable, el nivel de corrosión natural no fue específico. Una vez terminado el proceso de corrosión se obtuvo la pérdida de masa del AR, así como el contenido de cloruros en el concreto. Se ensayaron las barras a tensión hasta la falla. La resistencia a la fluencia en el AR corroído naturalmente fue de 4,290 kg/cm<sup>2</sup> y de 4,688 kg/cm<sup>2</sup> para el diámetro de 13 mm y 29 mm, respectivamente. La resistencia a la fluencia de las barras de AR con corrosión inducida fue de 3,116 kg/cm<sup>2</sup>, de 2,555 kg/cm<sup>2</sup> y de 4,213 kg/cm<sup>2</sup> para los diámetros de 13 mm, 16 mm y de 19 mm, respectivamente. Se concluyó que para las barras de AR con corrosión natural y para las barras con corrosión inducida la resistencia y capacidad de deformación disminuye conforme la corrosión aumenta. Para altos niveles de corrosión, el plato de endurecimiento por deformación desaparece. La resistencia última a tensión es mayor en las barras de AR con corrosión natural, debido a que ésta es más uniforme en comparación con la corrosión inducida. Por lo tanto, tomar como referencia la resistencia última de las barras de AR sometidas a corrosión inducida puede ser conservador.

Visairo (2016) estudió el comportamiento a flexión de traveses con corrosión bajo cargas sostenidas. Se consideraron ocho traveses de CR, cuatro sin corrosión y cuatro con corrosión. Las dimensiones de las traveses fueron de 15x30x350 cm. Se consideraron barras corrugadas para el AR longitudinal y barras lisas para el AR transversal de las ocho traveses. Para el AR longitudinal a tensión y a compresión se consideraron dos barras de 13 mm y 10 mm de diámetro, respectivamente. Se consideró un esfuerzo de fluencia para el AR longitudinal de 4200 kg/cm<sup>2</sup>. Para el AR transversal se consideraron estribos de alambrión de 6 mm de diámetro. Para dicho refuerzo se consideró un esfuerzo de fluencia de 2320 kg/cm<sup>2</sup>. La separación de los estribos fue de 13 cm. Se consideró una resistencia a compresión axial del concreto de 250 kg/cm<sup>2</sup>. El espesor del recubrimiento de concreto fue de 25 mm. La variable de estudio fue el nivel de esfuerzo del AR longitudinal a tensión. Se consideraron dos niveles de esfuerzo, asociados al 40% y 80% del esfuerzo de fluencia del AR longitudinal a tensión. Se utilizó un sistema de cargas en cuatro puntos. Para inducir la corrosión se utilizaron dos técnicas, la primera fue la adición de cloruros durante la fabricación de las traveses y la segunda fue la aplicación de ciclos de mojado y secado con una solución contaminada con cloruros. Para la primera técnica se utilizó una concentración de cloruros del 1.5% por peso de cemento. Para la segunda técnica se aplicó una solución salina al 3.5% del peso del agua. Por su parte, a las traveses se les aplicaron de ciclos de mojado y secado durante 277 días. Se midieron la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica del concreto desde el día 28 al día 303 respecto de la fabricación de las traveses. Se concluyó que posterior a la aplicación de las cargas sostenidas el potencial de corrosión se incrementa considerablemente. El nivel de esfuerzo en el AR longitudinal a tensión no influye en el potencial de corrosión.

Weiwei et al. (2017) estudiaron el efecto del ancho de grieta en la evolución de la corrosión de traveses de CR. Se consideraron 25 traveses de concreto reforzado. Las medidas de dichas traveses fueron de 10 x10 x 40 cm. Para el refuerzo longitudinal se consideró una barra lisa de acero con diámetro de 20 mm. El esfuerzo de fluencia del acero fue de 2397 kg/cm<sup>2</sup>. No se consideró AR transversal. Se consideró un

recubrimiento de 40 mm. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 383 kg/cm<sup>2</sup>. Las variables de estudio fueron el ancho de grieta y la concentración de cloruros en la solución para inducir la corrosión. Para la primera variable se consideraron los siguientes anchos de grieta: 0 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm y 0.5 mm. Los anchos de grieta se indujeron mediante la colocación de láminas de plástico durante la fabricación de las trabes. Para la segunda variable se consideraron concentraciones de cloruro del 0.6%, 1.2%, 2.1%, 3% y 6%. Para inducir la corrosión acelerada se sumergieron las trabes agrietadas en cada recipiente con diferentes concentraciones de cloruros. Por otra parte, las trabes permanecieron sumergidas durante 654 días. Para evaluar la evolución de la corrosión se consideraron los siguientes parámetros electroquímicos: potencial de corrosión y velocidad de corrosión. Se concluyó que la velocidad de corrosión es mayor en un concreto agrietado que en uno sin agrietar. Por otra parte, en un medio agresivo el riesgo de corrosión aumenta al aumentar el ancho de grieta. Para un ancho de grieta establecido la concentración de cloruros incrementa la velocidad de corrosión. Se puede establecer un modelo empírico que considere el efecto del ancho de grieta y la concentración de cloruros para estimar la velocidad de corrosión. Por otra parte, con dicho modelo se pueden hacer combinaciones de anchos de grieta máximos y concentraciones de cloruro para obtener la velocidad de corrosión. Para concreto agrietado, tanto anchos de grieta como concentración de cloruros deben ser limitados para establecer una velocidad máxima de corrosión de 0.1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

León y Arceo (2017) realizaron un estudio preliminar de la evolución de la corrosión en trabes de CR sujetas a flexión. Se consideraron 16 trabes de CR. Las dimensiones de las trabes fueron de 15x30x350 cm. Para el AR longitudinal, se consideraron barras corrugadas con un esfuerzo de fluencia de 4544 kg/cm<sup>2</sup>. Ocho trabes se consideraron con dos barras de AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro. Para las otras ocho se consideraron dos barras de AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro. El AR longitudinal a compresión se consideró de 10 mm de diámetro para todas las trabes. Para el AR transversal, se consideraron barras lisas de 6 mm de diámetro y esfuerzo de fluencia de 2320 kg/cm<sup>2</sup>. Dicho refuerzo consistió de estribos

rectangulares separados a cada 13 cm. La resistencia a compresión axial de diseño del concreto fue de  $280 \text{ kg/cm}^2$ . Se consideró un recubrimiento constante con un espesor de 40 mm. Se aplicaron cargas sostenidas mediante un sistema de carga en cuatro puntos. Dichas cargas generaron un momento asociado al 60% del esfuerzo de fluencia. Se midieron la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica semanalmente. Se determinó el porcentaje de porosidad efectiva y porcentaje de cloruros del concreto. Se concluyó que los valores de los parámetros de corrosión se mantienen similares en etapas tempranas de la corrosión. La velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto indicaron que el AR para traveses de 10 mm y 13 mm de diámetro se encontraba en un nivel de corrosión elevado y un alto riesgo de corrosión, respectivamente. Los potenciales de corrosión se mantuvieron similares para traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. El porcentaje de probabilidad de corrosión fue de 10% aproximadamente para ambos diámetros.

## **2.2 Técnicas experimentales para medir la corrosión**

Las pruebas electroquímicas son las técnicas experimentales más utilizadas para estudiar la corrosión en estructuras de CR. Dichas pruebas proporcionan información acerca del comportamiento electroquímico del AR, por lo que nos ayudan a predecir con precisión la evolución de la corrosión a través del tiempo. Algunos parámetros de la corrosión obtenidos mediante pruebas electroquímicas son: la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión, la resistividad eléctrica y el contenido de iones de cloruros en el concreto. Para conocer la calidad del concreto en términos de durabilidad se estudia la porosidad efectiva.

## **2.3 Potencial de corrosión**

La medición de los potenciales de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) o de media celda es una técnica que permite evaluar el grado de corrosión de las estructuras de concreto reforzado, ya que está cualitativamente asociada con la tasa de corrosión del acero. Cualquier material metálico sumergido en un medio corrosivo tiene un potencial característico en

ausencia de polarizaciones externas y este potencial se conoce como potencial de reposo en circuito abierto o potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). El valor del  $E_{corr}$  es la diferencia de potencial entre el material que se estudia (barra de acero embebida en el mortero) y otro material que se utiliza como referencia (Cobre/Sulfato de cobre). El  $E_{corr}$  se puede medir por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido (ASTM C 876, 2014). Para asegurar el nivel de corrosión presente en la estructura evaluada se requiere complementar la norma con la medición de la velocidad de corrosión de acuerdo con el método de ensayo establecido en la norma NMX-C-501-ONNCCE (2015), para tener un mejor índice de confiabilidad. Los criterios para evaluar el  $E_{corr}$  se presentan en la Tabla 2.2 con base en la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2016):

Tabla 2.2 Criterio de evaluación del potencial de corrosión

<b>Potenciales de corrosión(<math>E_{corr}</math>) Cu/CuSO<sub>4</sub> (mV)</b>	<b>Probabilidad de corrosión</b>
< - 500	Corrosión severa
< - 350	90% de probabilidad de corrosión
- 350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de probabilidad de corrosión

El criterio de evaluación de dicha norma establece límites de electronegatividad para determinar la probabilidad de desarrollar corrosión en el AR. Dichos límites son probabilísticos. Por tanto, se deben realizar monitoreos a largo plazo para validar los resultados. Para evaluar la evolución de la corrosión se deben realizar mediciones periódicas. En la Tabla 2.3 se presenta la relación entre el  $E_{corr}$ , los factores diversos y la corrosión del AR.

Tabla 2.3 Relación entre  $E_{corr}$ , factores diversos y la condición de corrosión del acero de refuerzo

Condición	Potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) Cu/CuSO <sub>4</sub> (V)	Observaciones	Riesgo de daño
Estado Pasivo	+ 0,200 a - 0,200	Ausencia de Cl <sup>-</sup> pH > 12.5 H <sub>2</sub> O (HR↑)	Despreciable
Corrosión Localizada	- 0,200 a -0,600	Cl <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (HR↑)	Alto
Corrosión Uniforme	+ 0,200 a - 0,150	Carbonatado O <sub>2</sub> , Seco, (HR↑)	Bajo
	- 0,150 a - 0,600	Carbonatado O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Moderado Alto
	- 0,400 a - 0,600	Cl <sup>-</sup> elevado, H <sub>2</sub> O, ó carbonatado H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	< - 0,600	↑Cl <sup>-</sup> ; ↑ H <sub>2</sub> O (Sin O <sub>2</sub> )	Despreciable

## 2.4 Velocidad de corrosión

Se le llama velocidad de corrosión ( $i_{corr}$ ) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo, aunque la forma más usual es definida a partir de medidas de tipo electroquímico ( $\mu A/cm^2$ ). Para poder determinar la  $i_{corr}$  se utiliza una técnica electroquímica utilizando un potenciostato/galvanostato (Gecor6). Para obtenerla, los equipos electrónicos realizan un barrido de potencial en un rango muy cercano al potencial de corrosión ( $\pm 25-30$  mV). La densidad de corriente que se obtiene es conocida como corriente de corrosión, que es una medida de la velocidad del proceso de corrosión. Con base en la norma NMX C-501-ONNCCE-2014 (2015) se presentan en la Tabla 2.4 los criterios para poder evaluar los valores de  $i_{corr}$ .



Tabla 2.4 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión

Velocidad de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nivel de corrosión	Estado del concreto
< 0.1	Despreciable	Concreto seco o no carbonatado
0.1 a 0.5	Bajo	Concreto saturado o ligeramente húmedo carbonatado o con cloruros
0.5 a 1	Moderado	Concreto con alto contenido de humedad, carbonatado o con cloruros
> 1	Alto	Concreto muy contaminado con cloruros

## 2.5 Resistividad eléctrica del concreto

La resistividad eléctrica ( $\rho$ ) es una propiedad característica de los materiales la cual indica la facilidad o dificultad que tiene la corriente eléctrica para transitar por dicho material. Las lecturas del monitoreo de la  $\rho$  son muy sensibles al grado de saturación de los poros del concreto, en menor grado a la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Los criterios para poder evaluar la  $\rho$  se presentan en la Tabla 2.5 con base en la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016 (2016).

Tabla 2.5 Criterio de evaluación de la resistividad eléctrica real en especímenes de concreto

Resistividad del concreto (kΩ-cm)	Pronóstico de corrosión
<b>&gt; 100 a 200</b>	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
<b>50 a 100</b>	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
<b>10 a 50</b>	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte e agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<b>10&lt;</b>	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruro o nivel de carbonatación.

## 2.6 Contenido de iones libres de cloruro

Los iones de cloruro están presentes en la masa del concreto de tres maneras; enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua de los poros (libres). Los iones de cloruro que pueden dañar al AR son los que se encuentran libres. Los iones cloruro que son adsorbidos pueden afectar de igual manera al AR si estos se vuelven a integrar a los iones libres. Cuando el agua y los agregados utilizados en la elaboración de la mezcla de concreto contienen iones de cloruro, cierta cantidad reacciona con los compuestos

hidratados del concreto y forman sales. Otra parte es adsorbida en las paredes de los poros y solo una parte es disuelta en el agua de los poros (libre). Las normas ASTM C 1152 (2012) y ASTM C 1218 (2017) determinan los límites de contenido de iones de cloruro libres en el concreto endurecido para nuevas edificaciones. Dichos límites se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Límites de contenido de cloruros para nuevas construcciones

Categoría	Límite de cloruros (% por peso de cemento)	
	Método de prueba	
	ASTM C 1152	ASTM C 1218
Concreto reforzado en condiciones húmedas	0.10	0.08
Concreto reforzado en condiciones secas	0.20	0.15

La norma NMX-C-523-ONNCCE-2016 (2016) establece los límites de contenido de cloruros (umbral de cloruros) para edificaciones expuestas a un ambiente tropical y fabricados con materiales característicos del norte del estado de Yucatán (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 Umbrales de cloruros para edificaciones en el norte de estado de Yucatán

a/c	Rango de umbral de cloruros usando $I_{corr}^1$ (% por peso de cemento)	Promedio de umbral de cloruros usando $I_{corr}^1$ (% por peso de cemento)	Rango de umbral de cloruros usando $I_{med}^2$ (% por peso de cemento)	Promedio de umbral de cloruros usando $I_{med}^2$ (% por peso de cemento)	Rango de umbral de cloruros usando $I_{cum}^3$ (% por peso de cemento)	Promedio de umbral de cloruros usando $I_{cum}^3$ (% por peso de cemento)
0.46	0.38 – 0.54	0.46	0.40 – 0.61	0.50	0.26 – 0.33	0.30
0.53	0.55 – 0.79	0.67	0.65 – 1.10	0.87	0.39 – 0.53	0.46
0.59	0.52 – 0.68	0.60	0.49 – 0.61	0.55	0.56 – 0.73	0.65
0.70	0.35 – 0.47	0.41	0.33 – 0.47	0.40	0.37 – 0.50	0.44
0.76	0.35 – 0.9	0.42	0.30 – 0.43	0.37	0.38 – 0.50	0.44
<sup>1</sup> Corrosión instantánea, valor puntual obtenido asociado al momento de la despasivación del acero de refuerzo.						
<sup>2</sup> Corrosión promedio, la media aritmética de los $I_{corr}$ .						
<sup>3</sup> Corrosión acumulada, cambio de pendiente de la línea de tendencia entre $I_{corr}$ acumulado con respecto al tiempo.						

## 2.7 Porosidad efectiva

La porosidad efectiva del concreto ( $\xi_e$ ) depende del tipo de cemento y de las dosificaciones utilizadas para su fabricación, tales como la relación agua/cemento, la

calidad de los agregados pétreos, la compactación del concreto y el uso de aditivos. El tamaño de los poros y la cantidad de agua que contienen es fundamental para determinar el mecanismo de acceso de los cloruros. Los criterios para poder evaluar la porosidad efectiva ( $\xi_e$ ) se presentan en la Tabla 2.8 con base en el manual de la Red DURAR (2000).

Tabla 2.8 Criterios de evaluación de porosidad efectiva

<b>Categoría</b>	<b>Porosidad efectiva</b>
Concreto de buena calidad y compacidad	$\leq 10\%$
Indica un concreto de moderada calidad	10% a 15%
Indica un concreto de durabilidad inadecuada.	$> 15\%$

## 2.8 Modelos de agrietamiento

Evaluando las estructuras de CR en términos de estados límite de servicio para elementos sujetos a flexión, el control de grietas por durabilidad puede llegar ser tan importante como el control por desplazamientos. El agrietamiento a tensión se presenta en las estructuras de concreto reforzado debido a la baja resistencia a la tensión del concreto. En estructuras expuestas, el control del agrietamiento adquiere importancia estética. Por otra parte, el agrietamiento reduce la vida de servicio de las estructuras de CR. Dicho agrietamiento facilita la penetración de la carbonatación, así como el ingreso de agentes externos que propician la corrosión, los cuales son; los iones de cloruro, humedad y el oxígeno. Por tanto, la integridad del AR se ve comprometida al estar embebido en una superficie de concreto que se encuentra agrietada. Otro punto importante acerca del agrietamiento es que al iniciar el proceso de corrosión, éste se induce de manera localizada en el lugar donde se encuentre la grieta en el concreto. Posteriormente, los agentes que propician la corrosión se propagan a través de dichas grietas e inician una corrosión más generalizada. En consecuencia, luego de algunos años de servicio hay poca diferencia entre la cantidad de corrosión en el concreto agrietado y el no agrietado (ACI. 224R-01, 2001). En los últimos 100 años se han llevado a cabo numerosas investigaciones enfocadas en estudiar el comportamiento del agrietamiento en estructuras de CR. Sin embargo, no

existe una formulación globalmente aceptada para predecir el ancho y distancia entre grietas. Por otra parte, tampoco existe un criterio general para determinar cuáles son las variables más importantes. La formación de grietas presenta un gran desafío al modelarse debido a las complejidades mecánicas y geométricas que las caracterizan. Por tanto, las ecuaciones para predecir el ancho y distancia entre grietas a menudo se basan en simplificaciones (Borosnyó y Balázs, 2011).

### **2.8.1 Modelos de agrietamiento para el cálculo del ancho máximo probable de grieta en trabes de CR**

Con base en un análisis estadístico que consideraba las investigaciones más importantes de la época realizado por Gergely y Lutz en 1968, se propusieron ecuaciones para aproximar el ancho de grieta máximo probable en trabes de CR. Dicho estudio generó tal impacto que el ACI aún las incluye en el reglamento para diseño de CR (estados límites de servicio). Con base en el trabajo de Gergely y Lutz se llegaron a las siguientes conclusiones (ACI. 224R-01, 2001):

- La tensión en el AR es la variable más importante
- El espesor del recubrimiento de concreto es una variable importante, pero no es la única consideración geométrica
- El área de concreto que rodea a cada una de las barras de AR es también una variable geométrica importante
- El diámetro de las barras no es una variable significativa
- La relación entre el ancho de grieta en la superficie y el ancho en el nivel del AR es proporcional a la relación entre la deformación nominal en la superficie y la deformación en el AR

En este trabajo de investigación se consideraron las ecuaciones más utilizadas para aproximar el ancho máximo probable de grieta. En la Tabla 2.9 se presentan dichas ecuaciones. Donde,  $W_s$  es el ancho máximo probable de grieta,  $r$  es el recubrimiento mecánico de AR longitudinal a tensión,  $b$  es la dimensión de la base de la sección transversal,  $d$  es el peralte efectivo,  $E_s$  es el módulo de elasticidad del acero ( $2.1 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>),  $A_t$  es el área efectiva a tensión del concreto dividida entre el número

de barras de AR longitudinal a tensión,  $n_b$  es el número de barras de refuerzo longitudinales a tensión,  $k$  es la profundidad del eje neutro de la sección transformada dividida entre el peralte efectivo,  $h_s$  es la distancia del centroide de AR longitudinal a tensión hasta el eje neutro de la sección transformada,  $\sigma_s$  es el esfuerzo en el AR longitudinal a tensión (60%  $f_y$ ),  $\sigma_{sr}$  es el esfuerzo del AR longitudinal a tensión asociado al momento de agrietamiento,  $\beta$  es la relación entre el eje neutro y la cara con esfuerzos de tensión y la distancia entre el eje neutro y las barras de AR (1.2 para trabes, (ACI-318,1995)),  $\beta_1$  es el coeficiente que toma en cuenta las características de adherencia de las barras (1 y 0.5 para barras corrugadas y lisas, respectivamente),  $\beta_2$  es el coeficiente que considera la duración de las cargas (1 y 0.5 para cargas de corta duración y cargas de sostenidas, respectivamente),  $\beta_e$  es el coeficiente que relaciona el ancho de fisura medio con el valor de diseño (1.7 para trabes,(EUROCÓDIGO,1997)),  $S_{rm}$  es la distancia media entre grietas (Ecuación 2.4),  $\epsilon_{sm}$  es la deformación media bajo combinaciones de cargas relevantes y tomando en cuenta efectos tales como rigidización por tensión o contracción

Tabla 2.9 Ecuaciones para determinar el ancho de grieta máximo probable en trabes de CR

Autor	Ecuación	Nomenclatura
Gergely-Lutz (1968)	$W_s = 0.091 * \frac{\sqrt[3]{r * A_t}}{1 + \frac{r}{h_1}} * (\sigma_s - 5)$ $A_t = (b * 2r)/n_b$ $h_1 = (1 - k)d$	Ecuación 2.1
Gergely-Lutz simplificada (1968)	$W_s = 0.076 * \frac{\sqrt[3]{r * A_t}}{1 + \frac{2r}{3h_s}} * \sigma_s$	Ecuación 2.2
ACI 318 (1995)	$W_s = 0.076 * \beta * \sigma_s * \sqrt[3]{r * A_t}$	Ecuación 2.3
EUROCÓDIGO-EC2 (1997)	$W_s = \beta_e * S_{rm} * \epsilon_{sm}$ $\epsilon_{sm} = \sigma_s / E_s [1 - \beta_1 \beta_2 (\sigma_{sr} / \sigma_s)^2]$	Ecuación 2.4

## 2.8.2 Modelos de agrietamiento para el cálculo de la distancia media entre grietas en trabes de CR

Teóricamente se puede establecer un espaciamiento mínimo entre grietas con base en la compatibilidad de deformaciones. Considerando lo anterior, se puede conocer el punto más cercano donde se puede formar otra grieta respecto a una grieta existente. La separación mínima es constante dada una resistencia del concreto y la distribución del AR. Los estudios que han realizado pruebas de elementos de CR sometidos a flexión han demostrado que el recubrimiento del concreto, el espacio entre barras de AR longitudinal a tensión y la relación aspecto influyen considerablemente en la distancia promedio entre grietas. En la Tabla 2.10 se presentan las ecuaciones más utilizadas en esta investigación para calcular la distancia media entre grietas en elementos de CR sometidos a flexión. Donde  $S_{rm}$  es la separación media entre grietas,  $k_1$  es un factor que depende de la rugosidad de la superficie de las barras de AR (0.8 y 1.6 para barras corrugadas y lisas, respectivamente, (EUROCÓDIGO (1997))),  $k_2$  es un factor que asocia la tensión al tipo de aplicación de la carga (1 para cargas axiales y 0.5 para flexión),  $d_b$  es el diámetro de la barra de AR longitudinal a tensión,  $\rho_{ef}$  y  $\rho_t$  son la cuantía de AR en el área efectiva del concreto a tensión.

Tabla 2.10 Distancia media entre grietas de trabes de CR

Autor	Ecuación	Nomenclatura
EUROCÓDIGO(1997)	$S_{rm} = 50 + 0.25 * k_1 * k_2 * \frac{d_b}{\rho_{ef}}$ $\rho_{ef} = A_s / (2.5 * r)$	Ecuación 2.5
Broms (1965)	$S_{rm} = 2 * \left( r + \frac{d_b}{2} \right)$	Ecuación 2.6
Janovic-Kupfer (1982)	$S_{rm} = 50 + 0.637 * r * \frac{d_b}{25}$	Ecuación 2.7
CEB-FIP Model Code 1990 (1990)	$S_{rm} = \frac{2}{3} * \frac{d_b}{3.6 * \rho_t}$ $\rho_t = (A_s / (b * 2r))$	Ecuación 2.8

Fehling-König (1988)	$S_{rm} = \frac{1}{1.7} * \left( 30 + \frac{db}{4 * \rho_t} \right)$	Ecuación 2.9
Farra-Jaccoud (1992)	$S_{rm} = 1.5 * r * 0.12 * \frac{db}{\rho_t}$	Ecuación 2.10

## 2.9 Conclusiones de la revisión de la literatura

Con base en la revisión de literatura se encontró que:

1. Los principales parámetros para medir la corrosión son: el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión, la carbonatación y el contenido de cloruros en el concreto.
2. Las variables de estudio consideradas en las trabes de CR han sido: el nivel de corrosión, la técnica de corrosión aplicada, la magnitud de carga aplicada, la cantidad de AR longitudinal a tensión, la separación del AR transversal, el recubrimiento del AR longitudinal, la relación agua/cemento del concreto, el tiempo de curado, el ancho y separación de grietas.
3. Los tipos de corrosión que han sido estudiados son; la corrosión natural y la corrosión inducida. Se observó que la corrosión natural se propaga de manera uniforme, mientras que la inducida ocurre de manera localizada.
4. Las técnicas más utilizadas para inducir la corrosión son la carbonatación de trabes de CR en cámaras presurizadas, la adición de cloruros en la elaboración del concreto, la aplicación de corriente impresa, la inmersión de las trabes en agua contaminada por cloruros y los ciclos de mojado y secado con una solución contaminada con cloruros.
5. Se asume que la técnica de corrosión que mejor se aproxima a la causada por medios naturales en climas tropicales es la corrosión inducida mediante ciclos de mojado y secado. Para simular la corrosión en condiciones reales de servicio, dicha técnica se utiliza de manera simultánea con la aplicación de cargas sostenidas.
6. Se estudiaron diferentes diámetros de barras de AR utilizadas en trabes de CR. Se observó que la corrosión tiene un mayor efecto en las barras de AR con menor diámetro.



7. Existen modelos teóricos para aproximar el ancho de grieta y cantidad de grietas en elementos de CR sujetos a flexión.
8. El ancho de grieta depende principalmente del nivel de esfuerzo en el AR, el recubrimiento mecánico y la separación entre barras de AR longitudinal a tensión.
9. La cantidad de grietas depende principalmente del recubrimiento mecánico, el diámetro del AR y la separación entre barras de AR longitudinal a tensión.
10. Estudios han demostrado que la cantidad de grietas tiene un mayor efecto en el nivel de corrosión que el ancho de grieta.
11. En traveses con corrosión, se observó que existe desprendimiento del recubrimiento asociado a esfuerzos de tensión en el concreto generados por la acumulación de herrumbre. Por su parte, dicho desprendimiento genera una reducción de la sección transversal de las traveses. Adicionalmente, la adherencia entre el AR longitudinal a tensión y el concreto se ve comprometida. Por tanto, se genera un efecto geométrico y del material que afecta el estado límite de servicio (aumento de anchos de grieta y deflexiones) del elemento analizado.
12. En traveses donde se estudió el efecto de la corrosión, se observó que al aumentar dicho nivel de corrosión, existe reducción del diámetro del AR longitudinal a tensión. Por tanto, su resistencia a flexión disminuye.
13. Existe solo una investigación donde una de las variables de estudio fue la separación del AR transversal (Rodríguez et al., 1997). Se observó que este refuerzo es más propenso a una corrosión severa. El nivel de corrosión final depende de la separación del AR. Por tanto, a medida que la separación disminuye, el riesgo de corrosión aumenta.
14. También se observó que la corrosión en el AR transversal afecta significativamente el comportamiento de traveses de CR debido a que se puede inducir un cambio de una falla por flexión a una falla por cortante.
15. Para los trabajos en donde se induce la corrosión mediante ciclos de mojado y secado no se monitorearon los parámetros de corrosión. Por tanto, se requiere

hacer una comparación entre parámetros de corrosión y los resultados finales de niveles de corrosión.

16. Se ha estudiado el comportamiento estructural de traveses con y sin corrosión. Dichas traveses fueron sometidas a cargas sostenidas y ensayadas hasta la falla. Existen pocos trabajos en donde la corrosión se induce bajo cargas sostenidas. Para estos casos, la corrosión se propaga principalmente en la zona de agrietamientos asociados a una carga aplicada.

## **CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA**

En este capítulo se presenta la metodología desarrollada para lograr los objetivos planteados. Las actividades desarrolladas fueron:

1. Recopilación de información de traves de CR
2. Control de cargas sostenidas en traves de CR
3. Medición de parámetros de corrosión de traves de CR
4. Obtención de contenido de iones libres de cloruro en traves de CR
5. Evaluación del efecto ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión en traves de CR
6. Evaluación del efecto de los factores climáticos en el comportamiento electroquímico de barras de AR longitudinal a tensión y del concreto

### **3.1 Recopilación de información de traves de CR**

Este trabajo forma parte del proyecto “Comportamiento de traves de concreto reforzado con corrosión”. La primera etapa de dicho proyecto fue desarrollada por León Chablé (2017) y Arceo Miquel (en proceso). Se cuentan con 16 traves de CR. Los datos sobre las características de las traves estudiadas en este trabajo, así como la medición inicial de parámetros de corrosión corresponden a los reportados por León y Arceo.

#### **3.1.1 Características de traves de CR**

León y Arceo evaluaron la evolución de la corrosión en las 16 traves de CR. La variable de estudio fue el diámetro del acero de refuerzo longitudinal a tensión. Se consideraron diámetros de 10 y 13 mm. Las dimensiones de las traves fueron de 15x30x350 cm (base x peralte x longitud).

La resistencia específica de diseño a compresión axial del concreto fue de 280 kg/cm<sup>2</sup>. Dicha resistencia corresponde a un concreto Clase I de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto

(NTCC, 2004). La resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad del concreto fueron de  $276 \text{ kg/cm}^2$  y de  $184,521 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente. El promedio de contenido de iones de cloruros libres en el concreto fue de 0.015% por peso del cemento. Por su parte, la porosidad efectiva promedio del concreto fue de 12.25%.

### 3.1.2 Diseño de traveses de CR

Se realizó el diseño estructural por flexión y cortante de las traveses. El diseño por flexión se realizó utilizando las hipótesis fundamentales de la flexión. Se consideró una resistencia especificada a compresión axial de  $280 \text{ kg/cm}^2$ . El módulo de elasticidad promedio del concreto fue de  $184563 \text{ kg/cm}^2$ . El AR longitudinal a tensión consistió en dos barras corrugadas. La resistencia nominal a la fluencia de dichas barras fue de  $4544 \text{ kg/cm}^2$  (Prieto, 2015). El AR transversal consistió en barras lisas de 6 mm de diámetro. La resistencia nominal de fluencia fue de  $2320 \text{ kg/cm}^2$ . El diseño por cortante se realizó con base en los requisitos de las NTCC (2004). Se seleccionó la cantidad de AR longitudinal y transversal para inducir una falla por flexión. La falla esperada en las traveses es el aplastamiento del concreto. Las cantidades de acero y la distribución del acero refuerzo longitudinal y transversal de las traveses se presentan en la Figura 3.1 y la Figura 3.2. Las cantidades del AR longitudinal a tensión en las traveses corresponden al 24% ( $\rho = 0.0036$ ) y 43% ( $\rho = 0.0064$ ) de la máxima ( $\rho_{max} = 0.015$ ) especificada en las NTCC (2004) para traveses de CR. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en el AR y el concreto se utilizaron los modelos constitutivos de Rodríguez y Botero (1997) y Kent y Park modificado (1982), respectivamente. Se obtuvo el diagrama momento-curvatura para las traveses (Figura 3.3 y Figura 3.4), donde: el momento de fluencia de las traveses con AR por flexión de 10mm y 13mm de diámetro fue de 156,037 kg-cm y 270,297 kg-cm, respectivamente. La ductilidad de curvatura de las traveses con AR de 10mm y 13mm de diámetro fue de 10.91 y 6.33, respectivamente.

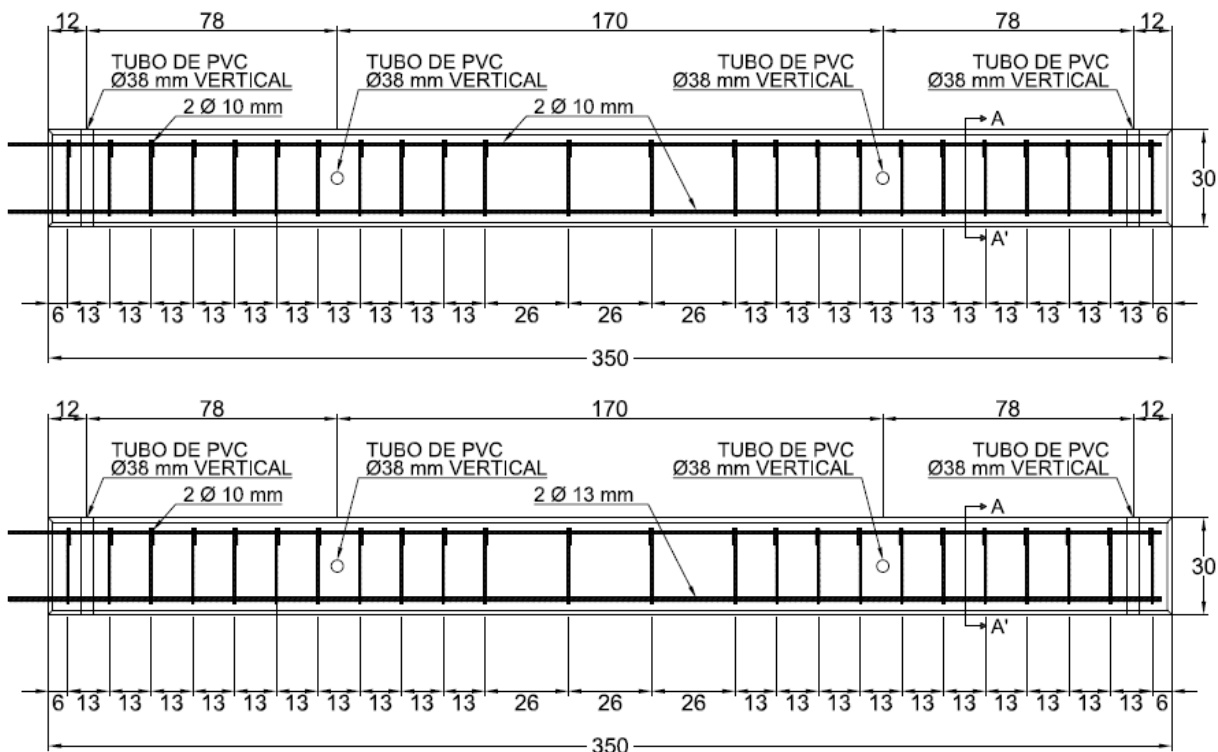


Figura 3.1 Detalle longitudinal de AR en traves con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm

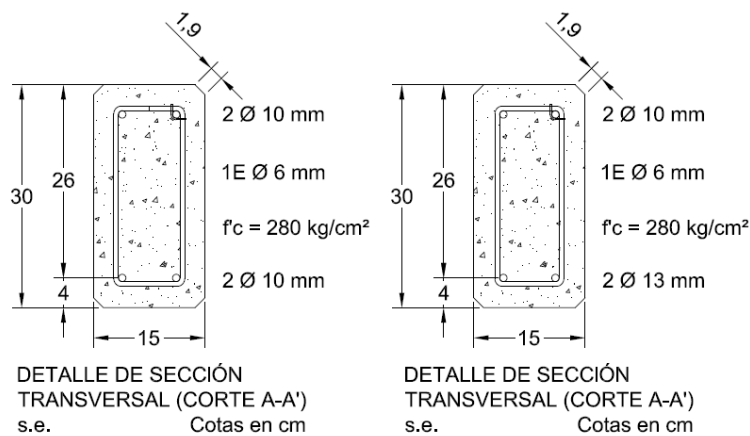


Figura 3.2 Sección transversal de traves con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm

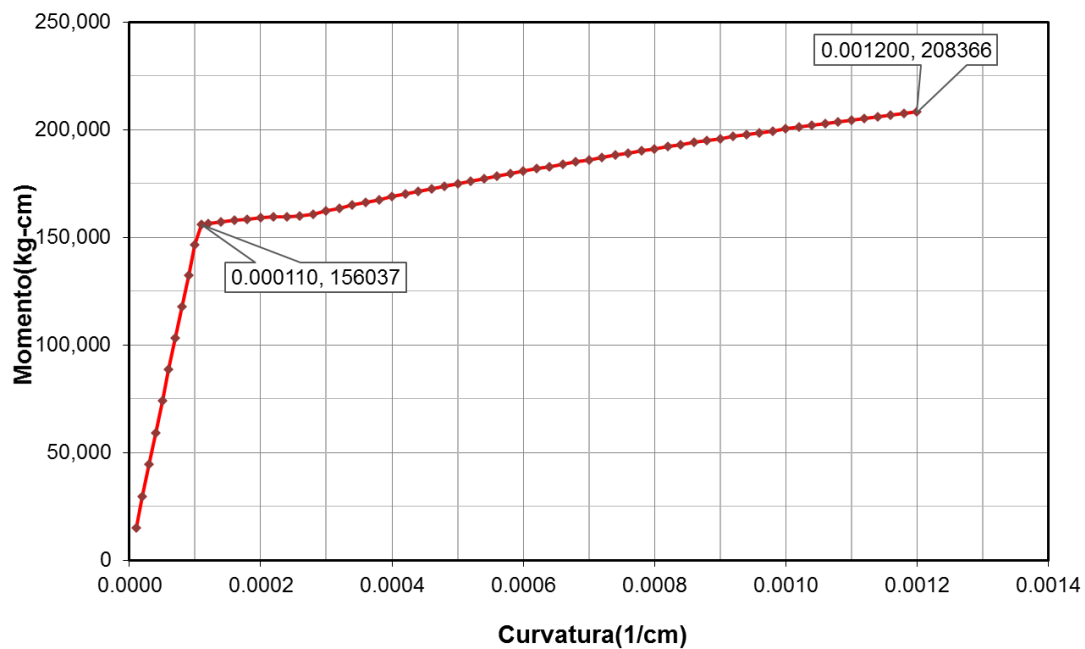


Figura 3.3 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 10 mm de diámetro

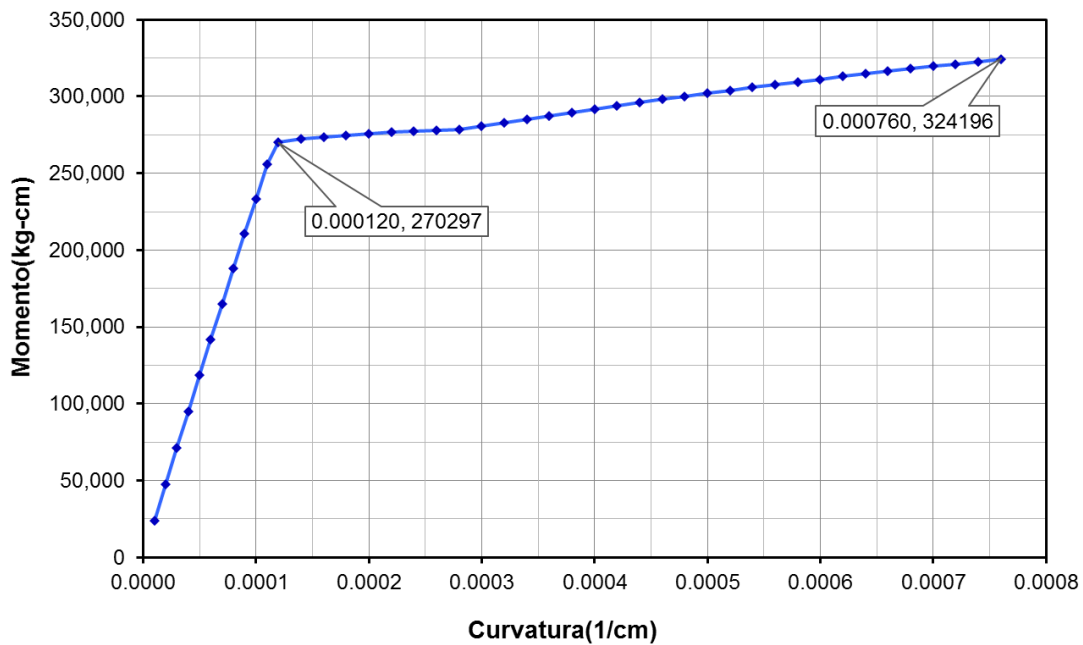


Figura 3.4 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 13 mm de diámetro

Para estudiar el comportamiento a flexión de las traves se planteó un sistema de cargas en cuatro puntos (Figura 3.5). Se consideraron cargas puntuales ( $P/2$ ) equidistantes a los apoyos. Con dicho sistema de carga se garantiza una zona de cortante nulo y flexión pura (Figura 3.6 y Figura 3.7).

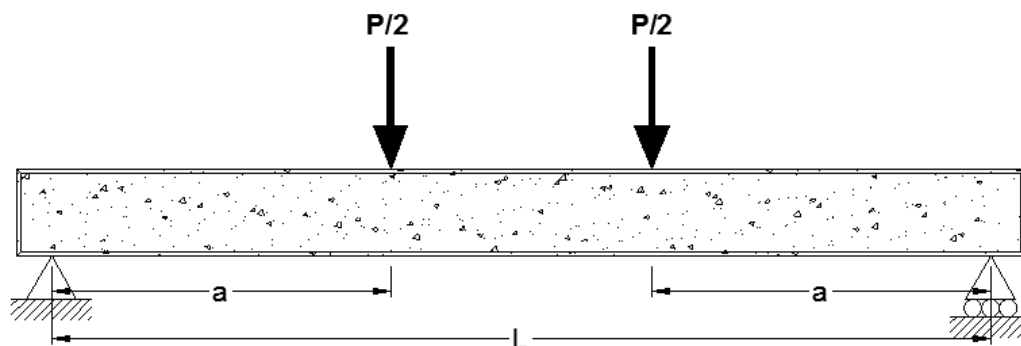


Figura 3.5 Sistema de carga en cuatro puntos

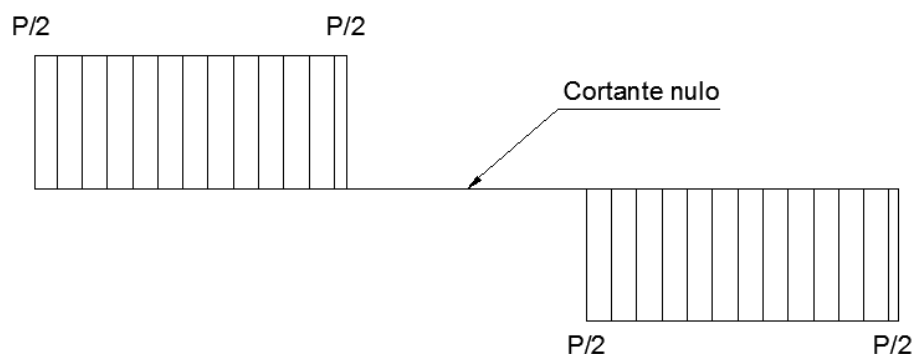


Figura 3.6 Diagrama de fuerzas cortantes

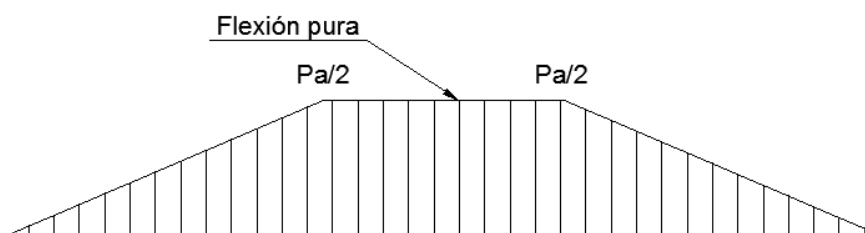


Figura 3.7 Diagrama de momentos flexionantes

### 3.1.3 Construcción de traves de CR

Durante la construcción de las traves de CR, las barras AR longitudinal a compresión y el AR transversal se recubrieron con esmalte alquidálico (aislante electroquímico). Se utilizaron sujetadores de plástico para unir el AR transversal al longitudinal. Se

colocó cinta aislante en cada zona de contacto entre el refuerzo longitudinal, el AR transversal y los sujetadores de plástico (Figura 3.8). Dichas precauciones fueron necesarias para aislar electroquímicamente el AR longitudinal a compresión y el AR transversal.



Figura 3.8 Aislamiento de AR longitudinal del transversal

### 3.1.4 Ensayo preliminar de traveses

Previo a la aplicación de la carga sostenida, las traveses se ensayaron utilizando un sistema de cargas en cuatro puntos (Figura 3.5). Dicho ensayo se realizó 150 días después de la construcción. Para el ensayo preliminar se aplicaron cargas incrementales hasta el 60 % de la carga asociada al momento de fluencia de las traveses. Se midieron los desplazamientos verticales al centro del claro de las traveses. Se obtuvo la curva carga – desplazamiento (Figura 3.9 y Figura 3.10) mediante el uso de celdas de carga, potenciómetros lineales y un sistema de adquisición de datos. Finalmente, se descargaron las traveses y se registraron los desplazamientos residuales.



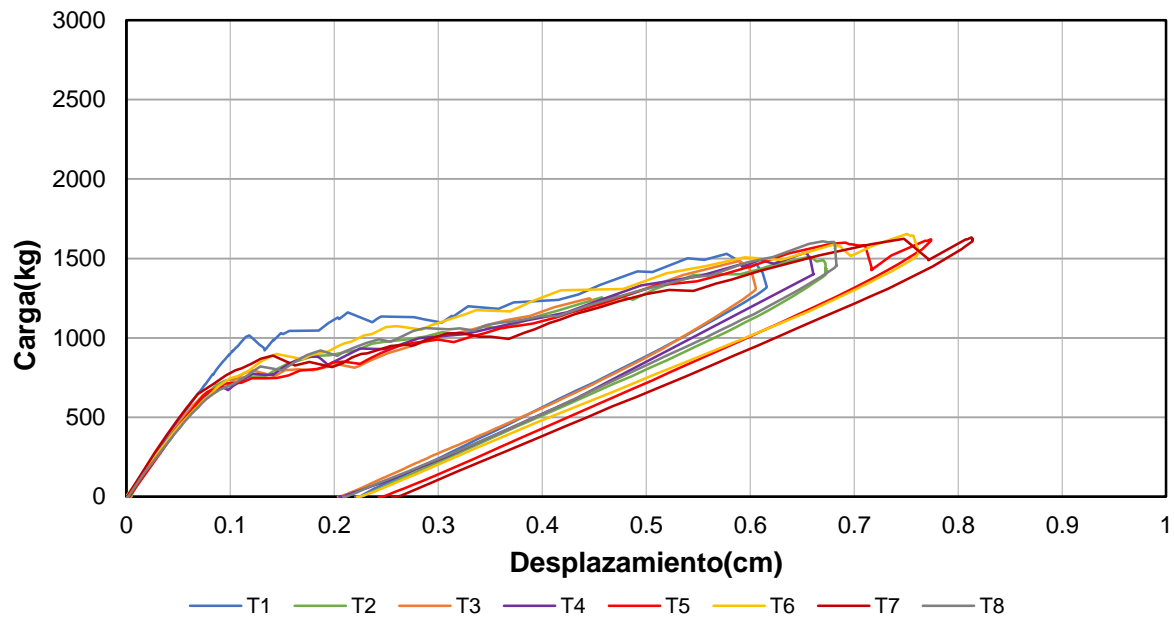


Figura 3.9 Curva carga – desplazamiento para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

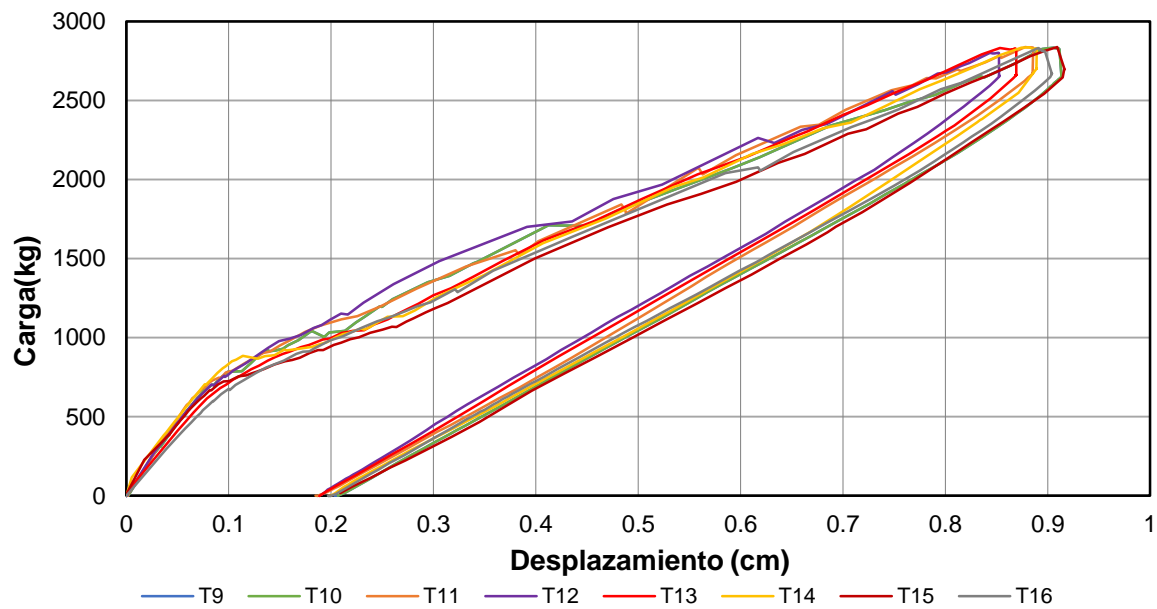


Figura 3.10 Curva carga – desplazamiento para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

### 3.1.5 Monitoreo previo de los parámetros de corrosión

Las mediciones de resistividad eléctrica del concreto fueron realizadas del día 0 al 105 con un equipo modelo Resipod marca PROCEQ. A partir del día 133 al 197 se midió la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica del concreto con el equipo GECOR6 (Corrosion rate meter LG-ECM-06) de la marca NDT James Instruments. De la Figura 3.11 a la Figura 3.16 se presentan los resultados de mediciones de las velocidades de corrosión, potenciales de corrosión y resistividad eléctrica del concreto para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente.

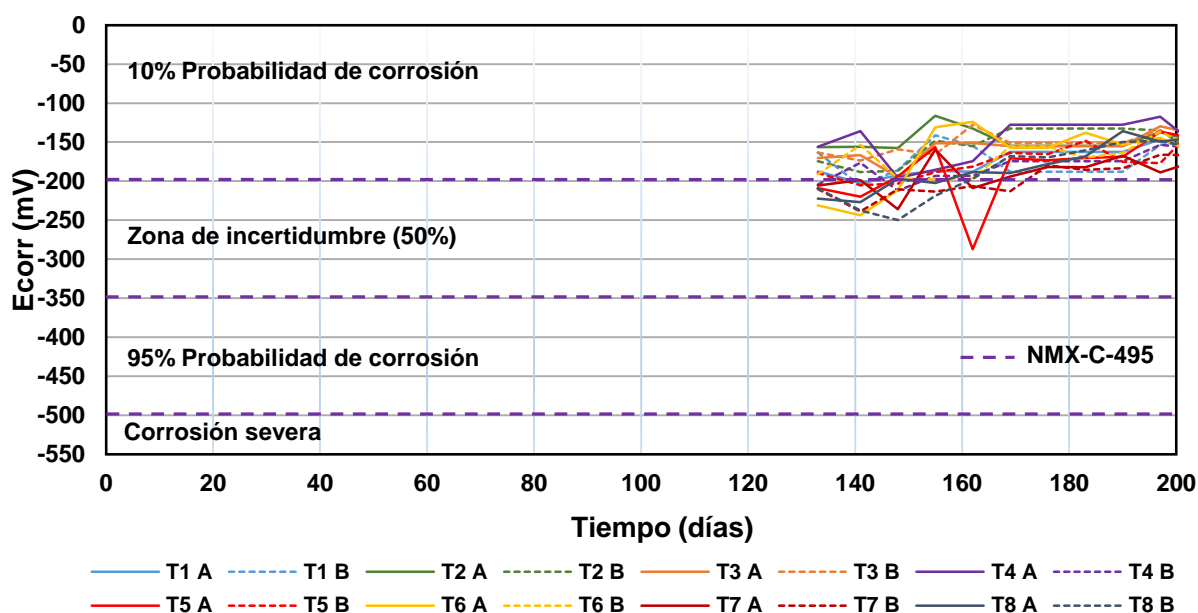


Figura 3.11 Potenciales de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

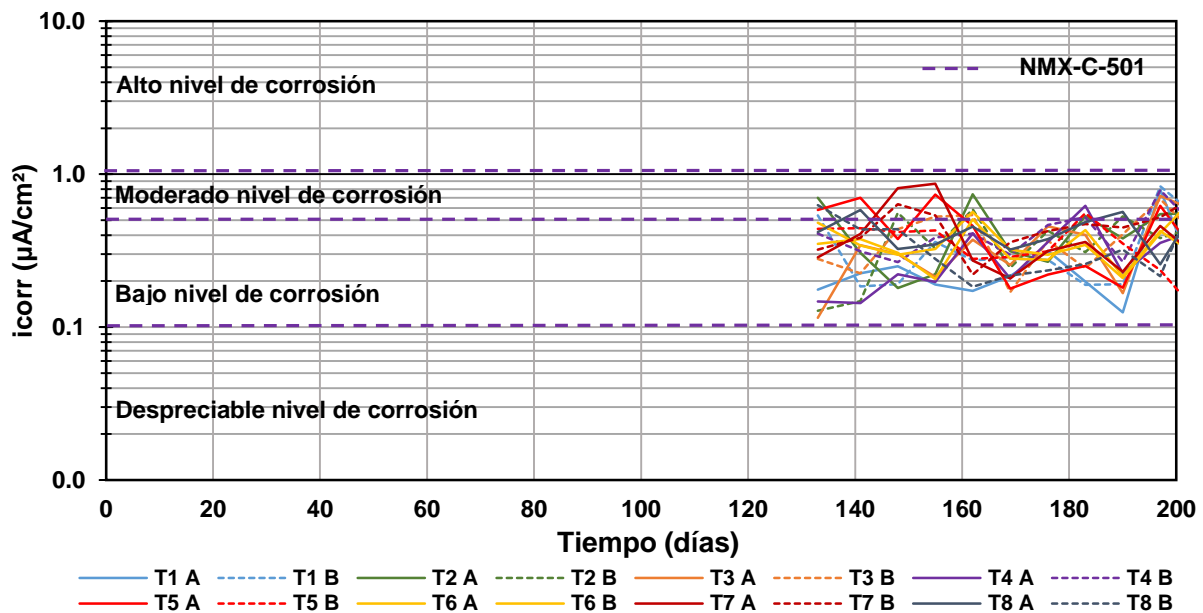


Figura 3.12 Velocidades de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

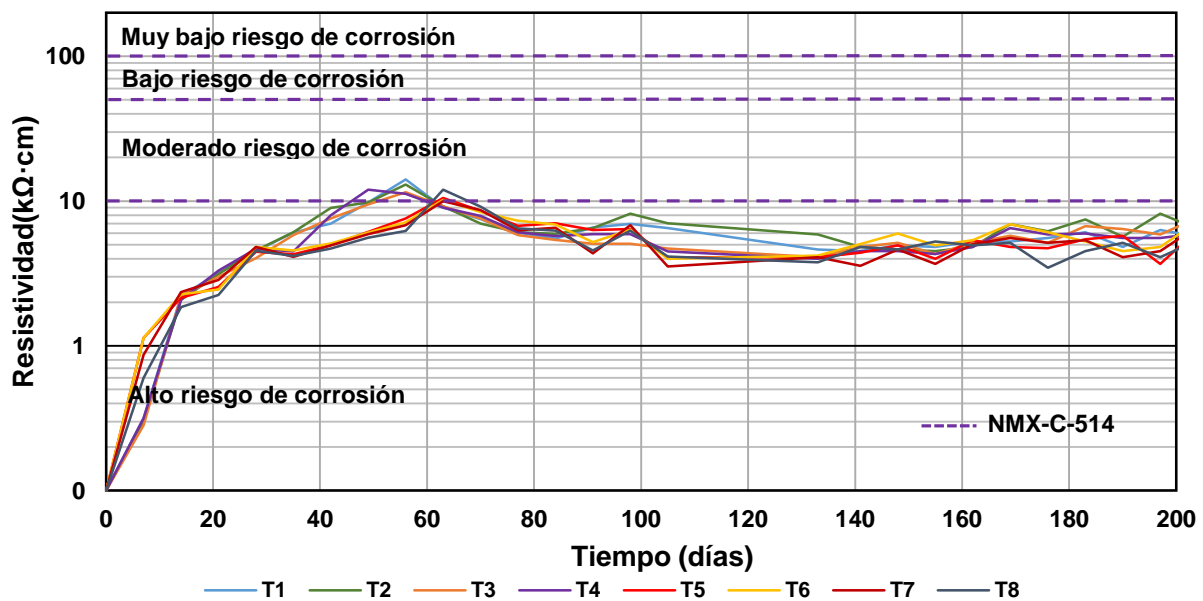


Figura 3.13 Resistividad eléctrica del concreto en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

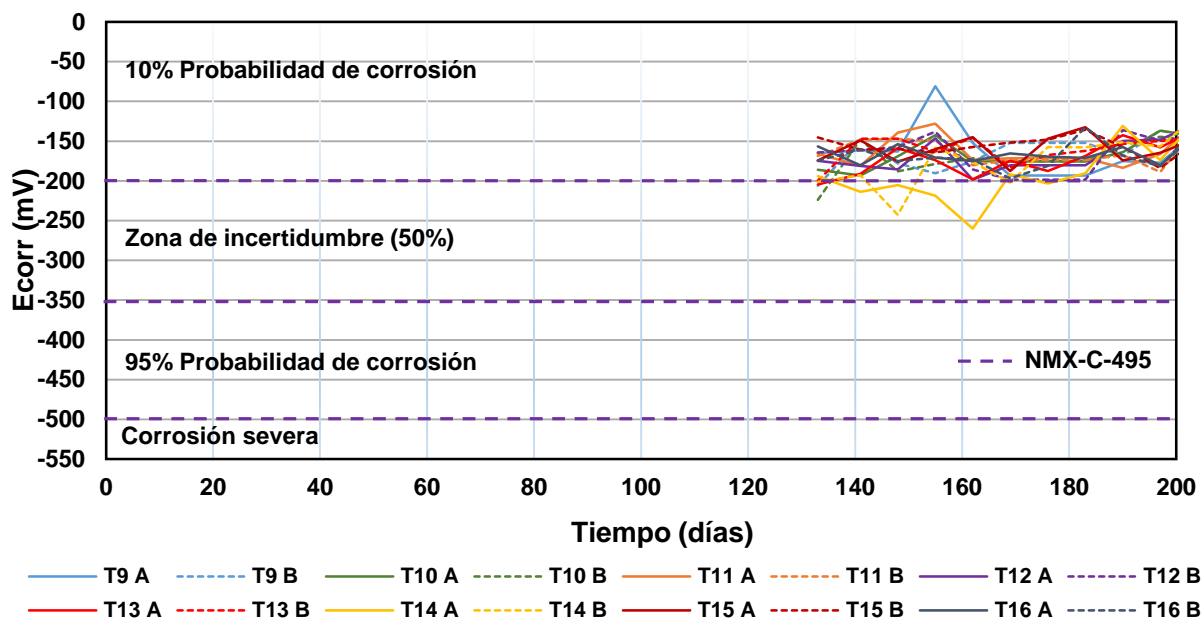


Figura 3.14 Potenciales de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

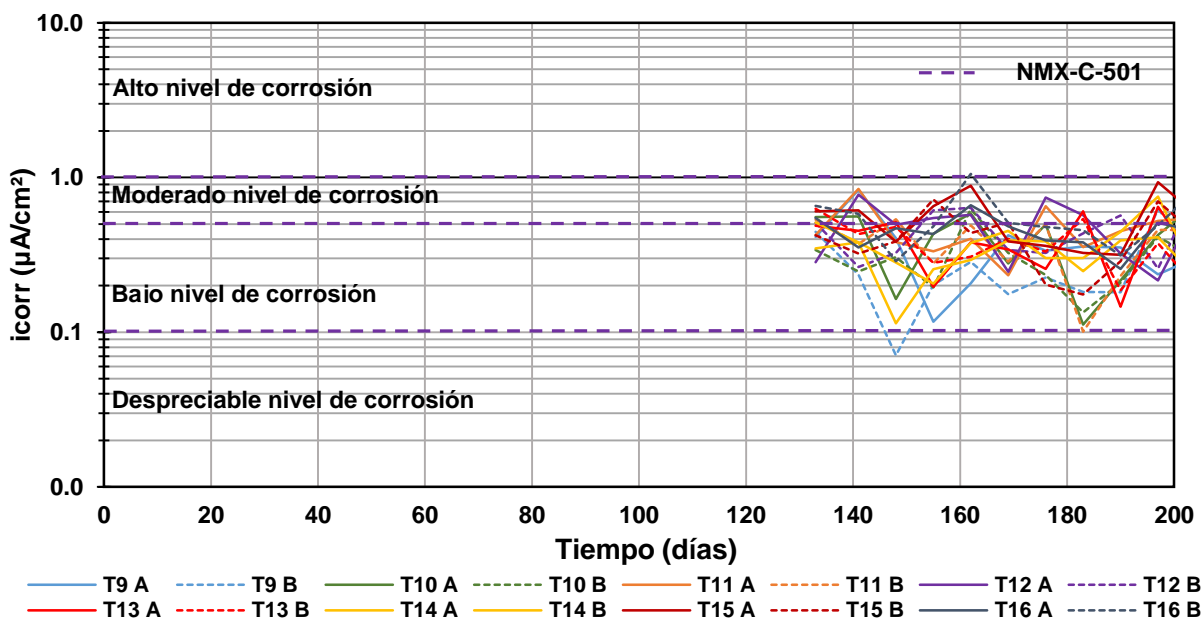


Figura 3.15 Velocidades de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

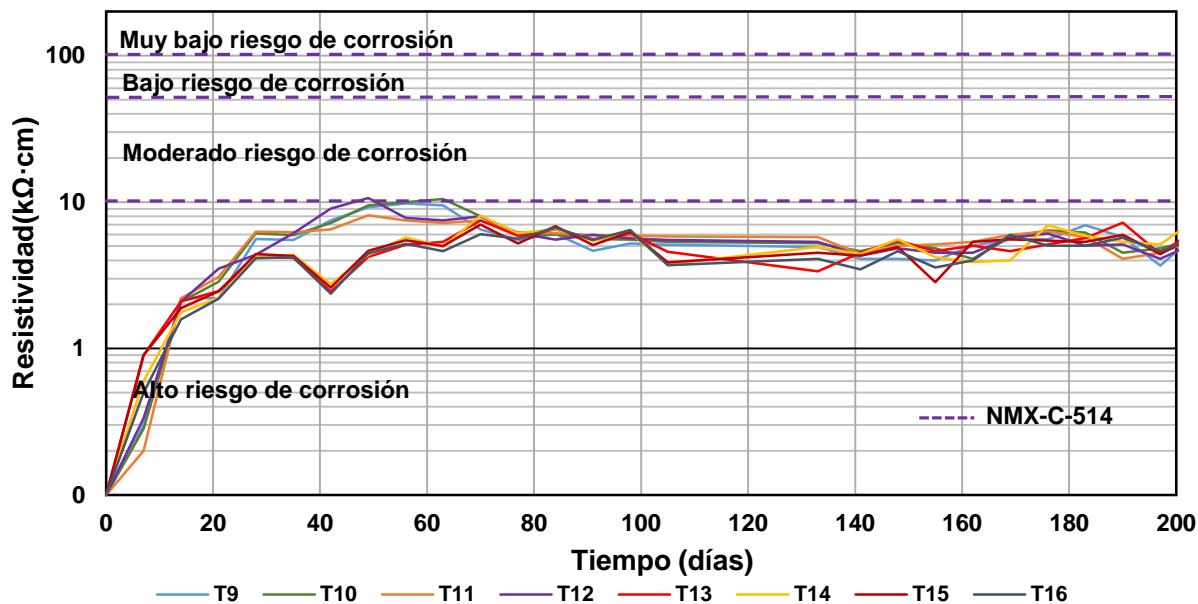


Figura 3.16 Resistividad eléctrica del concreto en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

### 3.2 Control de cargas sostenidas en traveses de CR

Para la aplicación de cargas sostenidas se utilizó un sistema de cuatro puntos, las traveses fueron colocadas en pares, una sobre otra (Figura 3.17). Dicho sistema consistió en dos barras roscadas de 13mm de diámetro, cuatro tuercas (13mm), cuatro placas de acero de 100x100x10 mm (longitud x ancho x espesor) y dos apoyos de acero. Los apoyos metálicos utilizados consistieron en placas y barras redondas de acero que permiten la rotación. A las barras roscadas se les aplicó una carga de tensión que indujera el 60% del esfuerzo de fluencia del AR longitudinal a tensión. Dicha tensión se aplicó utilizando dos silletas de acero y dos actuadores hidráulicos marca Enerpac con capacidad de 10,000 kg. Las silletas consistieron, de una placa metálica (100x100x10 mm, lado x lado x espesor) y barras lisas metálicas (13x250 mm, diámetro x largo) (Figura 3.18).

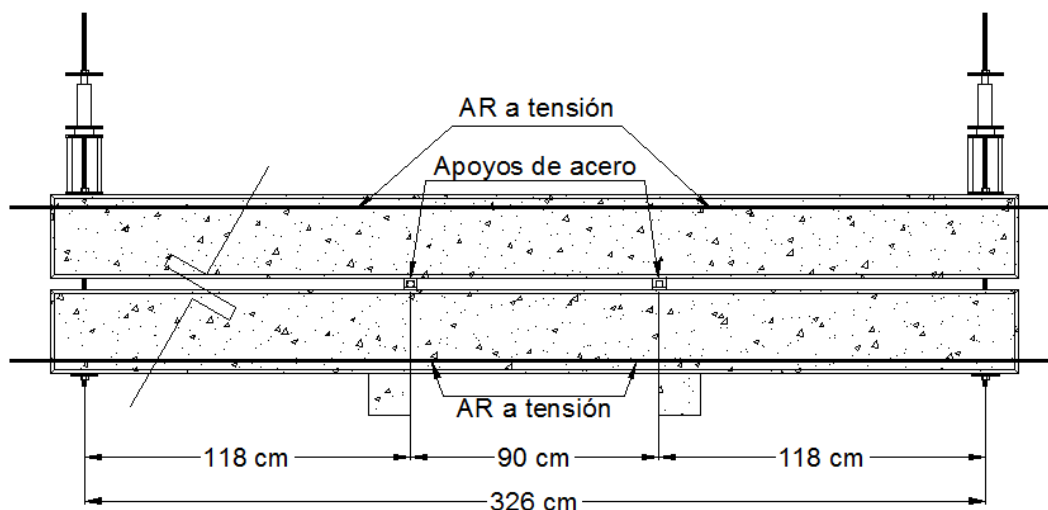


Figura 3.17 Sistema de cargas sostenidas



Figura 3.18 Silletas metálicas

La tensión en las barras roscadas se monitoreó utilizando dos celdas de carga marca Sensotec (CC-1 y CC-2) con capacidad de 4,535 kg. Para la verificar las cargas aplicadas en las celdas se empleó un transductor de presión marca Sensotec con capacidad de 703.07 kg/cm<sup>2</sup>. Para mantener la tensión en las barras roscadas se colocó una placa de 100x100x10 mm y una tuerca de 13 mm en cada uno de los extremos de las barras roscadas. Detalles del sistema para la aplicación de cargas sostenidas y la preservación del postensado se presentan en la Figura 3.19.

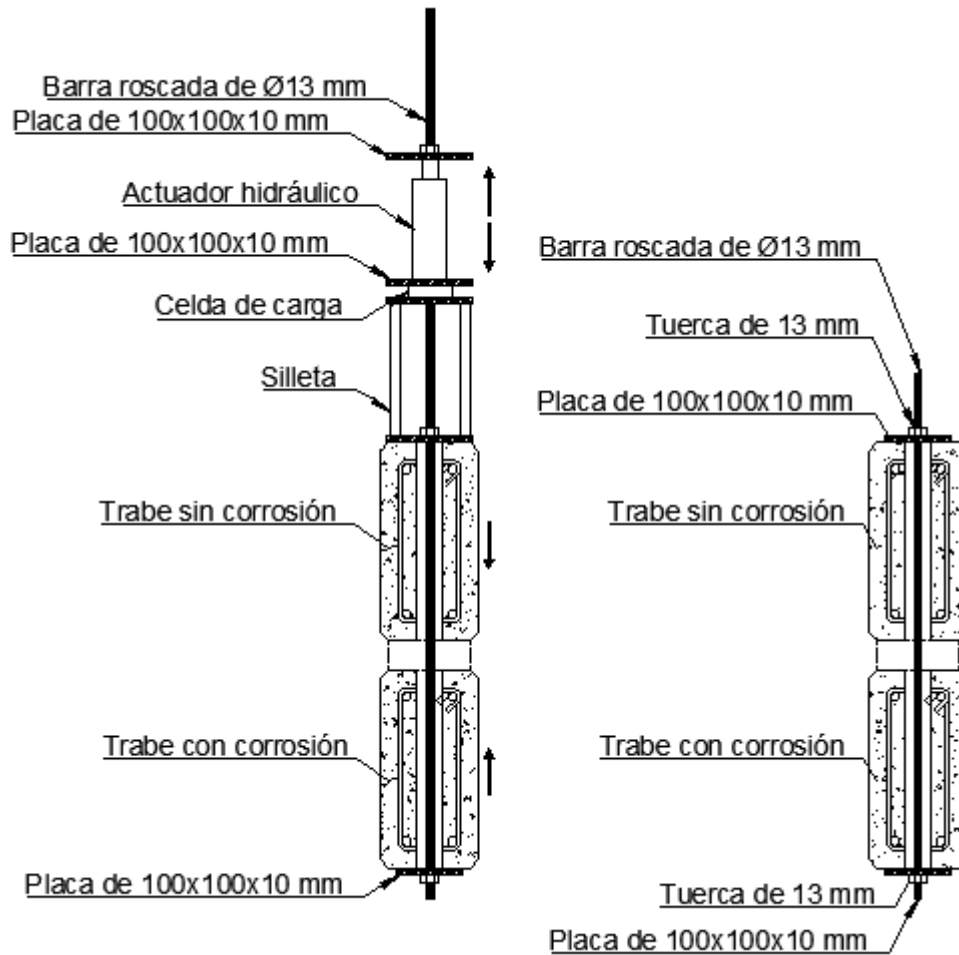


Figura 3.19 Detalle de aplicación (izquierda) y conservación (derecha) de las cargas sostenidas

Para el registro de las cargas se utilizó un sistema de adquisición de datos marca National Instruments, el cual consiste en:

- 1 Chasis SCXI-1000
- 1 Modulo 1520
- 1 Bloque Terminal SCXI-1314
- 1 Tarjeta DAQCard-6024E
- 1 Computadora portátil

Para realizar el control de cargas sostenidas se aplicaron cargas sostenidas a las traves con el sistema descrito anteriormente. La carga sostenida se aplicó a los 190 días respecto de la fabricación de las traves. Las cargas se aplicaron en incrementos

graduales hasta generar un momento asociado al 60% de la fluencia del AR longitudinal a tensión. Se verificaron las cargas sostenidas el día 520 respecto al día de construcción de las traveses. Dicho control, se realizó nuevamente el día 597. En la Figura 3.20 se presenta el esquema de colocación de celdas de carga. Los valores de carga P (Figura 3.5) para generar el 60% de momento de fluencia fueron de 1600 kg para traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y 2800 kg para traveses con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro. Para el cálculo de la pérdida de carga se tomaron los valores correspondientes de carga asociadas al momento de fluencia (1600 y 2800 kg) como referencia y se compararon con los valores de carga en las traveses al momento de realizar el control de cargas sostenidas. Se registraron las pérdidas de carga por pares de traveses y dichas pérdidas se expresaron en porcentajes.



Figura 3.20 Colocación de sistema de postensado

### 3.3 Medición de parámetros de corrosión de traveses de CR

Se continuaron midiendo los parámetros de corrosión con el equipo Gecor6 (velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad) a partir del día 204. Dichas mediciones se continuarán hasta finalizar el tiempo de este trabajo de investigación.



Los pasos realizados para las mediciones con el equipo Gecor6 (Figura 3.21) fueron los siguientes:



Figura 3.21 Equipo Gecor6

1. Las trabes se mojaron con agua potable durante 15 minutos aproximadamente. Lo anterior, para saturar con agua los poros de las trabes, lo cual garantiza una adecuada conductividad para la medición de los parámetros de corrosión. Adicionalmente, se colocó una toalla húmeda entre el plato sensor y el concreto para garantizar el contacto entre los sensores y el elemento medido.
2. Se realizó la toma de lecturas con el equipo Gecor6 en el centro del claro de las trabes (Figura 3.22) de CR utilizando un sensor de disco. Debido a que las trabes se encuentran agrietadas, se evitó colocar el sensor sobre alguna grieta para evitar tener errores de lectura asociados a la discontinuidad del medio conductor (en este caso es el concreto).

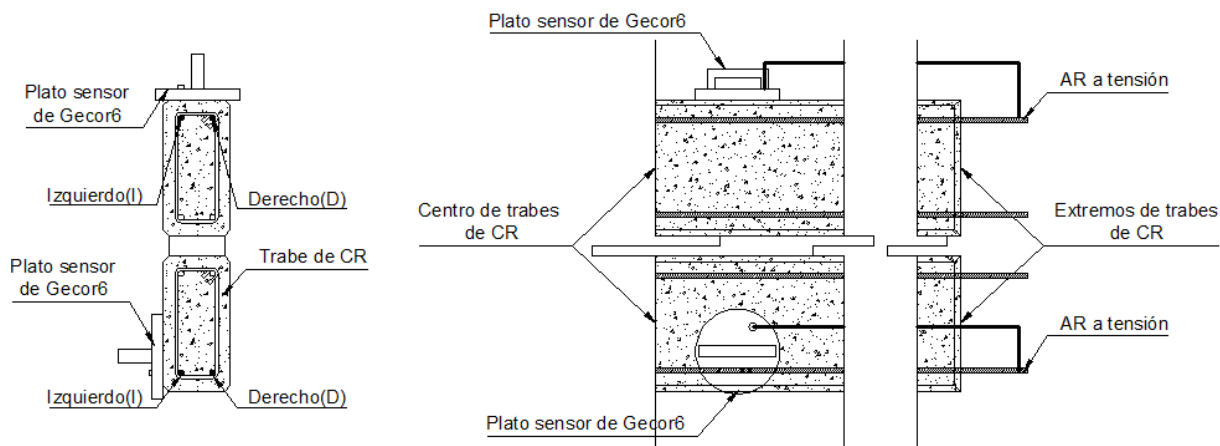


Figura 3.22 Esquema de medición de los parámetros de corrosión en centros de traves de CR

- Se realizó la medición de lecturas con el equipo Gecor6 en los extremos de las traves (Figura 3.23) de CR. Dichas lecturas se tomaron en el primer octavo y último octavo de la longitud de traves de CR. Esto se realizó debido a que, al no presentarse grietas en los extremos, las lecturas de los parámetros de corrosión en el concreto se asumieron sin alteración alguna y que la penetración de cloruros sólo dependerá de su porosidad.

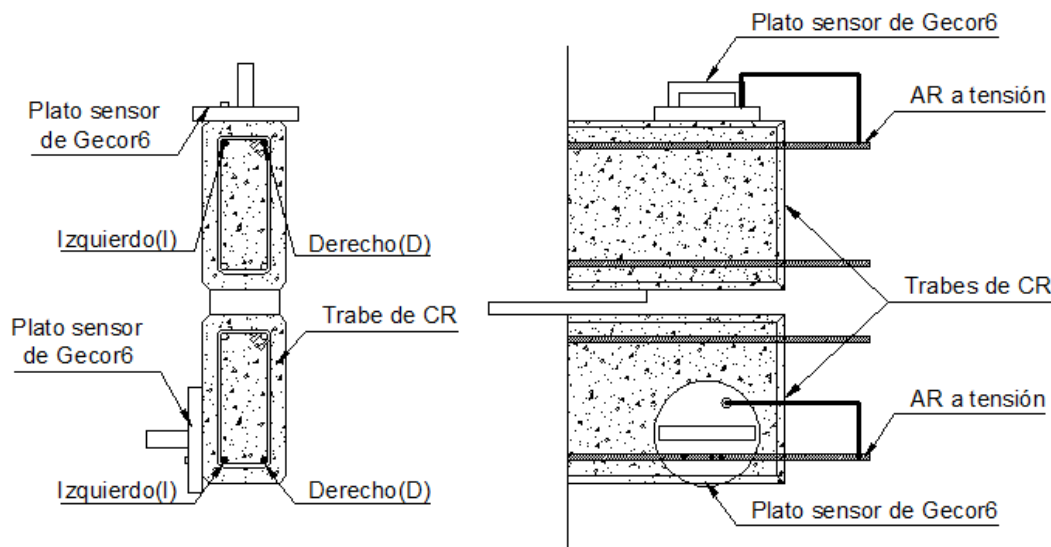


Figura 3.23 Esquema de medición de los parámetros de corrosión en extremos de traves de CR

4. Se calculó la resistividad eléctrica del concreto realizando la conversión de la resistencia del concreto obtenida con el Gecor6 resolviendo la ecuación 3.1

$$\text{Resistividad eléctrica} = 2 * R * D$$

Ecuación 3.1

Donde:

R Es la resistencia eléctrica obtenida con el Gecor6.

D Es el diámetro del contra-electrodo del sensor (10.5 cm).

### **3.4 Obtención del contenido de iones libres de cloruro en trabes de CR**

Se estudiaron los cambios en los perfiles de cloruros a través del tiempo considerando el ancho de grieta y el efecto del mojado semanal debido a los monitoreos realizados para la medición de los parámetros de corrosión. Se evaluó el contenido de iones de cloruro libres en trabes de CR en dos etapas. La primera etapa consistió en realizar la extracción de polvos de concreto endurecido el día 479 respecto a la fabricación de las trabes. La ubicación de las perforaciones para la extracción de polvos se consideró en el centro de las trabes. Para esta etapa las perforaciones se realizaron en zonas donde no existiera agrietamiento en el concreto. La segunda etapa se realizó el día 686 respecto a la fabricación de las trabes. El criterio de extracción en esta etapa se estableció considerando el ancho de grieta y el efecto del mojado semanal de trabes para la realización de lecturas de parámetros de corrosión.

#### **3.4.1 Ubicación e identificación de longitud y ancho de grieta**

Se determinó la ubicación, longitud y ancho de grietas para las trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro. El equipo utilizado para ubicar la posición y medir la longitud de agrietamiento fue un flexómetro. El equipo utilizado para medir los anchos de grieta fue un microscopio de la marca Elcometer Instruments Ltd modelo PEAK (Figura 3.24 Medición del ancho de grietas en trabes de CR Figura 3.24).



Figura 3.24 Medición del ancho de grietas en traves de CR con microscopio

Una vez obtenidos los anchos de grieta (Figura 3.25) se identificaron aquellos que fueron los más representativos. Por tanto, los anchos de grieta evaluados en este trabajo fueron 0.15 mm, 0.1 mm y 0 mm.



Figura 3.25 Vista de grieta medida con el microscopio

### 3.4.2 Extracción de polvos de concreto endurecido y cálculo de porcentaje de cloruros en traveses de CR por ancho de grieta

Para una correcta recopilación de las lecturas de los parámetros de corrosión es necesario humedecer las traveses. Por tanto, se evaluó el efecto de humedecer dichas traveses en el tiempo de duración de esta investigación. El criterio utilizado para la extracción de polvos de concreto endurecido se estableció en la identificación de los anchos de grieta dominantes y el área de humedecimiento en contacto con las grietas. En la Figura 3.26 se presenta el patrón de agrietamiento por flexión de una trabe de CR y la zona influenciada por la humedad (área achurada). Por su parte, la zona influenciada por humedecimiento se consideró una longitud de 50 cm y se ubicó en el centro del claro de las traveses

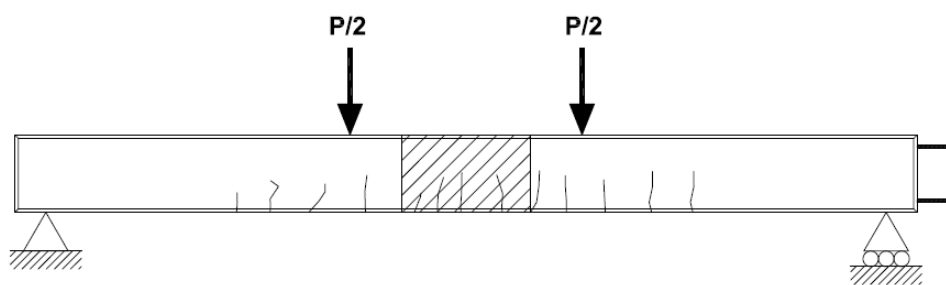


Figura 3.26 Patrón de agrietamiento y zona de influencia por humedad en traveses de CR

Para la obtención del contenido de iones libres de cloruro en el concreto se extrajeron muestras de polvos de concreto endurecido de acuerdo con la norma NMX-C-523-ONNCCE-2016 (2016). Dichas muestras se extrajeron con un roto martillo y una broca de 1" de diámetro. Las perforaciones se realizaron a profundidades de 1, 2, 3 y 4 cm. Dichas perforaciones se realizaron al centro del claro de la trabe y a una distancia que no interfiera en su comportamiento a flexión (por debajo del eje neutro). La distancia anteriormente mencionada se obtuvo analizando los cambios de profundidad del eje neutro durante la aplicación de la carga hasta la falla mediante un análisis de momento-curvatura. La perforación se realizó hacia el lecho inferior de la trabe evitando hacer contacto con la barra de AR longitudinal a tensión. Las muestras se tomaron de una

cara lateral de las trabes de CR. El esquema para la perforación de las trabes se presenta en la Figura 3.27.

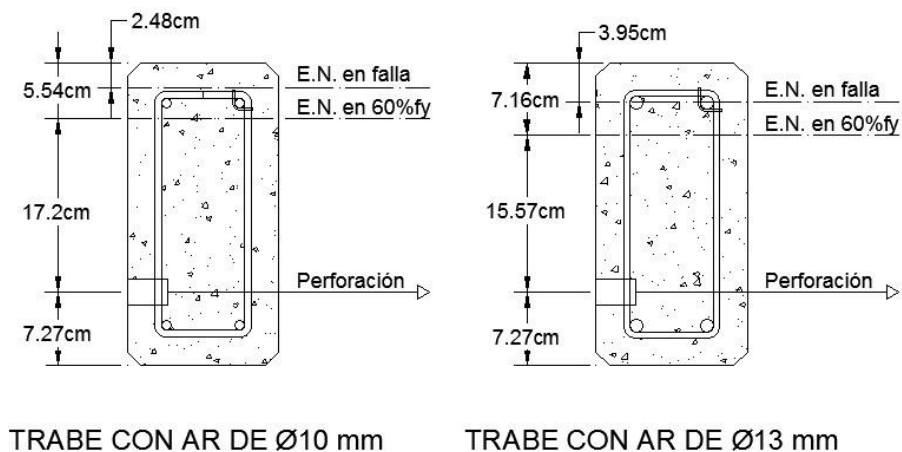


Figura 3.27 Esquema de perforación de trabes de CR

Los polvos obtenidos en las muestras fueron analizados por el método del ion selectivo de acuerdo con la norma NMX-C-523-ONNCCE-2016 (2016). El contenido de iones de cloruro libres de las soluciones obtenidas con los polvos se determinó con el equipo Conductronic (Figura 3.28).



Figura 3.28 Determinación del contenido de cloruros libres en muestras de polvo con el equipo Conductronic

Se resanaron las trabes con mortero estructural Tipo 1 (Figura 3.29). La relación volumétrica de dicho mortero fue de 1:3 (cemento Portland: arena). La resistencia a compresión axial del mortero (Figura 3.30) se determinó de acuerdo con la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014 (2014).



Figura 3.29 Resane de trabe perforada con mortero 1:3



Figura 3.30 Prueba de resistencia a compresión axial de mortero 1:3

### 3.5 Evaluación del efecto del ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión en traveses de CR

Se comparó el ancho y distancia entre grietas para las traveses de CR con modelos teóricos de agrietamiento. Las ecuaciones de los modelos teóricos utilizados para determinar el ancho de grieta máximo probable en las traveses se presentan en la Tabla 2.9. Por otra parte, las ecuaciones de los modelos teóricos utilizados para determinar la separación media entre grietas se presentan en la Tabla 2.10. Únicamente se consideraron los agrietamientos en zonas donde se rebasa la resistencia a tensión por flexión del concreto. Se consideró una longitud agrietada. Dicha longitud se asumió con el momento de agrietamiento de la sección transformada de la trabe y el diagrama de momentos asociado a las cargas sostenidas (Figura 3.31).

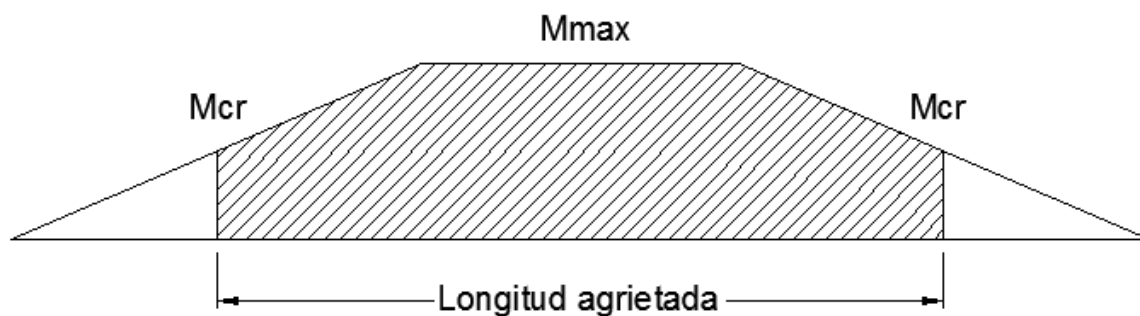


Figura 3.31 Longitud agrietada de las traveses

Se definieron tres zonas de agrietamiento; dos donde el esfuerzo en el AR longitudinal varía linealmente (zona A y C) y una donde el esfuerzo es constante e igual que el 60% de  $f_y$  (zona B) (Figura 3.32). Lo anterior se debió a que los modelos utilizados para calcular el ancho de grieta máximo probable consideran que la variable más relevante es el nivel de esfuerzo en el AR longitudinal a tensión. Por tanto, se consideraron las variaciones de dichos esfuerzos en los modelos analíticos. Se consideró dicha variación en términos de longitud para poder comparar los agrietamientos teóricos y reales a lo largo de las traveses de CR. Los agrietamientos analíticos se compararon con los correspondientes experimentales. Se calculó un ancho de grieta promedio para las zonas A, B y C, respectivamente.



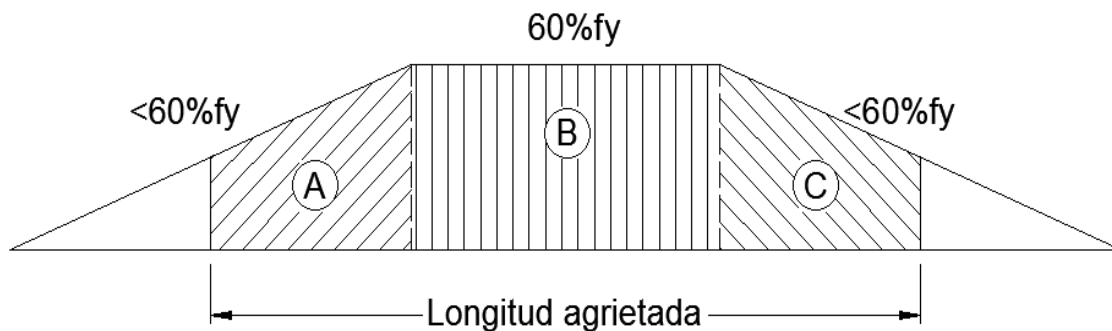


Figura 3.32 Secciones consideradas en el análisis de volúmenes de agrietamiento en traves de CR

Se evaluó el efecto del volumen de agrietamiento en el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Dicho análisis se realizó considerando los valores promedios por trabe de la velocidad de corrosión y potencial de corrosión el día de la medición de las grietas (día 730). Se consideró el efecto del ancho, longitud y cantidad de grietas. Por tanto, las cantidades se presentan en términos de volumen de agrietamiento. Por su parte, dichos volúmenes están expresados en unidades de  $\text{mm}^3$ . Se proponen dos formas para determinar el volumen de agrietamiento. Para el primer caso ( $V_{g1}$ ), se consideró el ancho de grieta ( $W_{cr}$ ), una longitud de grieta unitaria y la cantidad de grietas ( $n$ ). Para el segundo caso ( $V_{g2}$ ) se consideró el ancho de grieta ( $W_{cr}$ ), longitud de grieta ( $L_{cr}$ ) y cantidad de grietas ( $n$ ).

### **3.6 Evaluación del efecto de los factores climáticos en el comportamiento electroquímico de barras de AR longitudinal a tensión y del concreto**

Se evaluó el efecto que tienen las condiciones climáticas en el comportamiento de los parámetros de corrosión a través del tiempo. Los datos de dichas condiciones fueron obtenidos de la estación meteorológica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN – Unidad Mérida (CINVESTAV). Se realizaron gráficas comparativas de los parámetros de corrosión (velocidad, potencial y resistividad) contra la humedad relativa, la temperatura y la precipitación, respectivamente.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Se presentan resultados de:

1. Resistencia a compresión axial del mortero
2. Control de cargas sostenidas en traves de CR
3. Parámetros electroquímicos de corrosión de traves de CR
4. Contenido de iones libres de cloruro en traves de CR
5. Agrietamiento en traves de CR
6. Factores climáticos

### 4.1 Resistencia a compresión axial del mortero

En la Tabla 4.1 se presenta la resistencia a compresión axial del mortero con proporcionamiento por volumen 1:3 (Cemento Portland - Arena). La resistencia promedio fue de 217.72 kg/cm<sup>2</sup>. Dicho mortero fue utilizado para rellenar los agujeros realizados para la extracción de polvos de concreto. En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2017) se clasifican los morteros de acuerdo con su resistencia a compresión axial. La resistencia mínima especificada para morteros de uso estructural es de 125 kg/cm<sup>2</sup>. Por tanto, el mortero utilizado para resanar las traves de CR se clasifica como mortero de uso estructural.

Tabla 4.1 Resistencia a compresión axial promedio del mortero

<b>Cubo</b>	<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Cubo 1	215.3
Cubo 2	218.71
Cubo 3	219.16
<b>Promedio</b>	<b>217.72</b>
<b>CV</b>	<b>0.97%</b>

## 4.2 Control de cargas sostenidas en trabes de CR

En la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3 se presentan las pérdidas promedio de carga sostenida para las trabes con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores de pérdida en términos de carga y de porcentaje a los 520 días y a los 597 días respecto de la fabricación de las trabes. Los valores reportados corresponden a la suma de las cargas medidas en los dos puntos de aplicación de las cargas (Figura 3.17). El porcentaje de pérdida de carga (% pérdida) se calculó con la pérdida de carga y la carga asociada al 60% del esfuerzo de fluencia del AR longitudinal a tensión. Los valores iniciales de dichas cargas (60 % del esfuerzo de fluencia) fueron de 800 kg y 1400 kg para las trabes con AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm de diámetro, respectivamente.

Tabla 4.2 Pérdidas de carga en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

Trabes	520 días		597 días	
	Pérdida (kg)	% Pérdida	Pérdida (kg)	% Pérdida
T1-T2	100	12.50	125	15.63
T3-T4	170	21.25	50	6.25
T5-T6	150	18.75	115	14.38
T7-T8	225	28.13	75	9.38
<b>Promedio</b>		<b>20.16%</b>		<b>11.41%</b>
<b>CV</b>		<b>32.06%</b>		<b>38.32%</b>

Tabla 4.3 Pérdidas de carga en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

Traves	520 días		597 días	
	Pérdida (kg)	% Pérdida	Pérdida (kg)	% Pérdida
T1-T2	-	-	240	17.14
T3-T4	100	7.14	140	10.00
T5-T6	250	17.86	148.5	10.61
T7-T8	250	17.86	110	7.86
<b>Promedio</b>		<b>14.29%</b>		<b>11.40%</b>
<b>CV</b>		<b>43.30%</b>		<b>35.13%</b>

### 4.3 Parámetros electroquímicos de corrosión de traves de CR

En la Figura 4.1 y la Figura 4.2 se presentan las gráficas de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – Tiempo medido al centro de las traves con AR de 10 mm (T1 a T8) y 13 mm (T9 a T16) de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores tomados para las dos caras laterales de cada trave (cara A y B). Las líneas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo con la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2016). En el Apéndice A se presentan los potenciales de corrosión medidos en los extremos de las traves (Figura A. 1 y Figura A. 2).

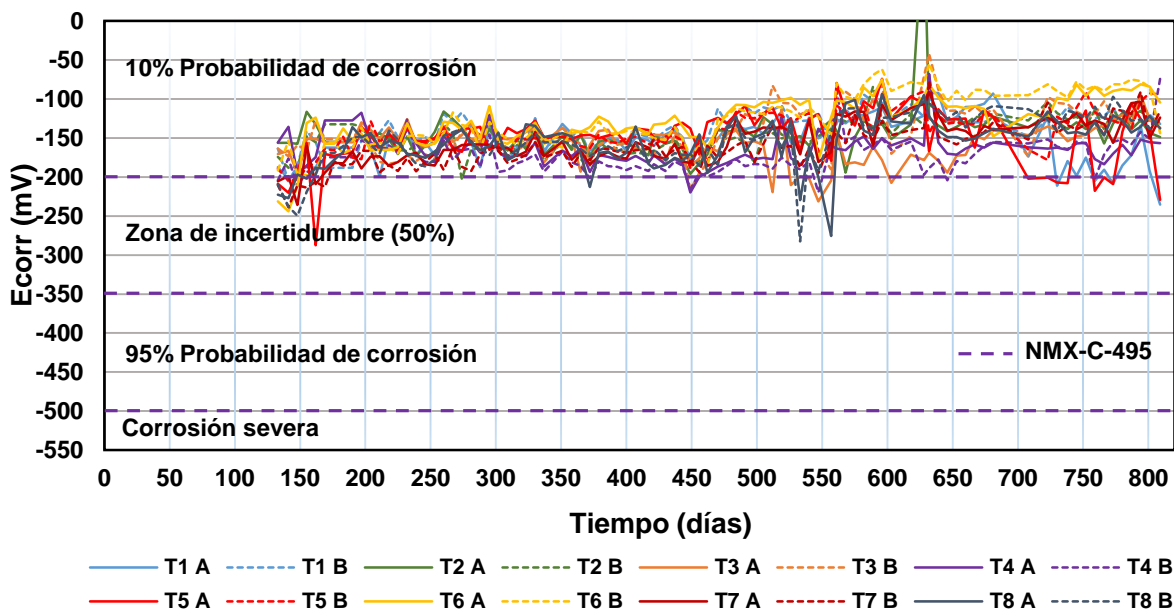


Figura 4.1 Potencial de corrosión – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 10 mm de diámetro

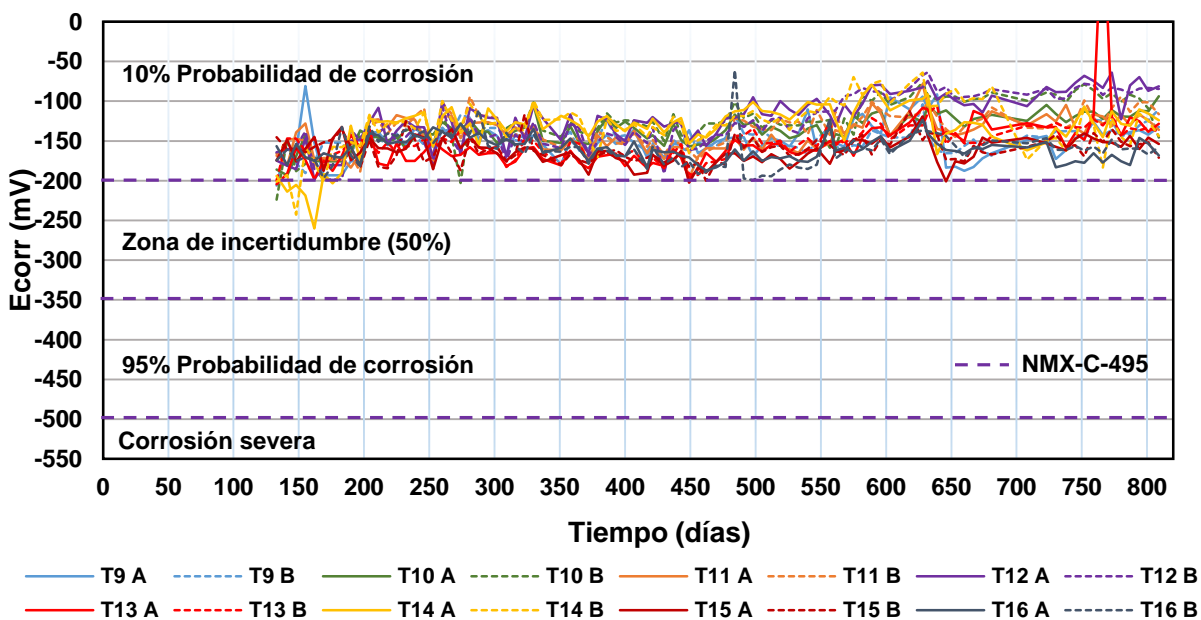


Figura 4.2 Potencial de corrosión – Tiempo al centro del claro para traves con AR de 13 mm de diámetro

En la Figura 4.3 y la Figura 4.4 se presentan las gráficas de velocidad de corrosión instantánea ( $i_{corr}$ ) – Tiempo (días) medida al centro de las traves con AR de 10 mm

(T1 a T8) y 13 mm (T9 a T16) de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores tomados para las dos caras laterales de cada trabe (cara A y B). Las líneas punteadas indican los límites para determinar el nivel de corrosión del AR asociado a la velocidad de corrosión de acuerdo con la norma NMX-C-501-ONNCCE-2014 (2015). En el Apéndice A se presentan las velocidades de corrosión medidas en los extremos de las trabes (Figura A. 3 y Figura A. 4).

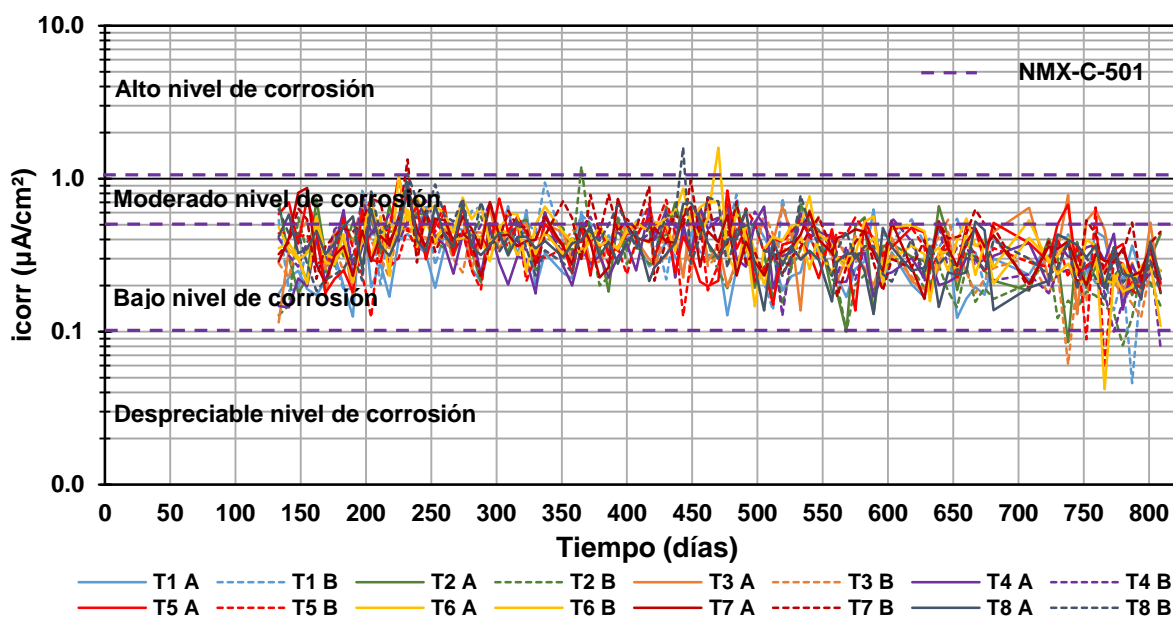


Figura 4.3 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 10 mm de diámetro

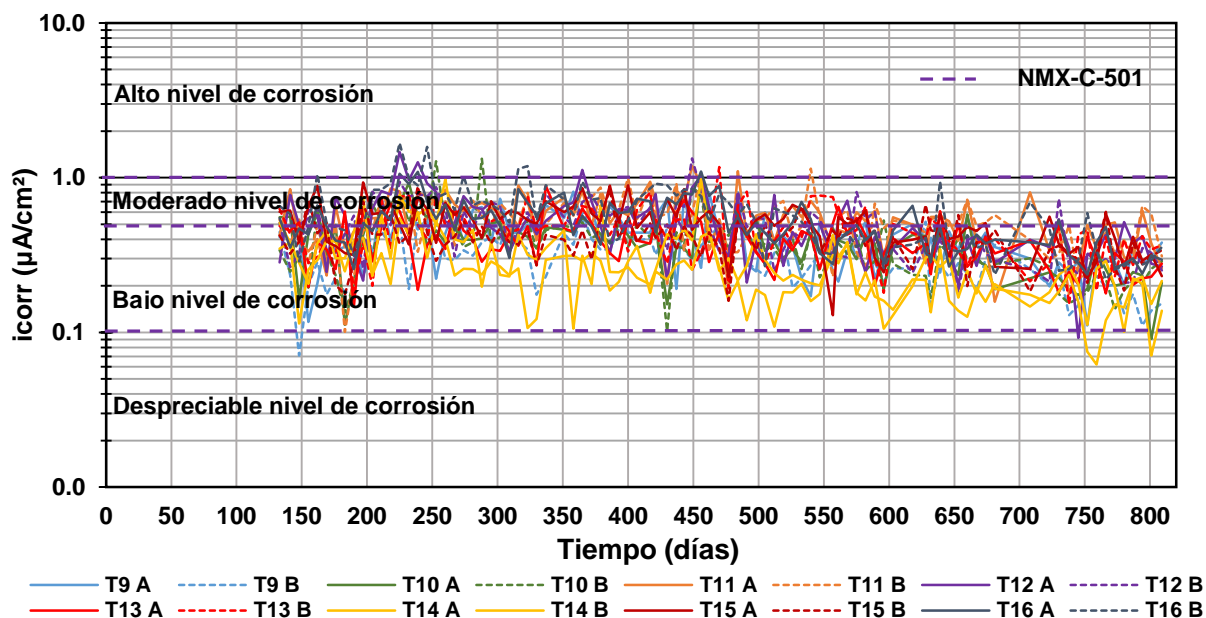


Figura 4.4 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo al centro del claro para traveses con AR de 13 mm de diámetro

En la Figura 4.5 y la Figura 4.6 se presentan las gráficas de Resistividad eléctrica del concreto -Tiempo medida al centro de las traveses con AR de 10 mm (T1 a T8) y 13 mm (T9 a T16) de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores promedios tomados para las dos caras laterales de cada trabe. Las líneas punteadas indican los límites de riesgo de corrosión asociados a la resistividad eléctrica del concreto de acuerdo con la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016 (2016). En el Apéndice A se presentan las gráficas de resistividad eléctrica del concreto – tiempo medidos en los extremos de las traveses (Figura A. 5 y Figura A. 6).

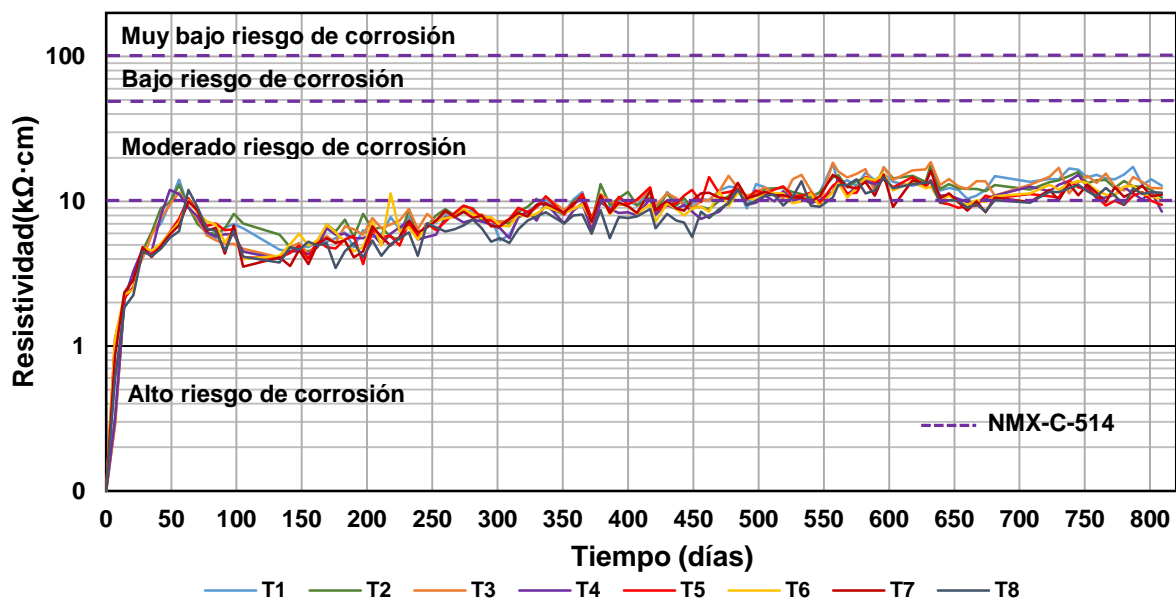


Figura 4.5 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo al centro del claro para traveses con AR de 10 mm de diámetro

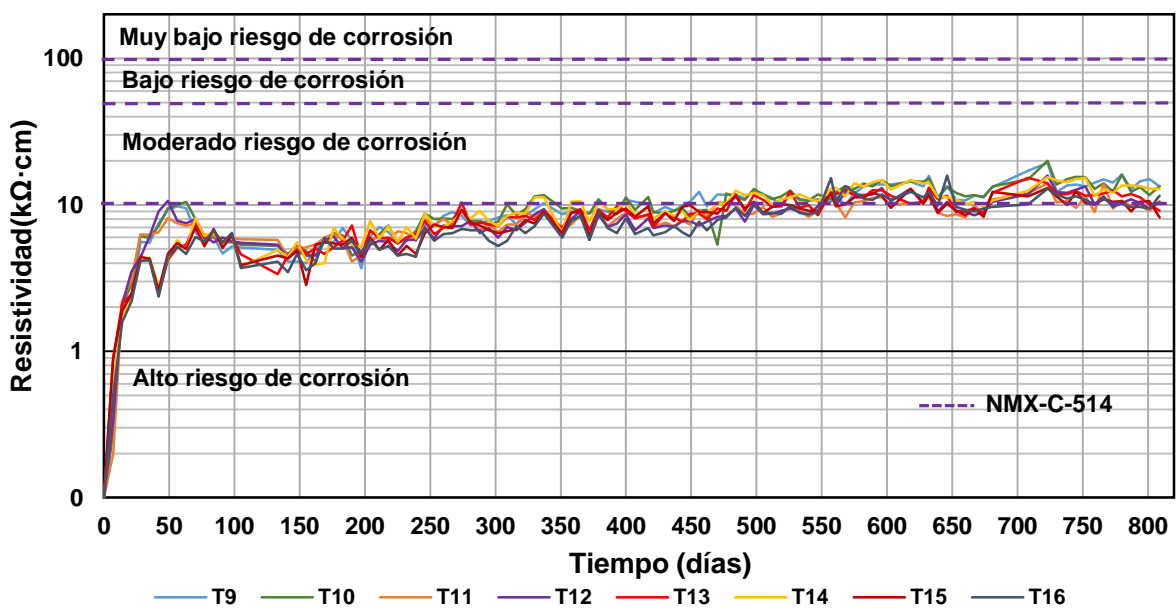


Figura 4.6 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo al centro del claro para traveses con AR de 13 mm de diámetro



#### 4.4 Contenido de iones libres de cloruro en traveses de CR

En la Figura 4.7 se presenta el patrón de agrietamiento, el ancho de grieta (en mm) y zona de influencia por humedad de las traveses T1 (AR de 10 mm de diámetro) y T9 (AR de 13 mm diámetro). Para ambos casos se presenta la cara A. Los patrones de agrietamiento para las demás traveses, en general, fueron similares a los presentados en la Figura 4.7. Se asumió que la zona influenciada por humedecimiento tiene una longitud de 50 cm y se ubica en el centro del claro de las traveses (zona achurada). En el Apéndice B (Figura B.1 y Figura B. 4) se presentan patrones de agrietamiento, ancho de grieta y zona de influencia por humedad de las 16 traveses estudiadas.

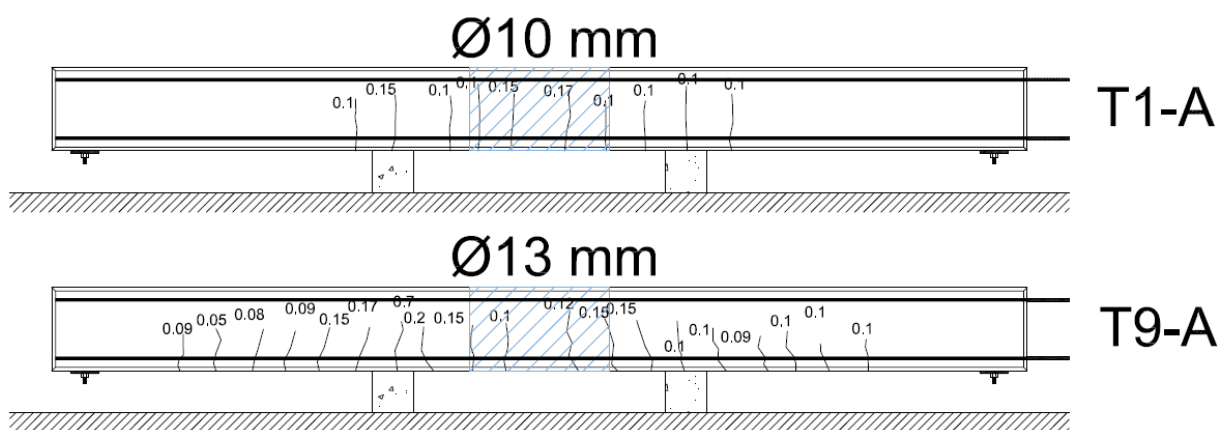


Figura 4.7 Patrón de agrietamiento, ancho de grieta (en mm) y zona de influencia por humedad de las traveses T1 y T9

En la Figura 4.8 y la Figura 4.9 se presentan las gráficas de porcentaje de cloruros ( $\text{Cl}^-$  ppc) -profundidad para las traveses con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. El porcentaje de cloruros se refiere al contenido de cloruros por peso de cemento. La profundidad se define como la distancia medida de la superficie de la cara lateral del concreto hacia al centro de la sección transversal. En el Apéndice D (Figura D. 1 a Figura D. 6) se presentan las gráficas de porcentaje de cloruros por ancho de grieta. En dichas gráficas se consideró la condición de las secciones que fueron sometidas a humectación semanal para la lectura de los parámetros de corrosión.

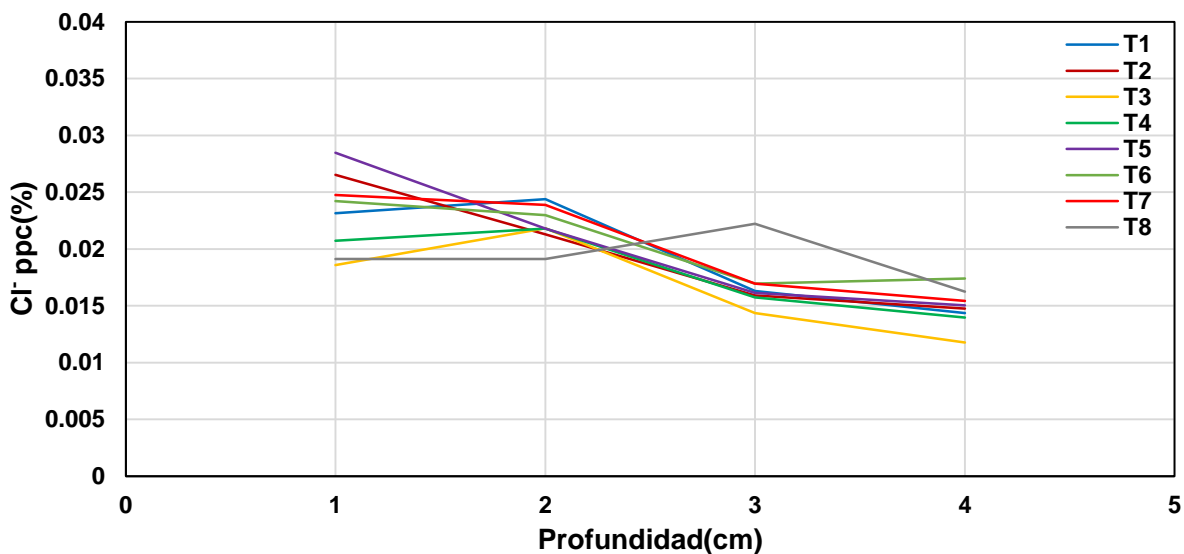


Figura 4.8 Contenido de cloruros libres por peso de cemento en traves de CR con AR de 10 mm de diámetro

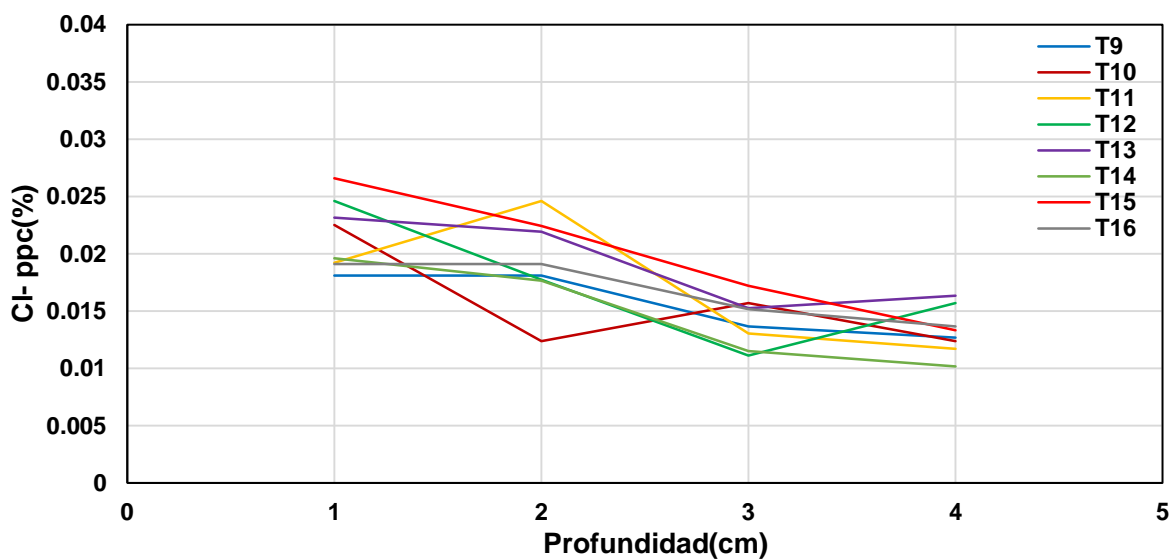


Figura 4.9 Contenido de cloruros libres por peso de cemento en traves de CR con AR de 13 mm de diámetro

#### 4.5 Agrietamiento en traves de CR

En la Figura 4.10 y la Figura 4.11 se presentan los diagramas de momento asociados al 60% del esfuerzo de fluencia y los momentos de agrietamiento ( $M_{cr}$ ) para las traves con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Los

momentos de agrietamiento indican las posiciones aproximadas para definir una longitud agrietada. Las longitudes agrietadas de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro fueron de 118 cm y 200 cm, respectivamente. En el Apéndice C (Tabla C. 1 a laTabla C. 8) se presentan los valores de ubicación, ancho y longitud de grieta para las traveses estudiadas.

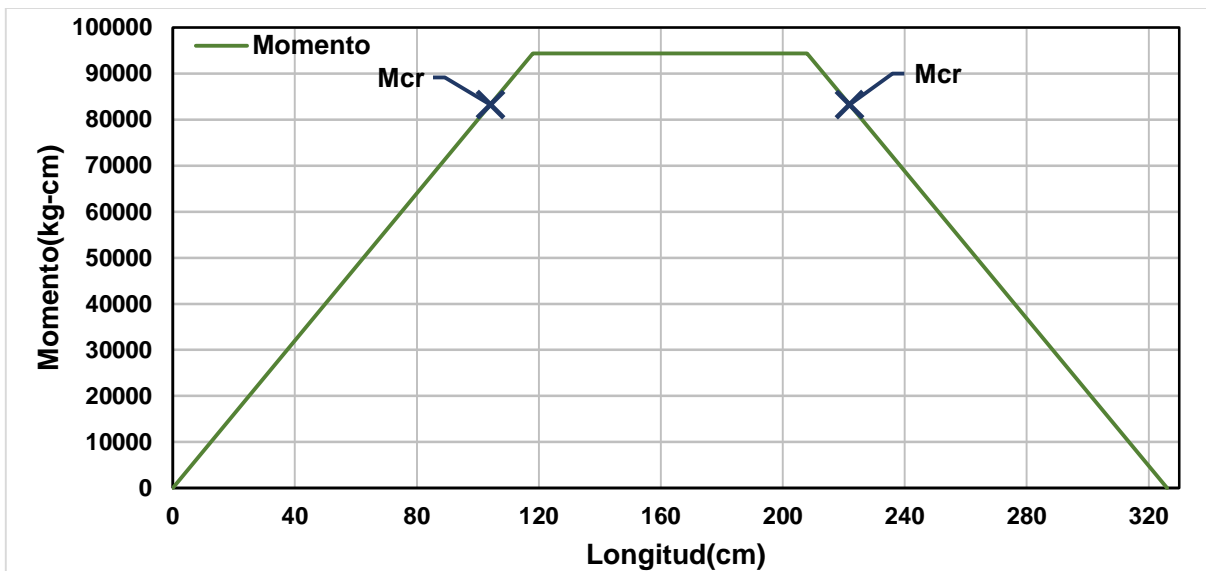


Figura 4.10 Ubicación del momento de agrietamiento en el diagrama de momentos para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

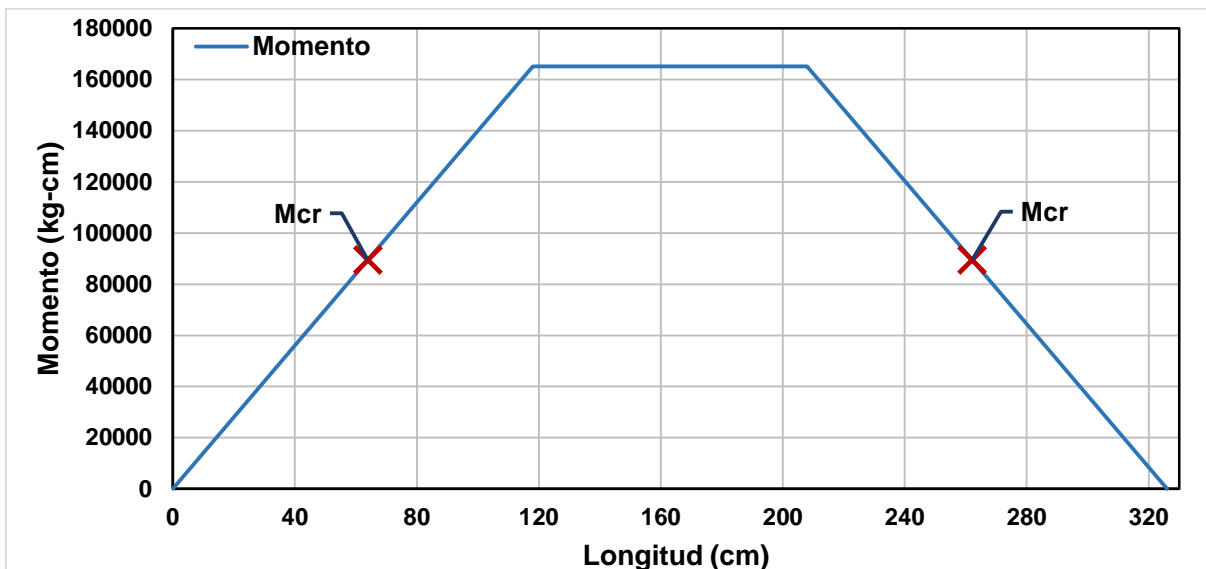


Figura 4.11 Ubicación del momento de agrietamiento en el diagrama de momentos para travesaños de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

En la Tabla 4.4 se presentan los volúmenes de agrietamiento promedio, velocidad de corrosión promedio y potencial de corrosión promedio a los 730 días para las travesaños con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. El volumen de agrietamiento promedio  $V_{g1}$  para las travesaños con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de  $1.09 \text{ mm}^3$  y  $1.82 \text{ mm}^3$ , respectivamente. El volumen de agrietamiento promedio  $V_{g2}$  para las travesaños las travesaños con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de  $204.89 \text{ mm}^3$  y  $304.43 \text{ mm}^3$ .

Tabla 4.4 Volúmenes de agrietamiento promedio, velocidad de corrosión promedio y potencial de corrosión promedio para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

$\phi$		Vg1(mm <sup>3</sup> )	Vg2(mm <sup>3</sup> )	icorr( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	Ecorr(mV)
10 mm	T1	1.06	216.645	0.3265	-169.1
	T2	1.065	200.335	0.2115	-123.75
	T3	1.175	213.965	0.2955	-122.4
	T4	1.06	183.115	0.315	-161.75
	T5	1.02	201.025	0.4525	-164.75
	T6	1.255	228.705	0.2745	-94
	T7	1.13	215.61	0.305	-137.35
	T8	0.95	179.68	0.3455	-134.85
13 mm	T9	1.82	293.27	0.275	-155.4
	T10	1.74	306.645	0.202	-103.85
	T11	1.64	260.665	0.398	-126.15
	T12	1.935	325.78	0.635	-92.85
	T13	1.855	332.825	0.344	-129.8
	T14	1.91	346.675	0.2095	-139.9
	T15	1.73	266.64	0.369	-149.75
	T16	1.94	302.905	0.3905	-172

#### 4.6 Factores climáticos de la ciudad de Mérida

En la Figura 4.12, la Figura 4.13 y la Figura 4.14 se presentan los promedios de los historiales de humedad relativa, temperatura y precipitación diaria, respectivamente. Se presentan los datos que abarcan las fechas desde la fabricación traveses hasta la conclusión de este trabajo de investigación. Los datos presentados fueron tomados de la estación meteorológica ubicada dentro de las instalaciones del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Mérida. Ubicado aproximadamente a 3.3 km del centro de almacenamiento de las traveses.

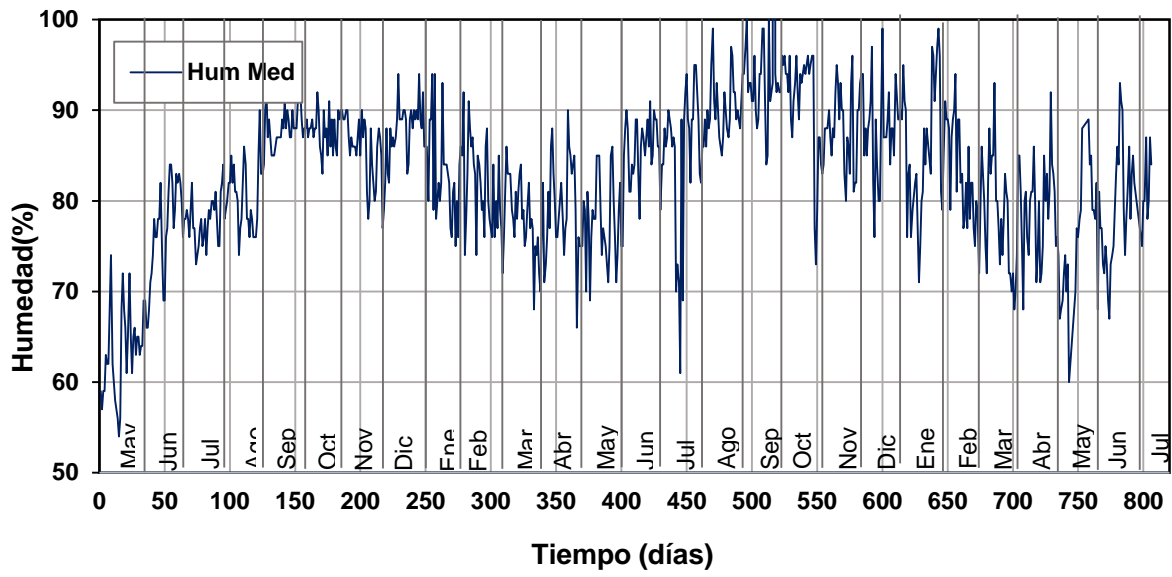


Figura 4.12 Porcentaje promedio de humedad relativa

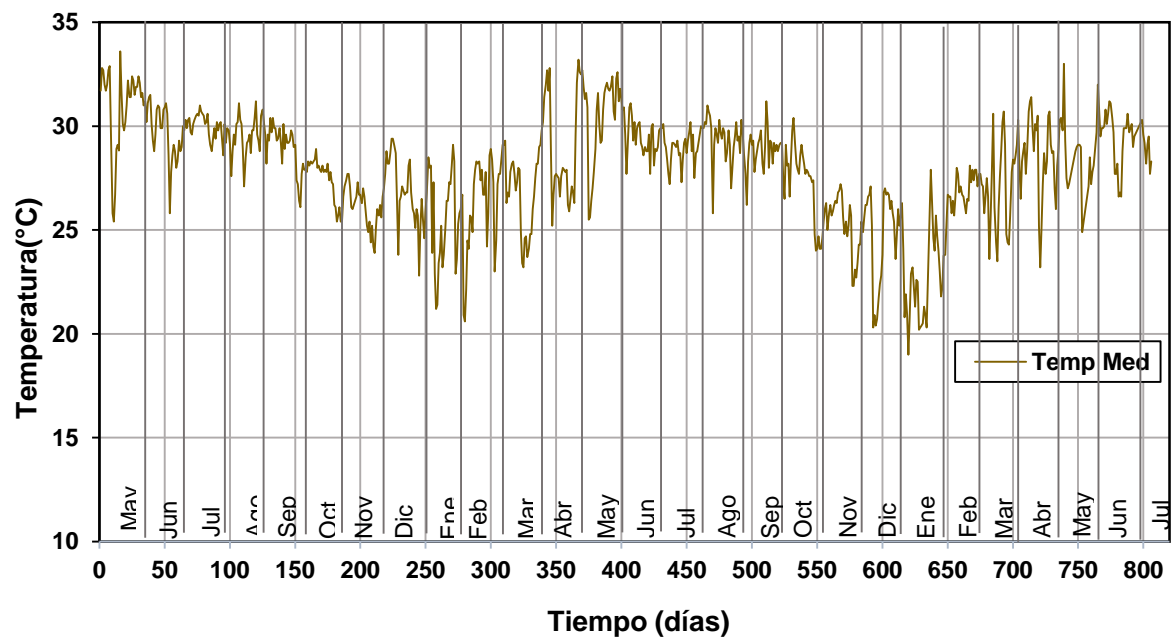


Figura 4.13 Temperatura media

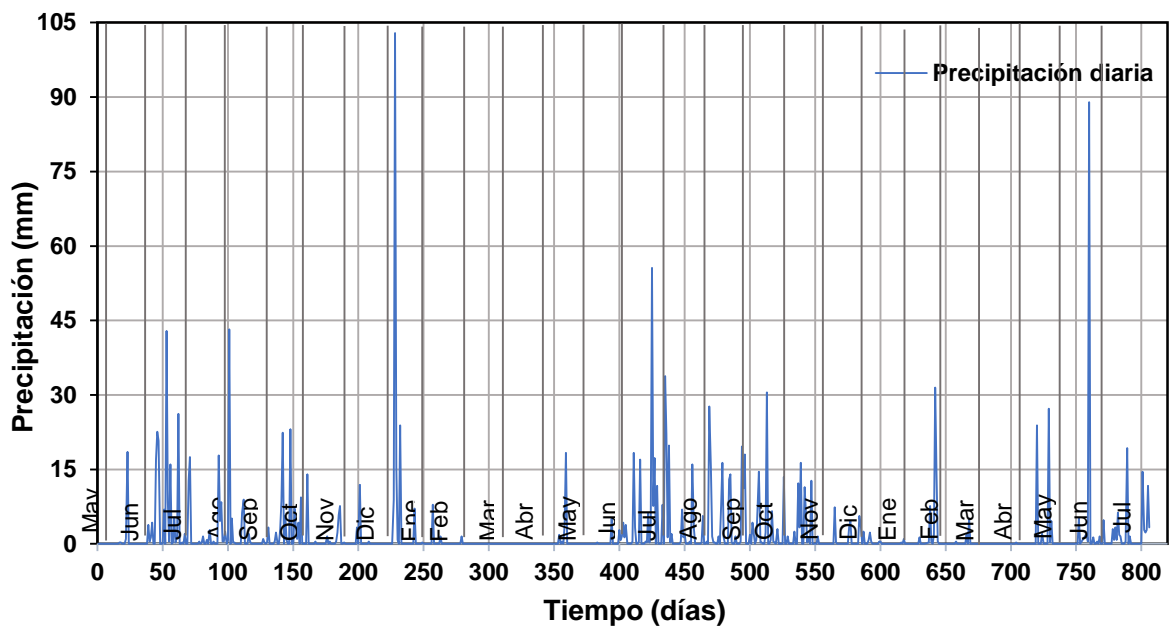


Figura 4.14 Precipitación diaria

## CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados en términos de los parámetros de corrosión, los agrietamientos de las traveses estudiadas y los factores climáticos.

### 5.1 Control de cargas sostenidas en traveses de CR

En la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3 se observó una pérdida de carga del 20.16 y 14.29% en un periodo de 330 días para las traveses con AR de 10 y 13 mm, respectivamente. Por su parte, para un periodo de 77 días se observó una pérdida del 11.4 % para traveses con ambos diámetros. Conforme se incrementan los días se incrementa la pérdida de carga. Lo anterior puede estar asociado a la relajación de las barras roscadas utilizadas para la aplicación de las cargas sostenidas, a la pérdida de diámetro del acero longitudinal, la pérdida de adherencia entre el AR y el concreto, entre otras. En la Figura 5.1 se presenta la curva de pérdida de carga - tiempo. Con base en lo observado en dicha figura, se recomienda verificar las cargas sostenidas cada 100 días aproximadamente para garantizar una pérdida no mayor del 13 %.

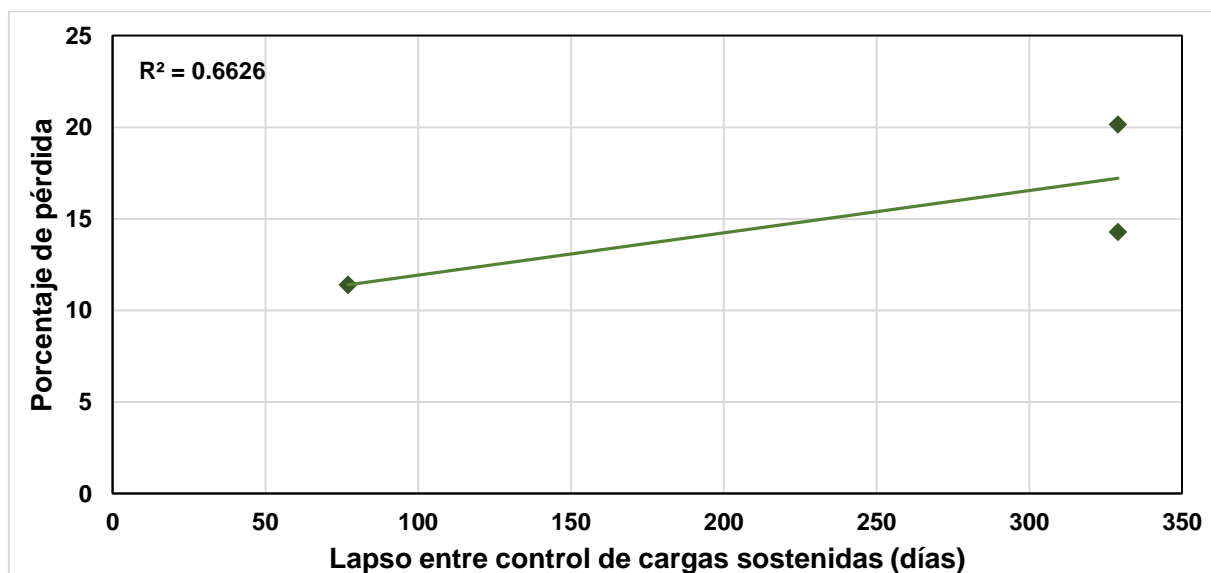


Figura 5.1 Porcentaje de pérdida de cargas sostenidas a través del tiempo



## 5.2 Parámetros de corrosión en trabes de CR

En la Figura 5.2 se presentan los promedios de potencial de corrosión – Tiempo al centro y extremos de las trabes. Se observa que los potenciales de corrosión para las trabes con AR de 10 mm de diámetro son ligeramente mayores que los potenciales para trabes con AR de 13 mm de diámetro. Esto se debe a que, en zonas donde existe una mayor cantidad de agrietamiento, la humedad en el CR se evapora más rápido. Adicionalmente, dichas grietas facilitan la entrada de oxígeno adicional. Por tanto, los valores de potencial de corrosión son consistentes de acuerdo con la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2016). Para zonas no agrietadas, el AR se encuentra en mayor medida aislado de las condiciones exteriores. Por tanto las condiciones de potenciales de corrosión son distintas para zonas agrietadas y no agrietadas. En general, la porosidad efectiva y los agrietamientos favorecen el ingreso de agentes que propicien la corrosión. Debido a esto, los potenciales de corrosión para la zona central de las trabes son mayores que para los medidos en los extremos. Sin embargo, para todos los casos se tiene una probabilidad de corrosión del 10% (NMX-C-495-ONNCCE-2015, 2016).

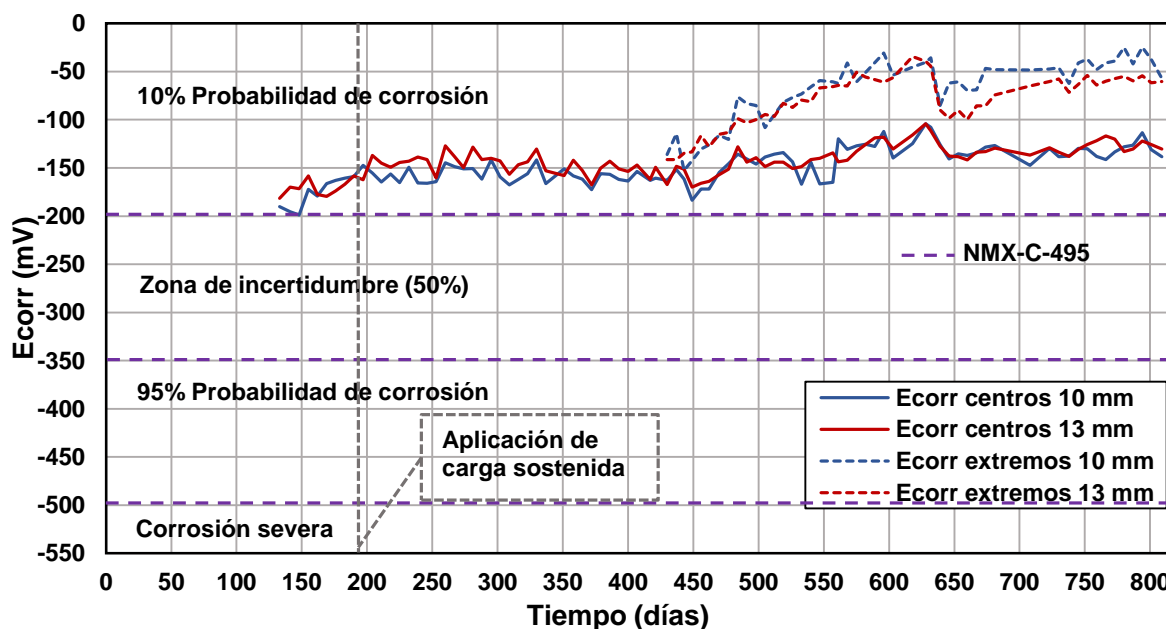


Figura 5.2 Promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de trabes

En la Figura 5.3 se presentan los promedios de velocidad de corrosión medidos al centro y extremos de traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. En dicha figura se observa que inicialmente el nivel de corrosión de las traveses, de acuerdo con la norma NMX-C-501-ONNCCE-2014 (2015), es bajo. Posteriormente, existe un incremento del nivel de corrosión a moderado (día 210); finalmente, las traveses regresaron a un nivel de corrosión bajo (día 235) y se mantuvo casi constante hasta que finalizó el periodo de este trabajo de investigación. El incremento en el nivel inicial de corrosión estuvo asociado al agrietamiento de las traveses por la aplicación de las cargas sostenidas. Dichos agrietamientos facilitaron el ingreso de factores externos que favorecen el proceso de corrosión. La disminución del nivel de corrosión en la etapa final de medición puede estar asociado con la pasivación de AR. En general la velocidad de corrosión indica que las traveses se encuentran en un estado de corrosión baja. La velocidad de corrosión fue mayor para las traveses con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro. Esto se debió a que el ancho y cantidad de grietas fueron mayores que para las traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro. Los valores de velocidad medidos en los extremos (no agrietados) son menores que los medidos al centro de las traveses.

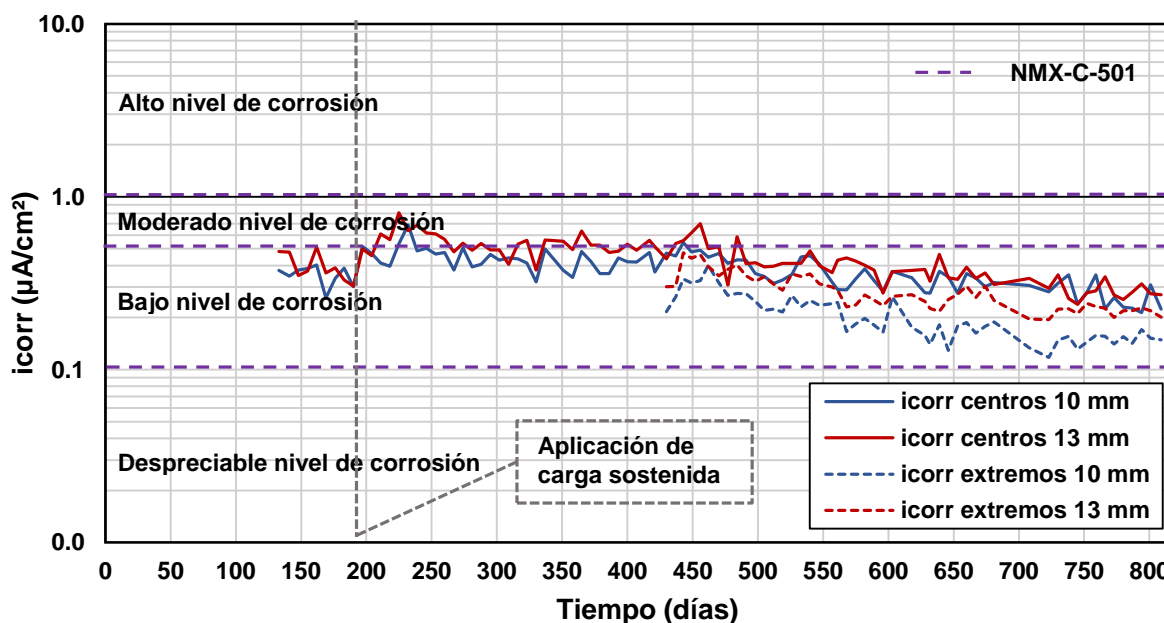


Figura 5.3 Promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

En la Figura 5.4 se presenta la gráfica de acumulados de velocidad de corrosión acumulada ( $i_{corr} \cdot \text{días}$ ) – Tiempo (días) medidos al centro y extremos de las trabes. El acumulado se calculó como el área bajo la curva del promedio de las velocidades medidas más el área bajo la curva anterior. En la Figura 5.4 se observa que las pendientes de los acumulados de velocidad de corrosión no han cambiado significativamente. Un incremento en dicha pendiente indicaría el inicio de una corrosión activa. Por tanto, no existe corrosión activa en el AR de las trabes. Por otro lado, en la Figura 5.5 se observa que la velocidad de corrosión incrementa más rápido para las trabes con AR de mayor de diámetro. Esto se debe a las trabes con AR de 13 mm tuvieron mayor cantidad de grietas. (Apéndice B de la Figura B.1 a la Figura B.4). Por su parte, se observa que la velocidad de corrosión incrementa más rápido al centro del claro comparado con los extremos. Esto se debe a que los mayores agrietamientos se presentaron al centro del claro.

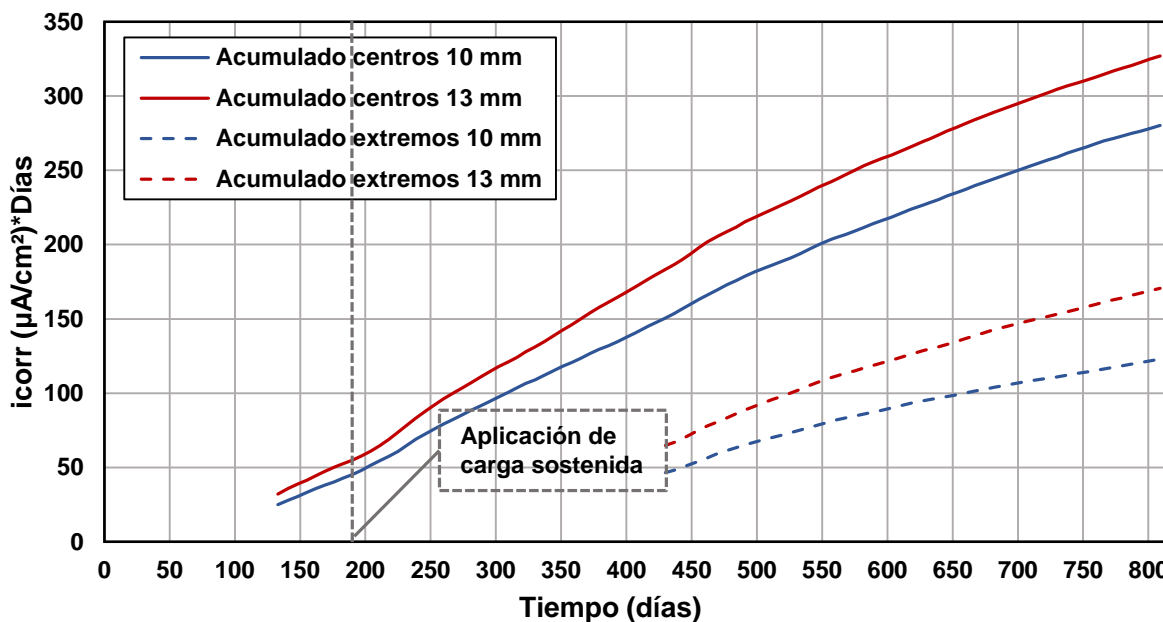


Figura 5.4 Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

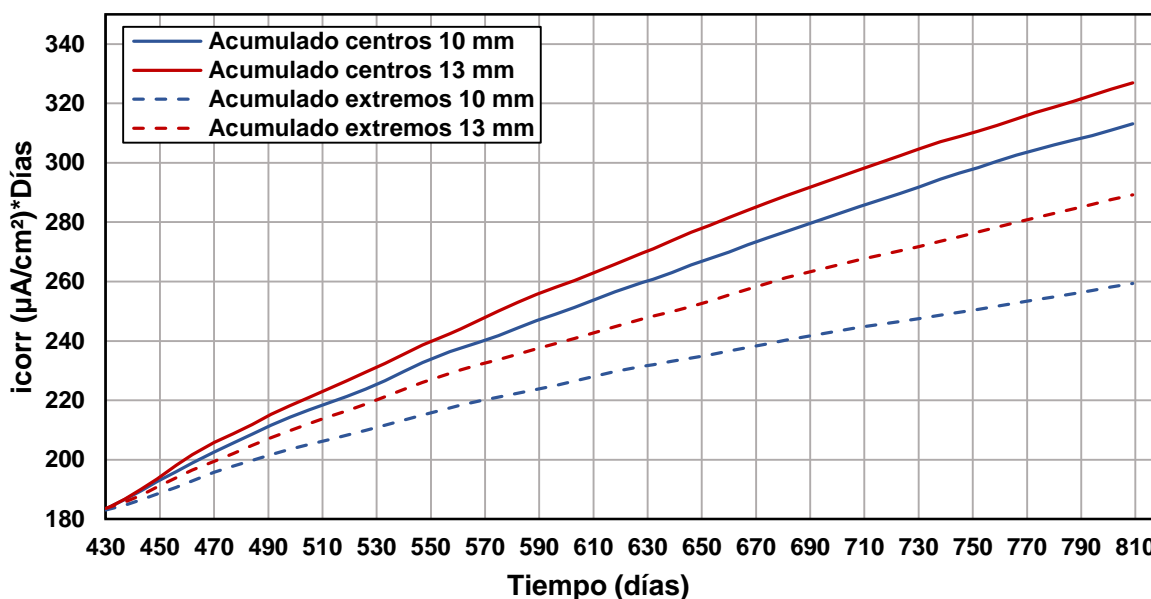


Figura 5.5 Acumulados con base en el mismo origen de velocidades de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

En la Figura 5.6 se presentan los promedios de resistividad del concreto – Tiempo al centro y extremos de las traveses. Se observó un incremento de la resistividad en los primeros 50 días respecto a la fabricación de las traveses. Dicho incremento está asociado al proceso de fraguado y curado del concreto. Posteriormente, la resistividad se estabiliza y mantiene una tendencia casi constante. En la Figura 5.6 se observa que la resistividad del concreto para traveses con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue similar. Por su parte, la resistividad fue similar al centro y a los extremos de las traveses. Por tanto el agrietamiento no genera un efecto significativo en la resistividad eléctrica del concreto. Esto se debe a que para niveles de corrosión inicial, la resistividad del concreto está mayormente asociada a la porosidad efectiva del concreto. Por su parte, dicha porosidad está asociada a los materiales y procedimientos utilizados para su elaboración. Para todas las traveses se utilizó concreto con resistencia similar ( $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ ), el cual fue elaborado con los mismos materiales y procedimientos. Por tanto, la porosidad efectiva promedio de las traveses fue similar (León 2017). De acuerdo con la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016 (2016), las traveses se encuentran con un riesgo de corrosión moderada.

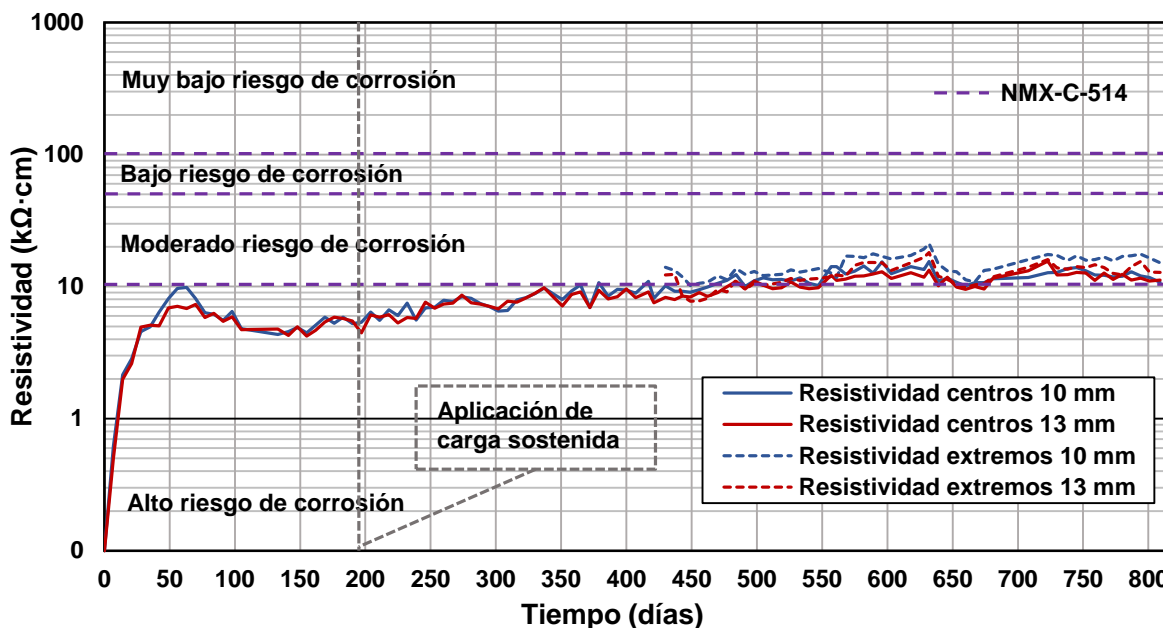


Figura 5.6 Promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

En la Figura 5.7 se presenta la gráfica de acumulados de la resistividad del concreto – tiempo. En dicha figura se observa que las pendientes de acumulados son similares para las traveses con AR de 10 mm y 13 mm. De igual forma, las pendientes son similares para el centro y los extremos de las traveses. Las pendientes tanto de los centros como de los extremos de las traveses no presentaron algún cambio significativo durante este trabajo de investigación. Esto se debe a que las traveses tuvieron una baja concentración de cloruros en el concreto. El contenido de cloruros en el concreto genera un efecto en la evolución de la corrosión. Por su parte, los cloruros al tener afinidad por el agua (hidrofílicos) tienden a retener la humedad por más tiempo. Por tanto, un incremento en la concentración de cloruros generaría una reducción de la resistividad eléctrica del concreto y como consecuencia, una reducción en la pendiente acumulada de la resistividad eléctrica del concreto.

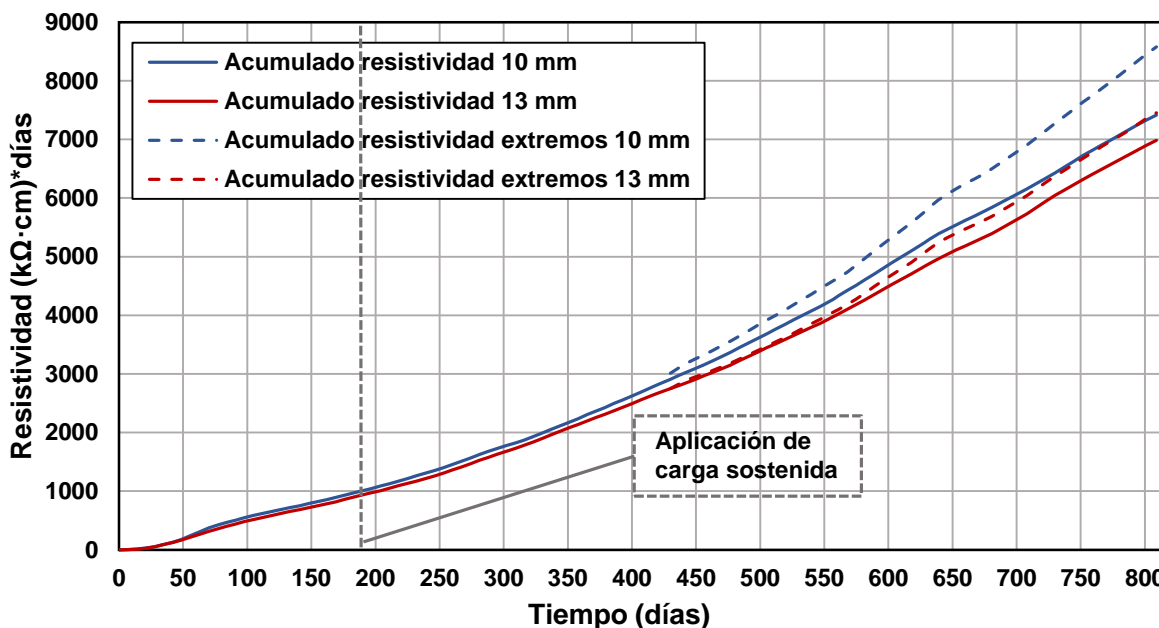


Figura 5.7 Acumulados de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de travesaños de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

Por otro lado, de acuerdo con la Figura 5.3 se esperaría que el potencial de corrosión fuera mayor; sin embargo, esto no se observa. Dicha discrepancia puede estar asociada a que las travesaños se encuentran bajo cargas sostenidas. Por su parte, dichas cargas generan agrietamientos que tienen un efecto en la evolución de la corrosión. En potenciales de corrosión para travesaños agrietados, la resistividad del concreto tiene un efecto mínimo ya que los agentes externos ingresan a través de las grietas y no a través de los poros del concreto. Por su parte, dichas grietas facilitan la entrada de oxígeno adicional. Por tanto, los valores de potencial de corrosión son consistentes de acuerdo con la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2016). Por otra parte, las travesaños se encuentran bajo resguardo en un ambiente inocuo. Por tanto la integridad del AR se encuentra intacta. El bajo contenido de cloruros juega un papel importante en los potenciales de corrosión. Esto se debe a que la concentración de cloruros está asociada a cambios considerables en el potencial de corrosión hacia valores más negativos (NMX-C-495-ONNCCE-2015, 2016).

### 5.3 Contenido de iones libres de cloruro en trabes de CR

En la Figura 5.8 se presentan los promedios de los perfiles de contenido de cloruros en función de la profundidad para trabes con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro. Se presenta el porcentaje promedio del contenido de cloruros por peso de cemento ( $\text{Cl}^-$  ppc) a los 479 días. El valor inicial representa el obtenido a los 28 días respecto de la fabricación de las trabes reportado por León (2017). En general, el contenido de cloruros a los 479 días es mayor que el contenido reportado a los 28 días. Esto se debe a que los cloruros presentes en el agua (149.64 ppm) con la que se mojan las trabes durante la medición de los parámetros de corrosión y a los presentes en el aire propician el incremento de la concentración de cloruros en el concreto. Por otra parte, se observa que conforme aumenta la profundidad, disminuye el contenido de cloruros. Esto se debe a que los cloruros penetran de la superficie hacia el centro de las secciones transversales. En la Figura 5.8 se observa que el contenido de cloruros fue 18.75% mayor para las trabes con AR de 10 mm (0.019%) que para las de 13 mm (0.016%) de diámetro. Dicha diferencia puede estar asociada al gradiente generado por el ancho y propagación de grietas en las trabes de CR. Por otro lado, se observa que el contenido de cloruros para todas las trabes es menor al umbral mínimo (0.30% ppc) establecido por la norma NMX-C-523-ONNCCE-2016 (2016) para estar asociado a una corrosión activa. Por tanto, el contenido de cloruros en las trabes indica que no existe corrosión activa en el AR. Lo anterior es consistente con los potenciales de corrosión observados debido a que la concentración de cloruros está asociada a cambios considerables en el potencial de corrosión hacia valores más negativos (NMX-C-495-ONNCCE-2015, 2016).

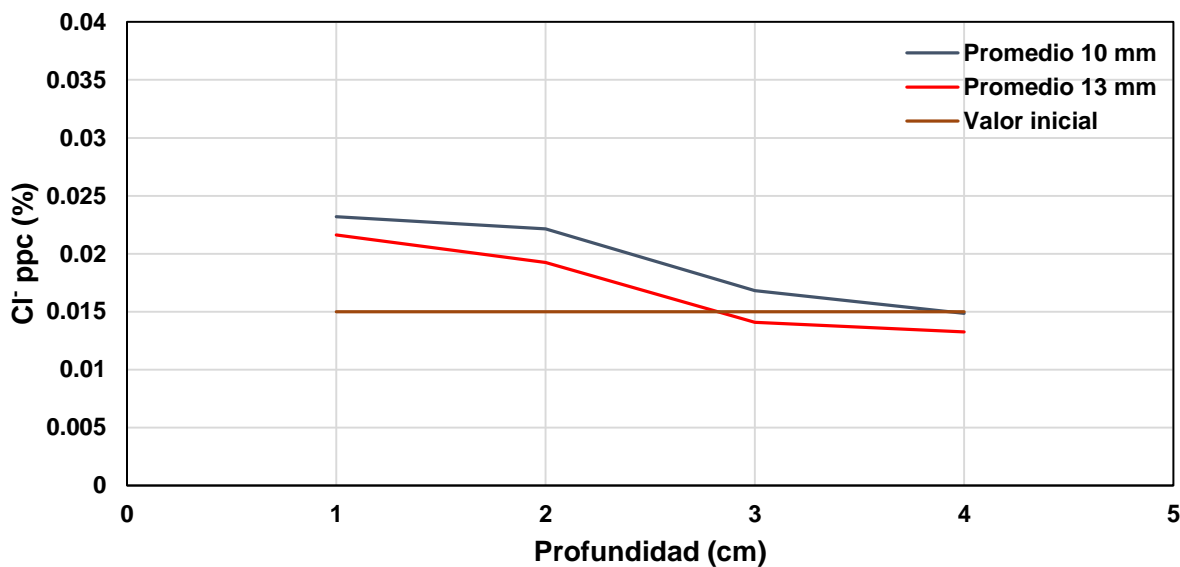


Figura 5.8 Promedio de contenido de cloruros por peso de cemento para traveses con AR de 10 y 13 mm de diámetro

En la Figura 5.9 y la Figura 5.10 se presentan las cantidades promedio de cloruros (% ppc) en diferentes anchos de grieta para la condición mojado y no mojado. Para ambos casos se observa que el porcentaje de cloruros disminuye conforme la profundidad aumenta. Por su parte, se observa que, en general, el contenido de cloruros aumenta conforma el ancho de grieta aumenta. Esto se debe que un mayor ancho de grieta facilita el ingreso de los cloruros. Sin embargo, en otros trabajos se ha observado que para altas concentraciones de cloruros el ancho de grieta no influye significativamente (Shao-feng et al. ,2011).



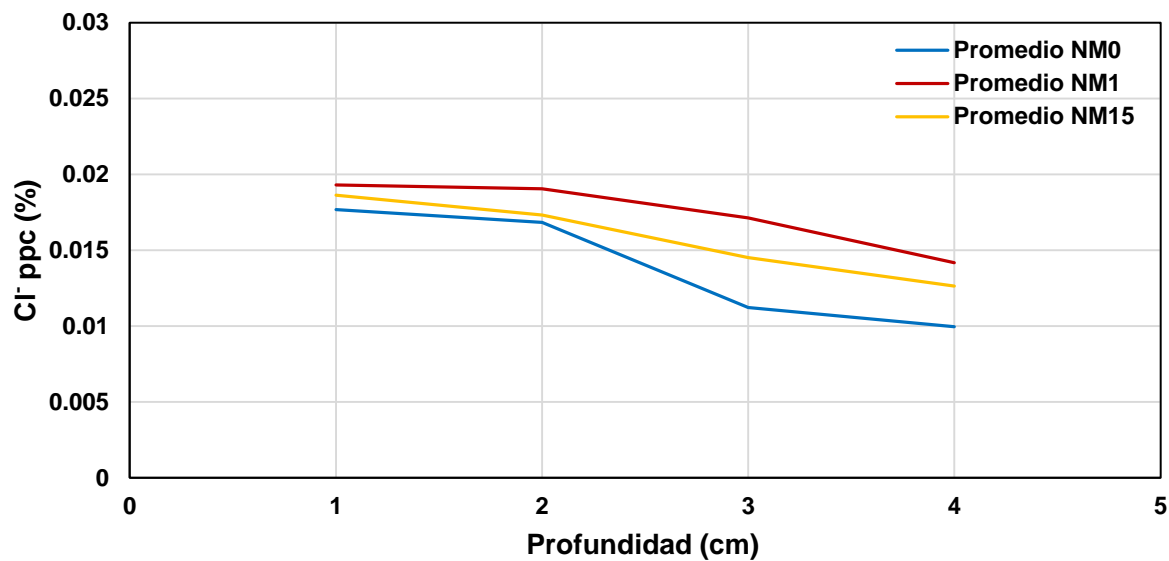


Figura 5.9 Promedio de contenido de cloruros por ancho de grieta considerando la zona no mojada de las traves de CR

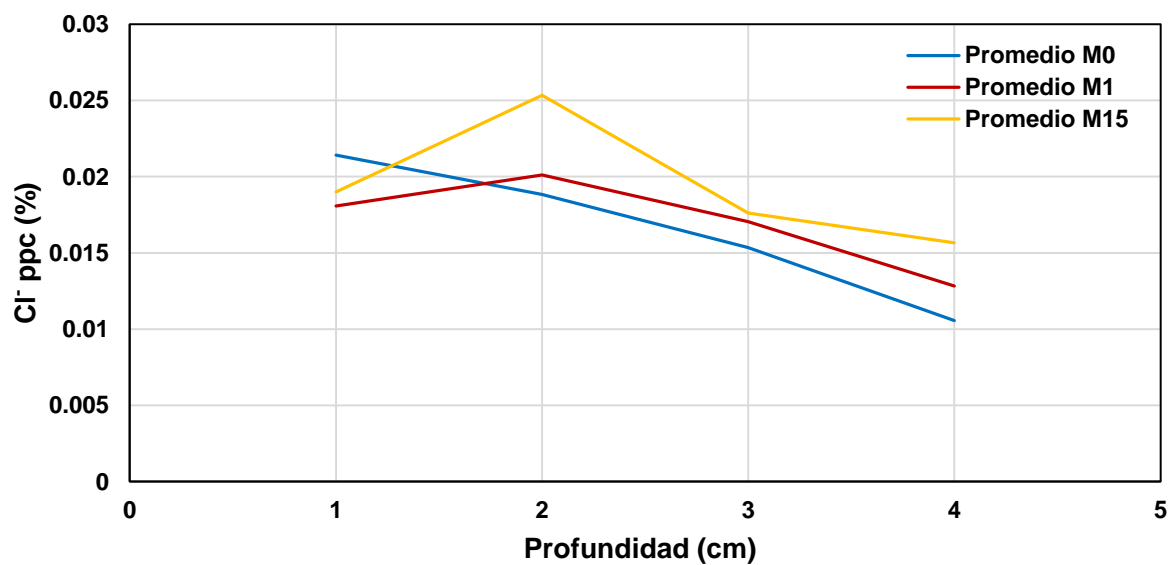


Figura 5.10 Promedio de contenido de cloruros por ancho de grieta considerando la zona mojada de las traves de CR

## 5.4 Efecto del ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión en traveses de CR

En la Figura 5.11 se presenta la gráfica de ancho de grieta – longitud de traveses. Se presentan los anchos de grieta obtenidos con los diferentes modelos descritos anteriormente y los anchos de grieta promedio para las traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. Para los anchos de grieta promedio se presentan los valores asociados a las zonas de agrietamiento A, B y C.

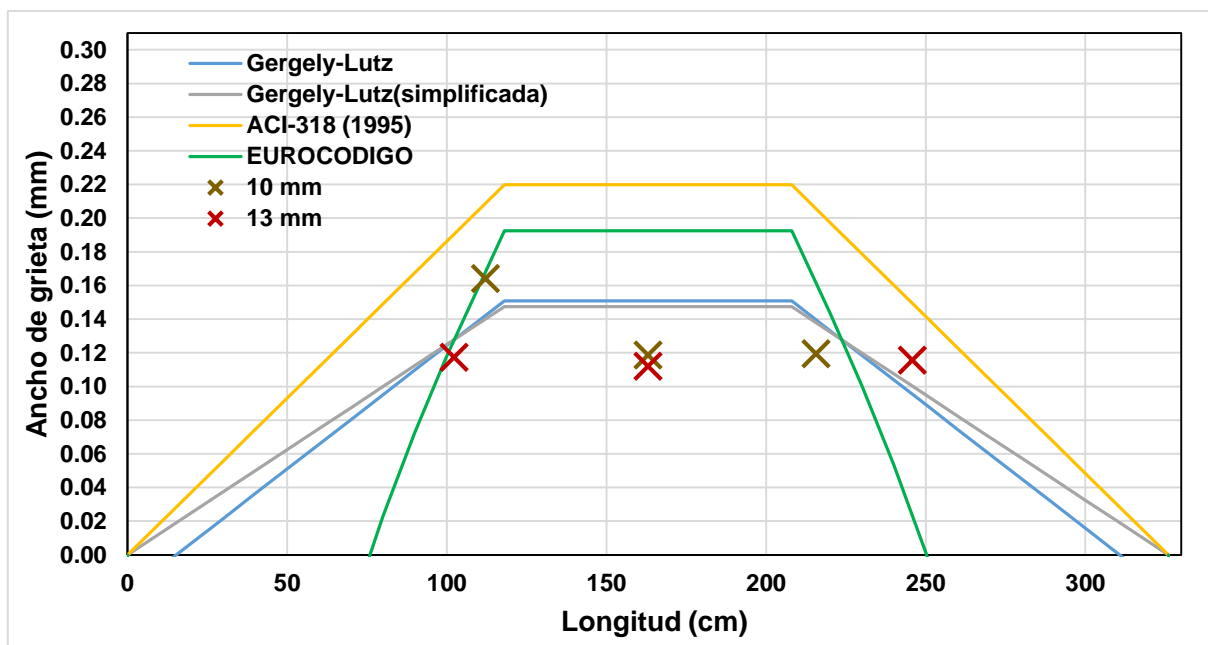


Figura 5.11 Ancho de grieta – longitud de traveses

En la Figura 5.11 se observa que el modelo con el que mejor se predice el ancho de grieta máximo es el presentado en el EUROCODIGO (1997). Esto se debe a que dicho modelo considera un mayor número de variables, entre ellas se encuentran el diámetro de las barras de refuerzo a tensión, la cuantía de acero, el nivel de adherencia de las barras de acero, la rugosidad de las barras de refuerzo, la duración de la carga y el tipo de esfuerzo a tensión aplicado a las barras (tensión pura o tensión por flexión). Sin embargo, los valores de ancho de grieta para el extremo de la derecha (Figura 5.11) en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro no se ajustaron correctamente. Esto se debe probablemente a la variación del espesor del

recubrimiento a lo largo del elemento, así como a la distancia entre apoyos y cargas del postensado. La ecuación simplificada de Gergely-Lutz (1968) presentada en el ACI 224R1 (2001) es conservadora para calcular el ancho de grieta máximo.

En la Figura 5.12 se presentan curvas de distancia media entre grietas – diámetro de barra calculados con los modelos descritos anteriormente. Adicionalmente, se presenta la separación media de grietas para trabes con AR de 10mm y 13 mm de diámetro. Se observa que el modelo que mejor predice la separación media de grietas es el presentado en el EUROCÓDIGO (1997). Esto se debe a que la ecuación del EUROCÓDIGO (1997) considera un mayor número de variables, entre ellas se encuentran el diámetro de las barras de refuerzo a tensión, la cuantía de acero, la rugosidad de las barras de refuerzo y el tipo de esfuerzo a tensión aplicado a las barras (tensión pura o tensión por flexión). Por su parte, dicho modelo se encuentra del lado conservador. Por otra parte, la ecuación propuesta en el modelo del CEB-FIP (1990) es más simple y también resultados conservadores. La diferencia en porcentaje para modelos teóricos de separaciones entre grietas para trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 0.11% y 11% respectivamente. En el ACI no se presentan ecuaciones para determinar la separación media de grietas.

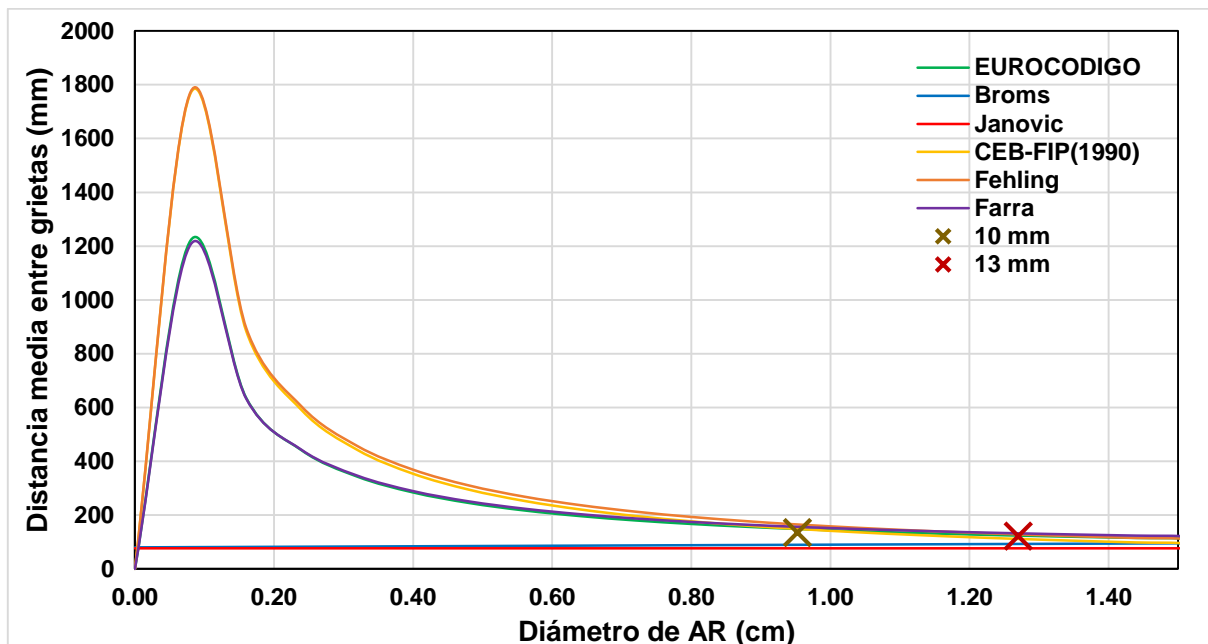


Figura 5.12 Distancia media entre grietas – diámetro

En la Figura 5.13 y la Figura 5.14 se presenta el potencial de corrosión contra el volumen de agrietamiento  $V_{g1}$  y  $V_{g2}$ , respectivamente. En la Figura 5.15 y Figura 5.16 se presenta la velocidad de corrosión contra el volumen de agrietamiento  $V_{g1}$  y  $V_{g2}$ , respectivamente. Se observa que existe una correlación entre el volumen de agrietamiento y el potencial y velocidad de la corrosión en traveses de CR. De acuerdo con la Figura 5.13 y Figura 5.14 se observa que a mayor volumen de agrietamiento el potencial de corrosión disminuye. Es decir, existe una menor probabilidad de corrosión activa. Por su parte, de acuerdo con la Figura 5.15 y Figura 5.16 se observa que a mayor volumen de agrietamiento, la velocidad de corrosión aumenta. Lo anterior se debe a que el agrietamiento facilita el ingreso de agentes que puede inducir la corrosión del AR. Por otro lado, se observa que los con los dos criterios propuestos para definir el volumen de agrietamiento, se tienen correlaciones similares. Sin embargo se observa una menor dispersión con el volumen de agrietamiento  $V_{g1}$ . Adicionalmente, se observa que los volúmenes de agrietamiento fueron mayores para las traveses con el AR longitudinal a tensión de mayor diámetro (Tabla, figuras). Esto se debe a que aunque el esfuerzo en el acero fue el mismo, el esfuerzo a tensión a

concreto fue mayor para las traves con AR de mayor diámetro. Por tanto, los agrietamientos fueron mayores para las traves con AR de mayor diámetro.

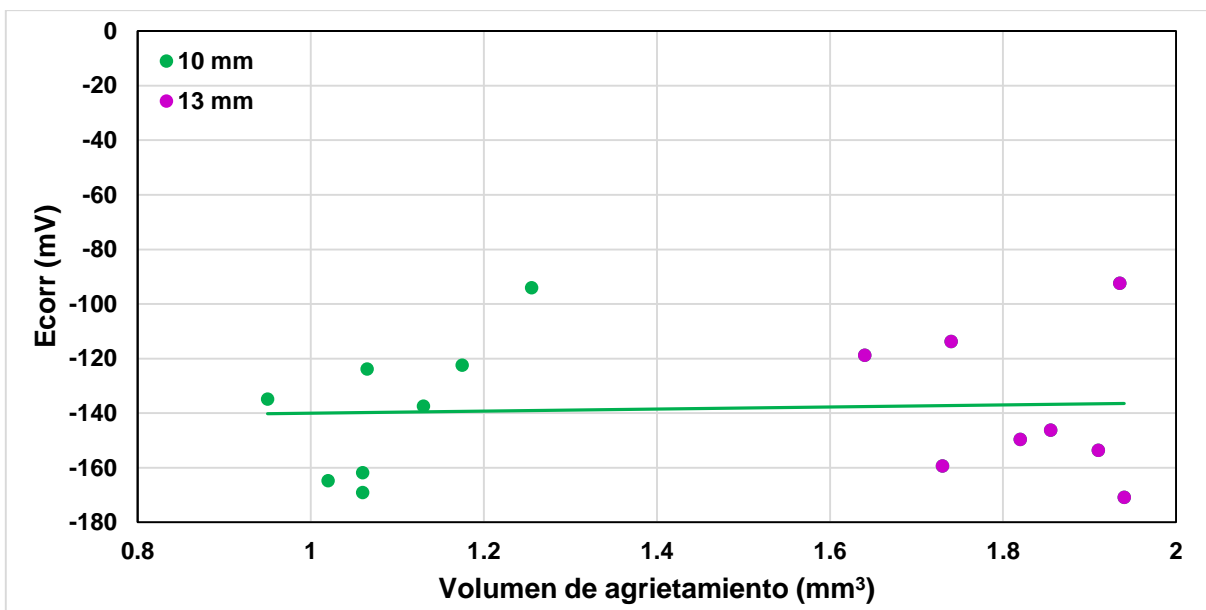


Figura 5.13 Efecto del volumen de agrietamiento ( $V_{g1}$ ) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro

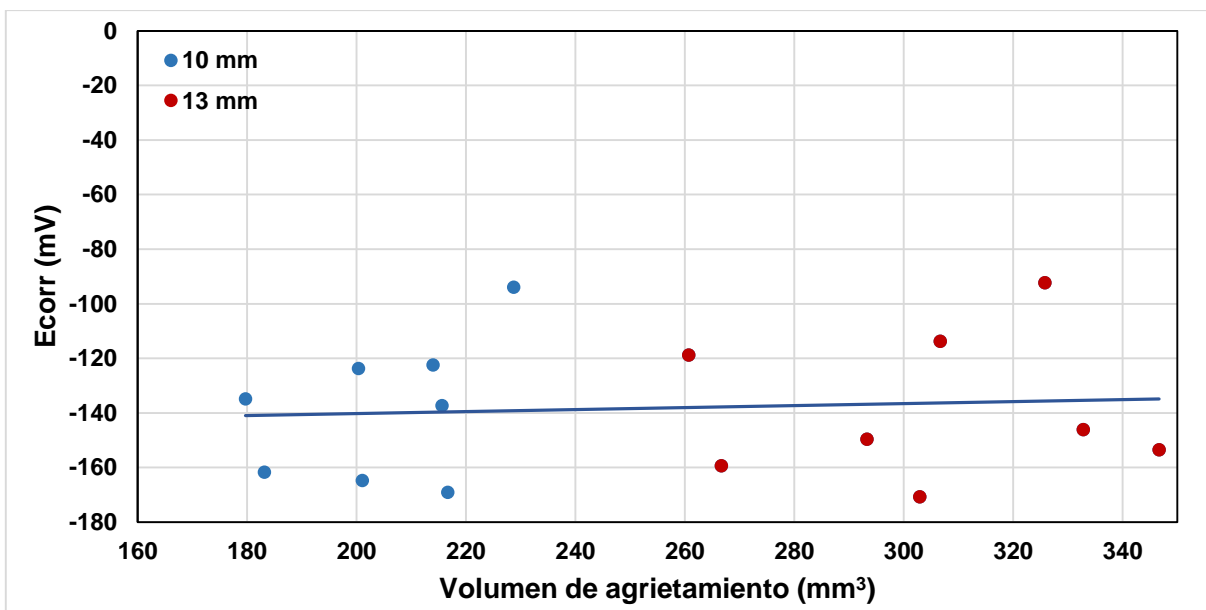


Figura 5.14 Efecto del volumen de agrietamiento ( $V_{g2}$ ) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro

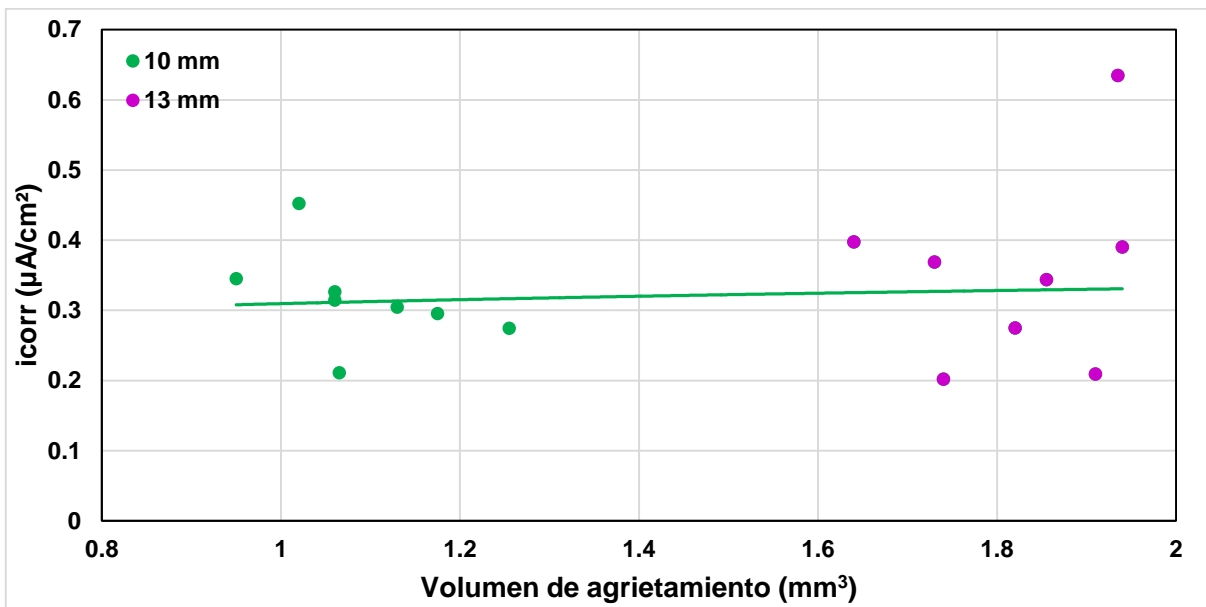


Figura 5.15 Efecto del volumen de agrietamiento ( $V_{g1}$ ) en la velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro

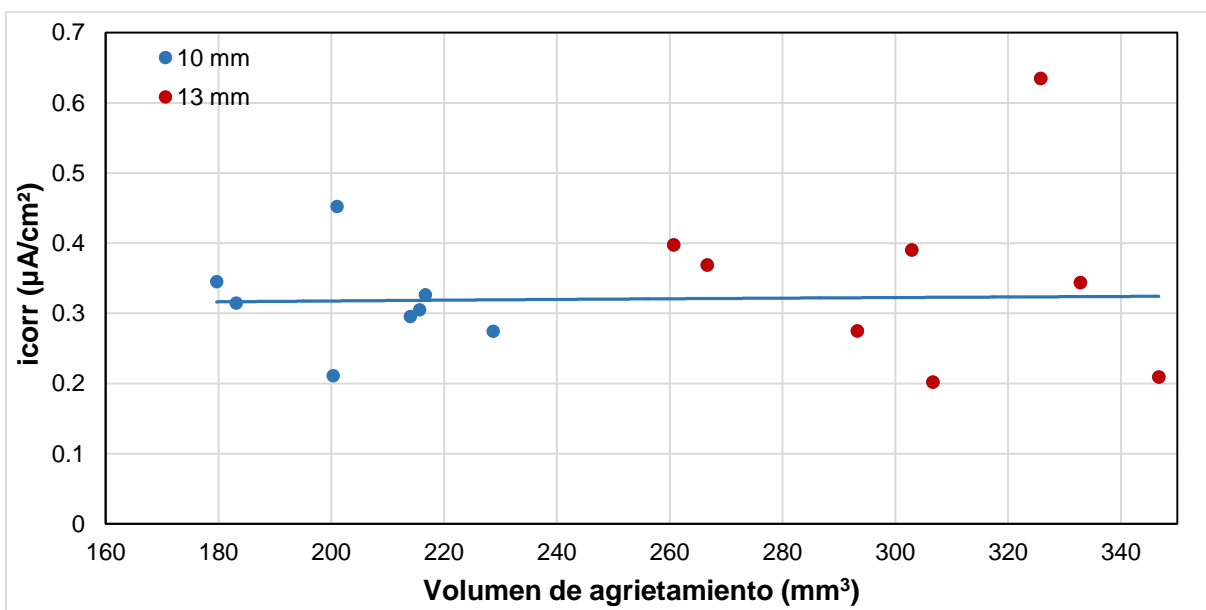


Figura 5.16 Efecto del volumen de agrietamiento ( $V_{g2}$ ) en la velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro

## **5.5 Efecto de los factores climáticos en el comportamiento electroquímico de barras de AR longitudinal a tensión y del concreto**

De la Figura 5.17 a la Figura 5.19 se presenta una comparación entre los promedios de humedad relativa en el aire expresados en porcentaje y los promedios de los parámetros de corrosión (Ecorr, icorr y Resistividad) de trabes con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro. Dichos promedios corresponden a las mediciones realizadas al centro y a los extremos de las trabes. Se observa que en general, no existe una correlación entre los factores climáticos y el potencial de corrosión en trabes sujetas a cargas sostenidas para etapas iniciales de corrosión. Sin embargo, la humedad en el aire es un factor que influye directamente en la evolución de la corrosión y se esperaba observar una tendencia similar entre los parámetros de corrosión y el historial de la humedad relativa del aire, lo cual no se observó. Esto puede estar asociado a que los datos de los factores climáticos fueron obtenidos de la estación meteorológica del CINVESTAV (Unidad Mérida), la cual se encuentra a 3.3 km de distancia de donde se encuentran almacenadas las trabes. Por su parte, dicha estación se encuentra expuesta a la intemperie y las trabes se encuentran dentro de un laboratorio cerrado. Por tanto, las condiciones macro climáticas (estación meteorológica) difieren de las condiciones micro climáticas (resguardo de trabes) y no se puede formular una correlación óptima entre las variaciones de la humedad relativa en el aire y la evolución de la corrosión.

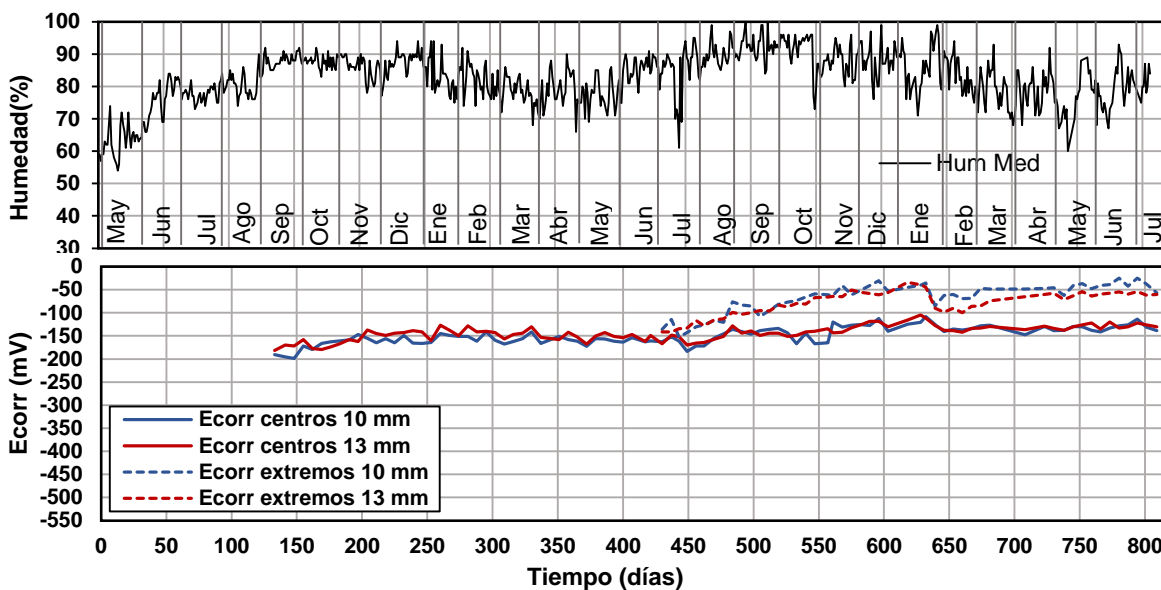


Figura 5.17 Humedad relativa y promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

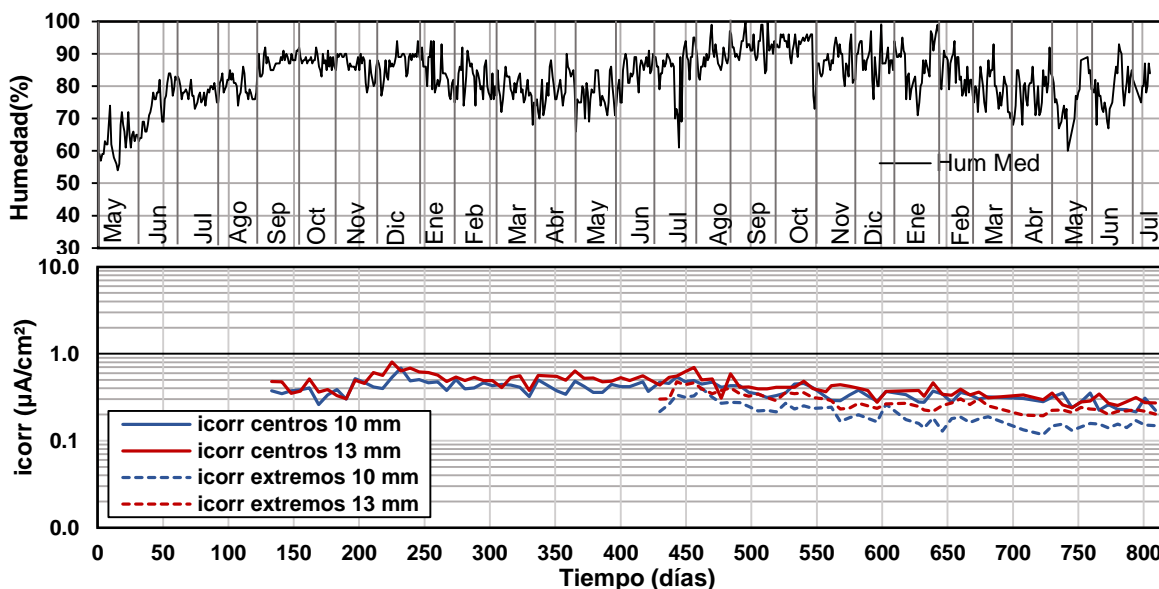


Figura 5.18 Humedad relativa y promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro



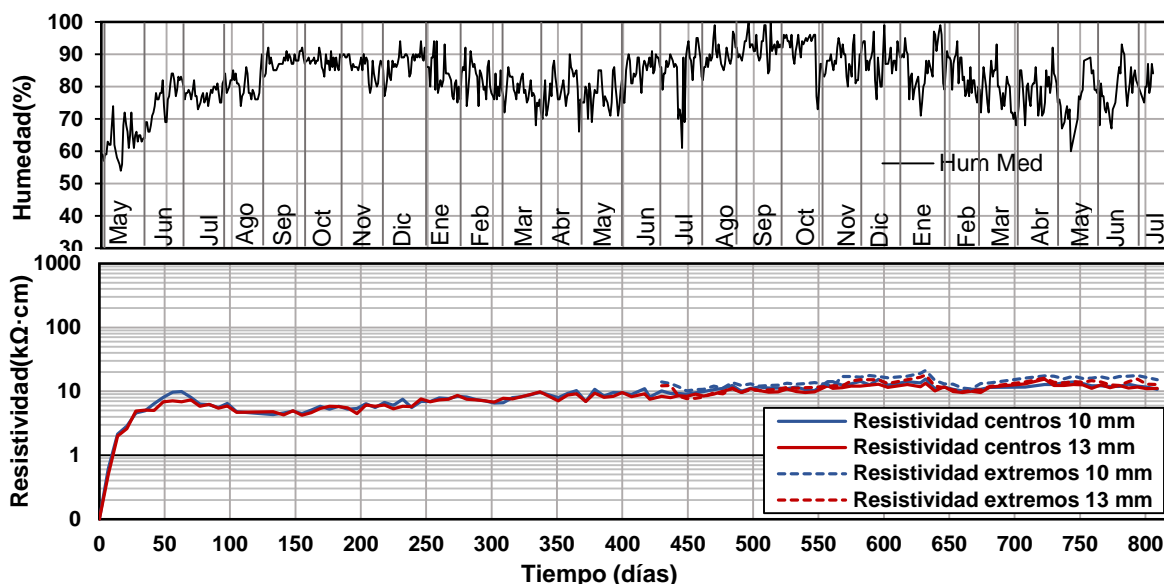


Figura 5.19 Humedad relativa y promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

De la Figura 5.20 a la Figura 5.22 se presenta una comparación entre los promedios de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y los promedios de los parámetros de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ,  $i_{\text{corr}}$  y resistividad) medidos al centro y a los extremos de traveses de CR con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro. Debido a que la temperatura es un factor que influye en la evolución de la corrosión se esperaba observar una tendencia similar entre los parámetros de corrosión y el historial de la temperatura. Dicha tendencia no ocurrió durante este trabajo de investigación. Esto se debe a que las condiciones macro climáticas (estación meteorológica) difieren de las condiciones micro climáticas (resguardo de traveses). Por tanto las variaciones de la temperatura no generaron un efecto significativo en la evolución de la corrosión.

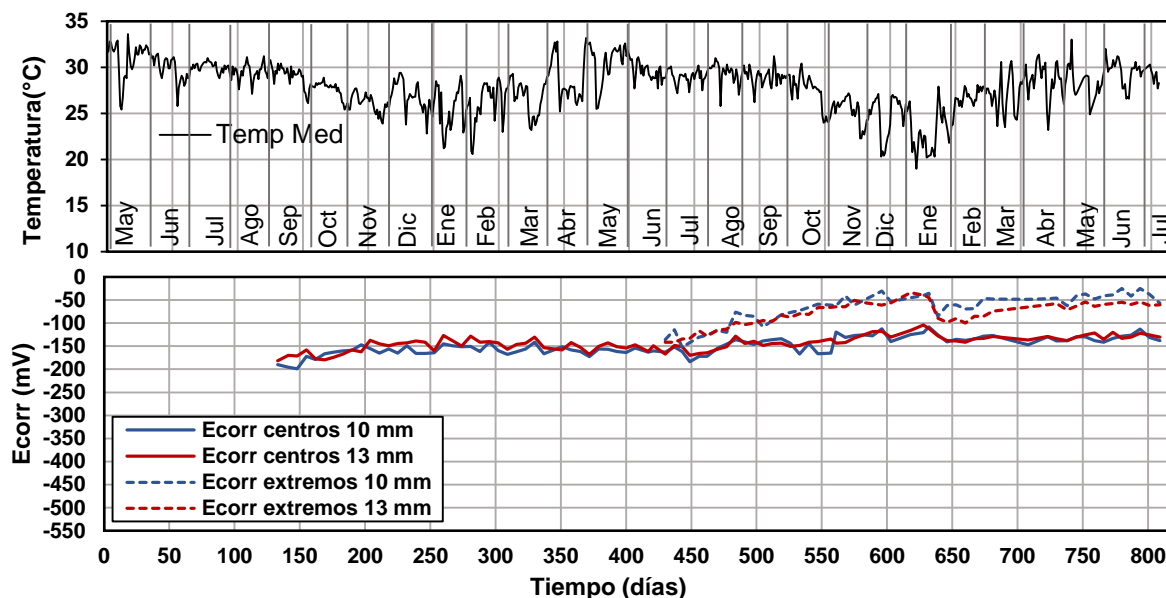


Figura 5.20 Temperatura media y promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

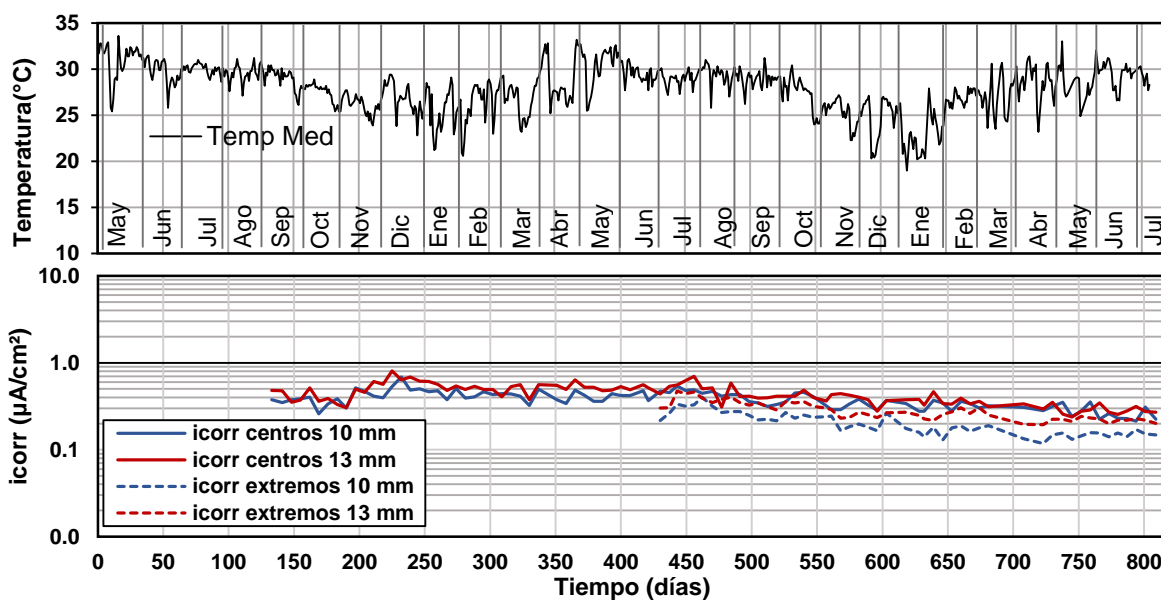


Figura 5.21 Temperatura y promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

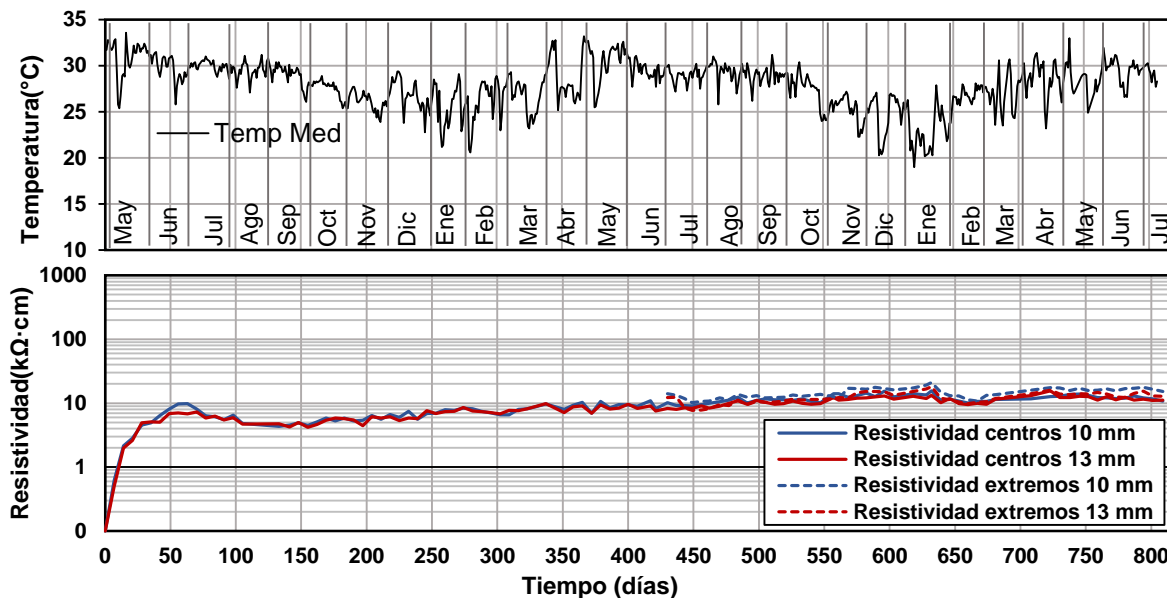


Figura 5.22 Temperatura y promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

De la Figura 5.23 a la Figura 5.25 se presenta una comparación entre el volumen de precipitación diaria (mm) y los promedios de los parámetros de corrosión ( $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$  y Resistividad) medidos al centro y a los extremos de trabes de CR con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro. Debido a que la precipitación podría generar un efecto de manera puntual en la evolución de la corrosión se esperaba observar dicho efecto reflejado en los parámetros de corrosión. Sin embargo, dicho efecto no fue evidente en los parámetros de corrosión. Esto se debe a que las condiciones macro climáticas (estación meteorológica) difieren de las condiciones micro climáticas (Resguardo de trabes). Por tanto las variaciones de la precipitación no generaron un efecto significativo en la evolución de los parámetros de corrosión.

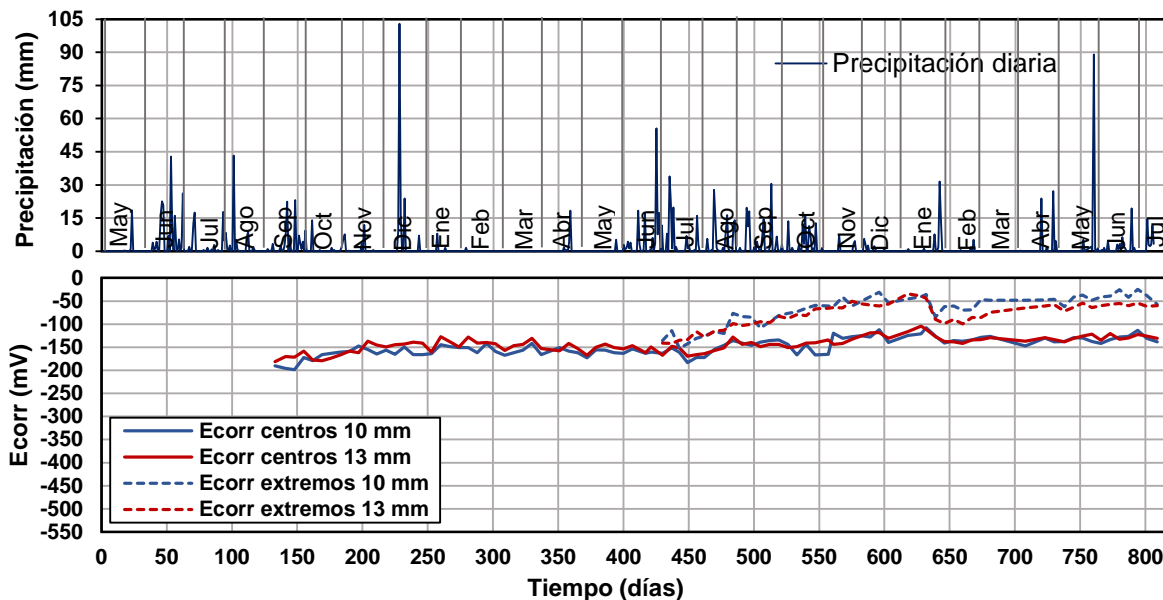


Figura 5.23 Precipitación y promedios de potenciales de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

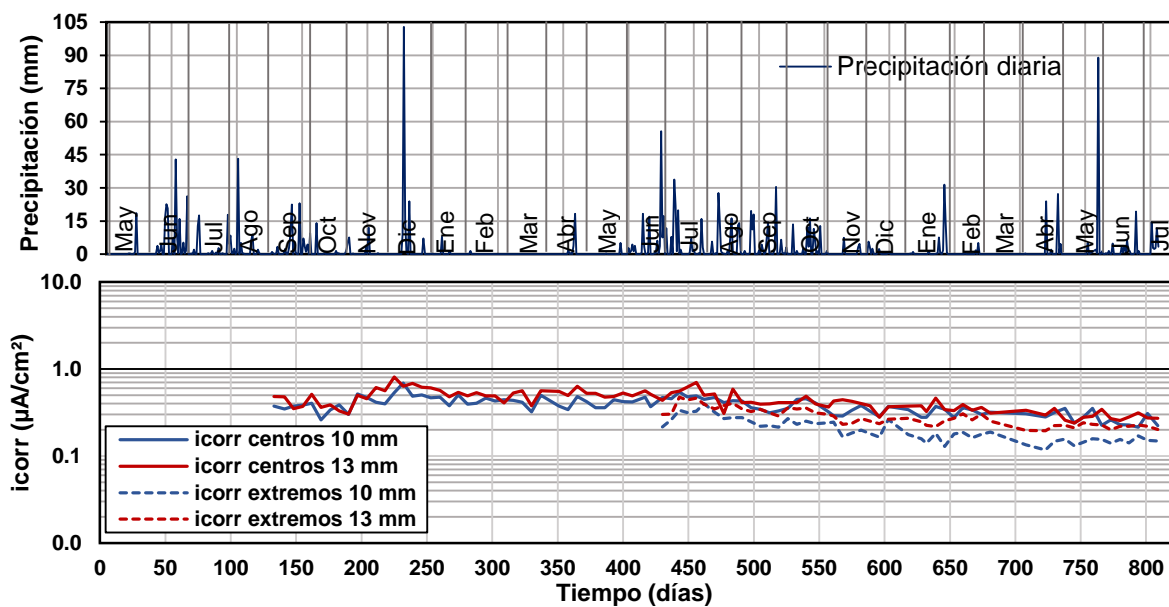


Figura 5.24 Precipitación y promedios de velocidades de corrosión en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

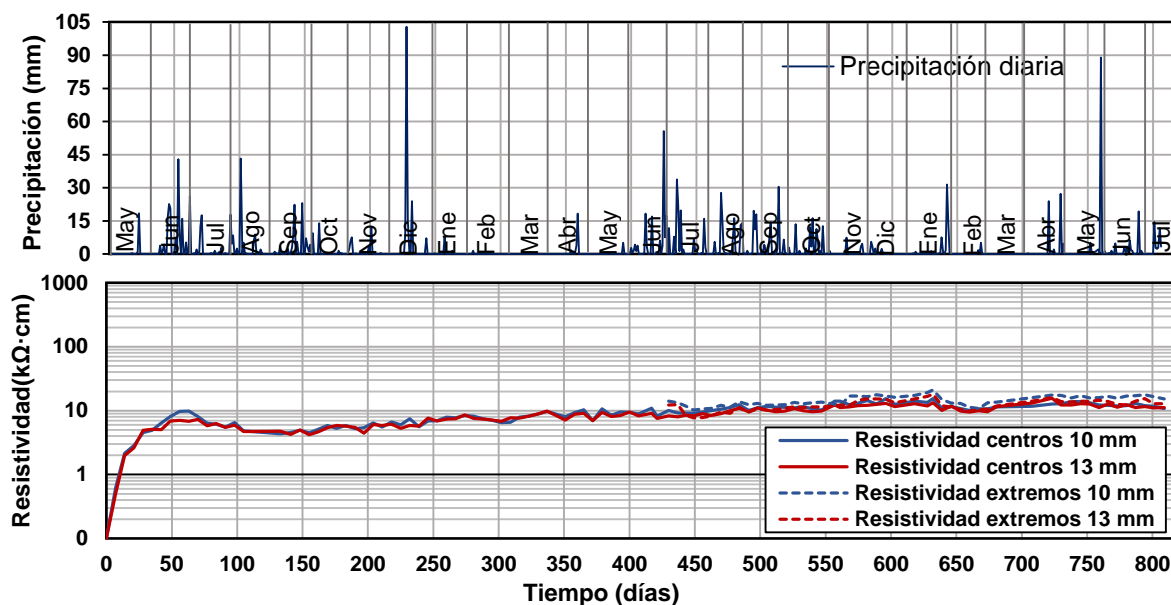


Figura 5.25 Precipitación y promedios de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro

Se esperaba que los parámetros de corrosión tuvieran una tendencia similar al historial de la humedad, temperatura y precipitación. Sin embargo dichos parámetros tuvieron una tendencia casi constante e independiente de los parámetros climáticos. Esto se debe a que los valores de las condiciones climáticas fueron obtenidos de una estación meteorológica que se encuentra ubicada aproximadamente a 3.3 km del centro de almacenamiento de las traveses. Por otra parte, las traveses de CR se encuentran bajo condiciones de resguardo. Por tanto no existe un efecto significativo en la evolución de la corrosión asociado al efecto que generan las condiciones climáticas exteriores.

## CONCLUSIONES

En esta investigación se evaluó la evolución de la corrosión en traveses de CR sometidas a cargas sostenidas. Se consideraron 8 traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y 8 con 13 mm de diámetro. Las traveses se construyeron a escala natural y se sometieron a cargas sostenidas que generaran el 60% del esfuerzo de fluencia del AR. Se midieron las velocidades de corrosión, el potencial de corrosión, la resistividad del concreto y el contenido de cloruros. Adicionalmente, se analizó el efecto de las condiciones climáticas de la ciudad de Mérida y los agrietamientos en la evolución de la corrosión. Con base en los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

### **Efecto del diámetro del acero de refuerzo longitudinal a tensión en la evolución de la corrosión**

- Los valores de potencial de corrosión fueron mayores para traveses con AR longitudinal a tensión de menor diámetro. El bajo potencial de corrosión en el AR está principalmente asociado al agrietamiento y la porosidad efectiva de las traveses de CR. Por tanto, el potencial de corrosión fue mayor al centro del claro que en los extremos.
- Los valores de velocidad de corrosión fueron mayores para traveses con AR longitudinal a tensión de mayor diámetro. Esto se debió a que la cantidad de grietas fue mayor en traveses con AR longitudinal a tensión de mayor diámetro. Por tanto, la velocidad de corrosión fue mayor al centro del claro (zona agrietada) que en los extremos (zona no agrietada). La pendiente de velocidad de corrosión acumulada no presentó cambios significativos. Por tanto, no existe corrosión activa asociada a la velocidad de corrosión.
- Los valores de resistividad eléctrica del concreto fueron similares al centro y en los extremos de traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. Por tanto, el agrietamiento no generó un efecto significativo en la resistividad del concreto de las traveses. La pendiente de resistividad acumulada

no presentó cambios significativos debido al bajo contenido de cloruros en las trabes de CR.

- La baja concentración de cloruros indica que los valores de potenciales de corrosión son correctos. Esto se debe a que la concentración de cloruros es menor que el umbral establecido en la norma NMX-C-523-ONNCCE-2016 (2016). Por tanto, no existe corrosión activa asociada al contenido de cloruros.
- Los valores de velocidad de corrosión reportados en esta investigación indican una corrosión activa. Por otra parte, el bajo contenido de cloruros en las trabes indica que el AR está pasivado. Por tanto, existe un efecto del agrietamiento en la evolución de la corrosión en trabes de CR sujetas a flexión.

### **Efecto del ancho y cantidad de grietas en la evolución de la corrosión**

- El ancho y cantidad de grietas en función del diámetro del AR longitudinal a tensión generan un efecto significativo en la evolución de la corrosión. Debido a esto, los valores de velocidad y potencial de corrosión de las trabes no se ajustan a los valores normativos establecidos para calificar la integridad de las trabes de CR asociada a un proceso de corrosión en el AR.
- El volumen de agrietamiento es proporcional al diámetro de AR longitudinal a tensión cuando está sometido al mismo nivel de esfuerzo. Los volúmenes de agrietamiento  $V_{g1}$  y  $V_{g2}$  presentan consistencia y validez para determinar el efecto del agrietamiento en la evolución de la corrosión en niveles iniciales.
- A mayor volumen de agrietamiento, los valores de potencial disminuyen. Por tanto los resultados son consistentes al evaluar las trabes de CR agrietadas.
- A mayor volumen de agrietamiento, los valores de velocidad de corrosión incrementan. Esto se debe a que las grietas propician el ingreso de agentes externos que afectan la estabilidad de la capa pasivante en el AR.
- Se observaron tendencias similares al evaluar los volúmenes de agrietamientos  $V_{g1}$  y  $V_{g2}$  contra el potencial y la velocidad de corrosión. Por tanto, ambos métodos para definir el volumen de agrietamiento son consistentes. Por su parte, definir  $V_{g1}$  resulta más sencillo de realizar y puede ser utilizado para

evaluar el efecto del volumen de agrietamiento en la evolución de la corrosión en niveles iniciales de traveses de CR.

- Las variables más significativas para correlacionar el volumen de agrietamiento con la evolución de la corrosión son el ancho y cantidad de grietas.
- Actualmente la durabilidad de las estructuras de CR está asociada a la calidad de los materiales (Agregados y aditivos utilizados) y métodos (Relación a/c, tiempo de curado, entre otros) utilizados para su fabricación. Por otra parte, las estructuras de CR en su mayoría se encuentran agrietadas debido a la baja resistencia que presenta el concreto ante esfuerzos de tensión. Por tanto, se deben considerar los niveles de esfuerzo presentes en las estructuras de CR para determinar y correlacionar los parámetros de corrosión y los niveles de daño presentes en dichas estructuras.

### **Efecto de las condiciones climáticas en la evolución de la corrosión**

- Las condiciones macro climáticas (estación meteorológica) difieren de las condiciones micro climáticas (resguardo de traveses). Por tanto no se puede formular una correlación óptima entre los factores climáticos y los valores de potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad eléctrica del concreto en traveses sujetos a flexión en etapas iniciales de la corrosión.



## RECOMENDACIONES

En esta sección se hacen las siguientes recomendaciones para la continuación del proyecto al que pertenece este trabajo de investigación o para proyectos similares.

- Se recomienda seguir realizando estudios para evaluar la evolución de la corrosión en etapas avanzadas para traveses sujetas a flexión.
- Cuando se estudien niveles de corrosión avanzados se recomienda realizar periódicamente pruebas para determinar el contenido de cloruros en el concreto. Esto se debe realizar para correlacionar los parámetros electroquímicos de corrosión con un nivel de daño apreciable en las traveses de CR a flexión.
- Para correlacionar el volumen de agrietamiento con niveles de corrosión avanzada se recomienda continuar con la medición de los parámetros de corrosión, así como la medición periódica de anchos y longitudes de grietas en las traveses de CR.
- Para un mejor control del agrietamiento se recomienda utilizar barras de menor diámetro.
- Para niveles de corrosión inicial se recomienda realizar el control de las cargas sostenidas cada 100 días para garantizar una pérdida mínima del 13 % respecto de las cargas asociadas al 60% del esfuerzo de fluencia del AR longitudinal a tensión.
- Se recomienda realizar un control de las deflexiones en las traveses de CR para determinar el efecto de la corrosión en los estados límite de servicio.

## REFERENCIAS

1. Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., & Castro, P. (21 de Marzo de 2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, 30, 1047-1055.
2. Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, O., Elsener, B. (Noviembre de 2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37, 623-643.
3. Apostolopoulos, C. A., Sotiris Demis, & Papadakis, V. (2013). Chloride-induced corrosion of steel reinforcement – Mechanical performance and pit depth analysis. *Construction and Building Materials*, 38, 139-146.
4. Arya, C., & Ofori-Darko, F. (1996). Influence of crack frequency on reinforcement corrosion y concrete. *Cement and concrete research*, 26(3), 345-353.
5. ASTM - C1152 / C1152M. (2012). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. USA: ASTM.
6. ASTM - C1218 / C1218M. (2002). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. USA: ASTM.
7. ASTM - C876. (2002). Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. USA: ASTM.
8. Apostolopoulos, C., & Papadakis, V. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22, 2316-2324.
9. Ballim, Y., & Reid, J. (2003). Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams—an experimental critique of current test methods. *Cement & Concrete Composites*, 25, 625-632.
10. Bastos de Souza, J., & Pontes de Deus, E. (2014). Damage Mechanics Applied for Steel Reinforcements in Concrete Structures Under Corrosion. *Procedia Materials Science* 3, 2000-2005.
11. Bazant, Z. P. (1979). Physical model for steel corrosion in concrete sea structures--theory. *Journal of the Structural Division-ASCE*, 105(ST6), 1137-1166.

12. Borosnyói, A., & Balázs, G. (2005). Models for flexural cracking in concrete: the state of art. *Structural Concrete*, 6(2), 53-62.
13. C.L. Page, K. W. (1982). Aspects of the electrochemistry of steel in concrete. *Nature*, 297, 109-115.
14. Castro-Borges, P., Balancan-Zapata, M., & López-González, A. (2013). Analysis of tools to evaluate chloride threshold for corrosion onset of reinforced concrete in tropical marine environment of Yucatán, México. *Journal of chemistry*.
15. CC Technologies. (2001). *Corrosion Costs And Preventive Strategies In The United States*. Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Dublin, Ohio.
16. Comité ACI 224. (2001). *Control de la fisuración en estructuras de hormigón*. American Concrete Institute (ACI).
17. Comité ACI 318. (1999). Discussion of a Report Published in the November 1998 Issue of *Concrete International*, pp. S1-S90. 21(5), 318.1-318.49.
18. da Silva, F., Helene, D., Castro Borges, P., & Liborio, J. (2009). Source of variations when comparing concrete carbonation results. (ASCE, Ed.) *Journal of materials in civil engineering*, 7(21), 333-342.
19. Du, Y., Clark, L., & Chan, A. (2005). Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, 55, 135-147.
20. CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (1998). *DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura*, 2da edición.
21. Gao, Z., Liang, R., & Patnaik, A. (2016). Effects of sustained loading and pre-existing cracks on corrosion behavior of reinforced concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 124, 776-785.
22. Gergely, P., & Lutz, L. A. (1968). Maximum crack width in reinforced concrete flexural members. American Concrete Institute (ACI).
23. González, J., Andrade, C., Alonso, C., & Feliu, S. (1995). Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 257-264.

24. Guevara, B., Juárez, C., Fajardo, G., & Castro-Borges, P. (Diciembre de 2009). Comportamiento a cortante en vigas de concreto reforzado con deterioro por corrosión en los estribos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 259-270.
25. Jaffer, S., & Hansson, C. (2009). Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions. *Cement and Concrete Research*, 39, 116-125.
26. León Chablé, F. (2017). Estudios preliminares de la corrosión en traves de concreto con barras de 10 mm y 13 mm de diámetro. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
27. Lu, C., Yuan, S., Pu, C., & Lui, R. (2016). Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack. *Construction and building materials*, 123, 649-660.
28. Muthulingam, S., & Rao, B. (Enero de 2015). Non-uniform corrosion states of rebar in concrete under chloride environment. *Corrosion Science*, 93, 267-282.
29. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2001). Industria de la construcción - Resistividad eléctrica del concreto hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo. NMX- C- 514- ONNCCE-2016 , Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
30. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (s.f.). Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Concentración de cloruros solubles en agua y ácido – Determinación en concreto hidráulico – Método de extracción y método de determinación por ion selectivo. NMX-C-523-ONNCCE-2015, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
31. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (s.f.). Industria de la construcción – Durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Medición de velocidad de corrosión en campo especificaciones y método de ensayo. NMX-C-501-ONNCCE-2016, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.

32. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la edificación, S. (03 de Febrero de 2016). Industria de la construcción - Durabilidad de estructuras de concreto reforzado - Medición de potenciales de corrosión del acero de refuerzo sin revestir, embebido en concreto - especificaciones y método de ensayo.NMX-C-495-ONNCCE-2015. Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
33. Papadopoulos, M., Apostolopoulos, C., Zervaki, A., & Haidemenopoulos, G. (2011). Corrosion of exposed rebars, associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion tests. *Construction and Building Materials*, 25, 3367-3374.
34. Prieto Coyoc, A. E. (2015). Comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales: Efecto de la relación aspecto. Tesis de maestría en ingeniería. Mérida, Yucatán, México.
35. Roberge, P. R. (2000). *Handbook of corrosion engineering* (1ra ed.). Estados Unidos: Mc Graw Hill.
36. Rodríguez, J., Ortega, L., & Casal, J. (31 de Agosto de 1997). Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 239-248.
37. Rodríguez, M. E., & Botero, J. C. (1997). Evaluación del comportamiento de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles incluyendo pandeo. *Revista de Ingeniería Sísmica*(56), 9-27.
38. Scott, B. D., Park, R., & Priestley, M. (1982). Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates. *America Concrete Institute(ACI)*, 13-27.
39. Shao-feng, Z., Chun-hua, L., & Rong-gui, L. (2011). Experimental determination of chloride penetration in cracked concrete beams. *Procedia Engineering*, 380-384.
40. Torres Acosta, A. A., Fabella Gallegos, M. J., & Hernández Jiménez, J. R. (2003). Stiffness loss of concrete beams due to corrosion of the reinforcing steel. *NACE International* (03282).

41. Torres-Acosta, A. A., Navarro-Gutiérrez, S., & Terán-Guillén, J. (2007). Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 29, 1145-1152.
42. Visairo Méndez, R. (2016). Efecto de la carga de servicio y contaminación por cloruros en el comportamiento mecánico y electroquímico de trabes de concreto reforzado sujetas a flexión. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
43. X. L. Gu, W. P. Zhang, D. F. Shang, & X. G. Wa. (2010). Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 3545-3552.
44. Yu-Chen, O., Teddy Susanto, Y. T., & Hwasung, R. (2016). Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars. *Construction and building materials*, 103, 93-104.

## APÉNDICE A

En la Figura A. 1 y la Figura A. 2 se presentan las gráficas de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) – Tiempo en los extremos (primer octavo y último octavo de la longitud) para traveses con AR de 10 mm (T1 a T8) y 13 mm (T9 a T16) de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores tomados para las dos caras laterales y los dos extremos de cada trabe (A1, A2, B1 y B2). Las líneas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo con la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 (2016).

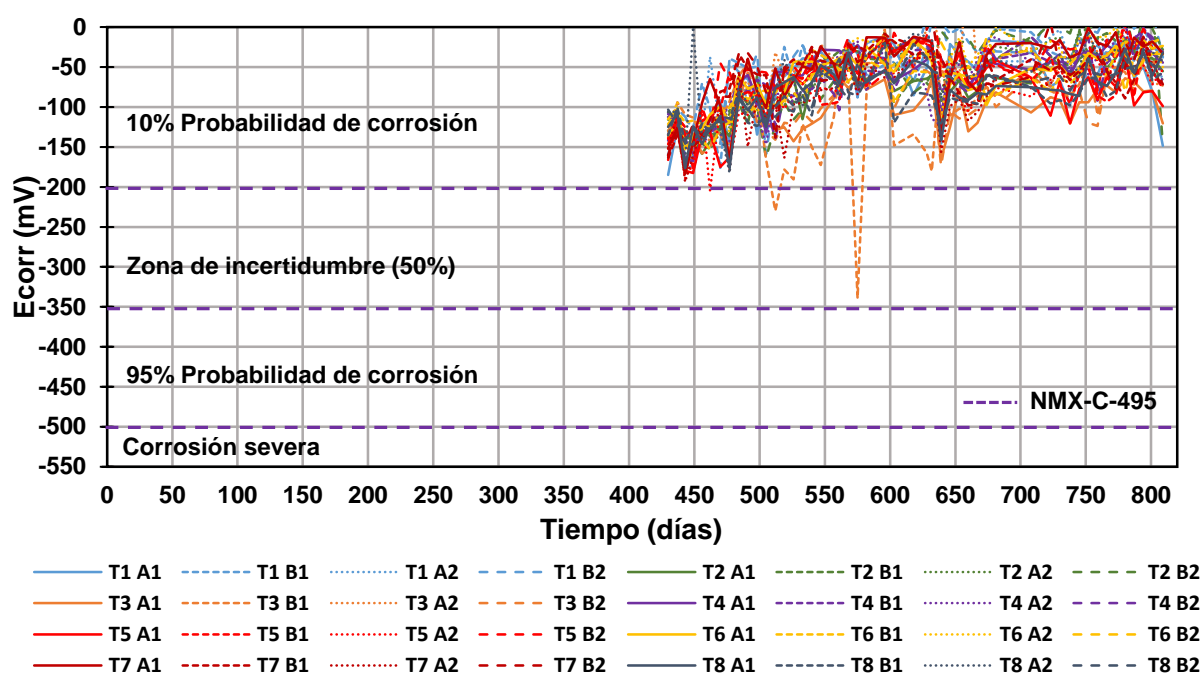


Figura A. 1 Potencial de corrosión – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 10 mm de diámetro

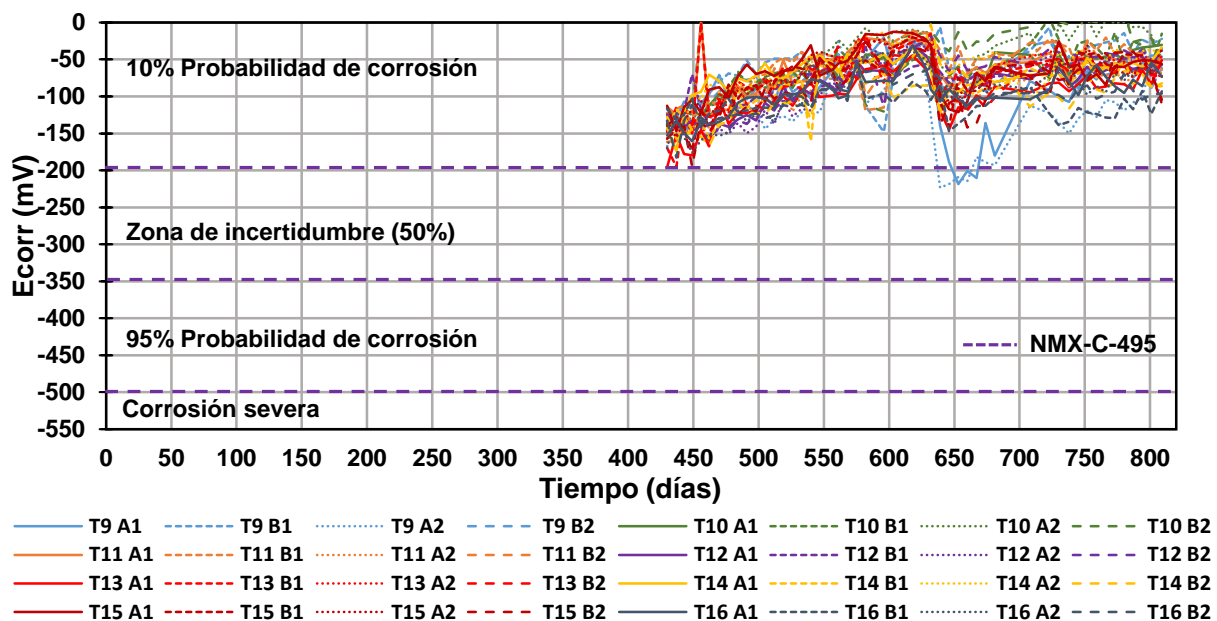


Figura A. 2 Potencial de corrosión – Tiempo en los extremos para traves con AR de 13 mm de diámetro

En la Figura A. 3 y la Figura A. 4 se presentan las gráficas de velocidad de corrosión (icorr) – Tiempo (días) en los extremos (primer octavo y último octavo de la longitud) para traves con AR de 10 mm (T1 a T8) y 13 mm (T9 a T16) de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores tomados para las dos caras laterales y los dos extremos de cada trabe (A1, A2, B1 y B2). Las líneas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo con la norma NMX-C-501-ONNCCE-2014 (2015).



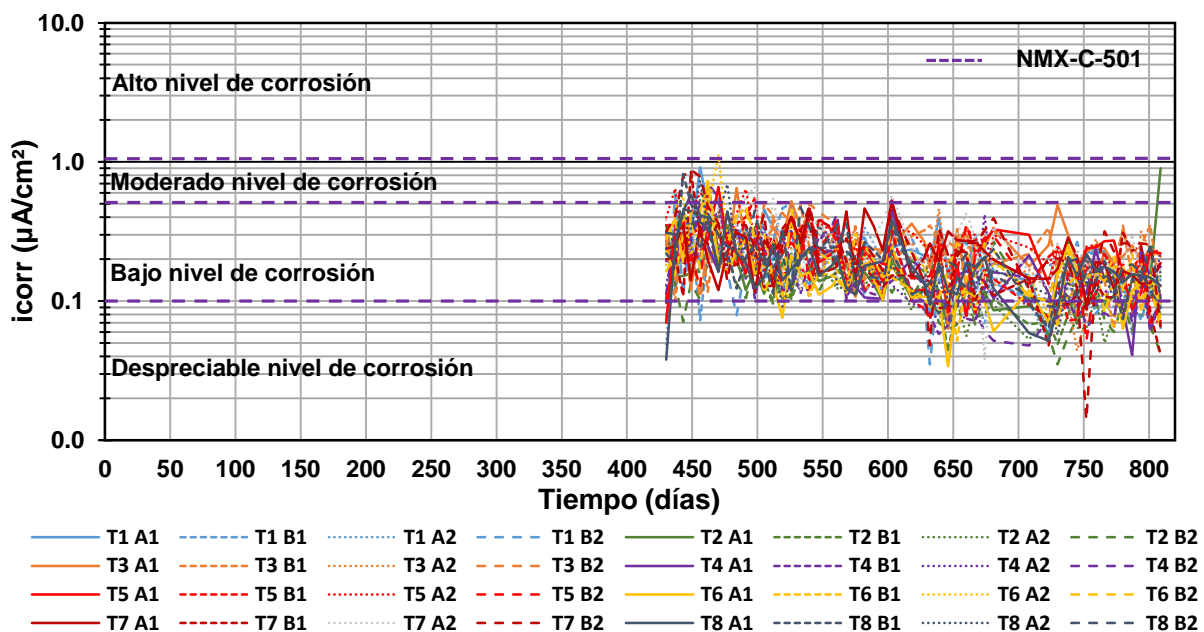


Figura A. 3 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 10 mm de diámetro

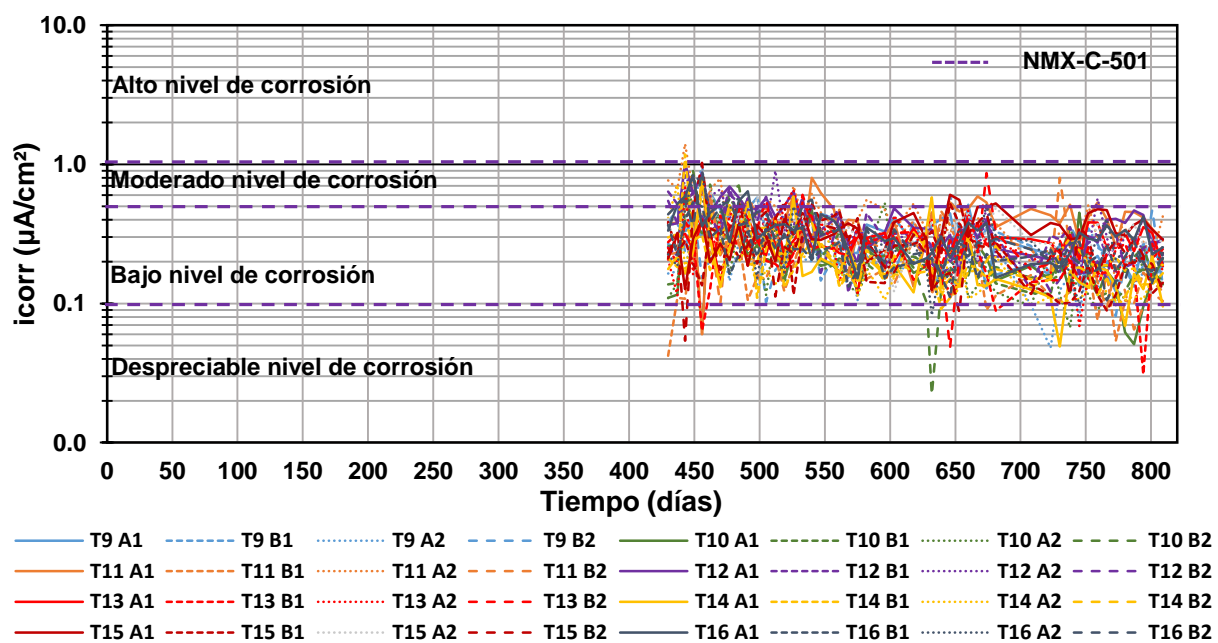


Figura A. 4 Velocidad de corrosión instantánea – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 13 mm de diámetro

En la Figura A. 5 y la Figura A. 6 se presentan las gráficas de resistividad eléctrica – Tiempo (días) en los extremos (primer octavo y último octavo de la longitud)

para traveses con AR de 10 mm (T1 a T8) y 13 mm (T9 a T16) de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores tomados para las dos caras laterales y los dos extremos de cada trabe (A1, A2, B1 y B2). Las líneas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo con la norma NMX-C-501-ONNCCE-2014 (2015).

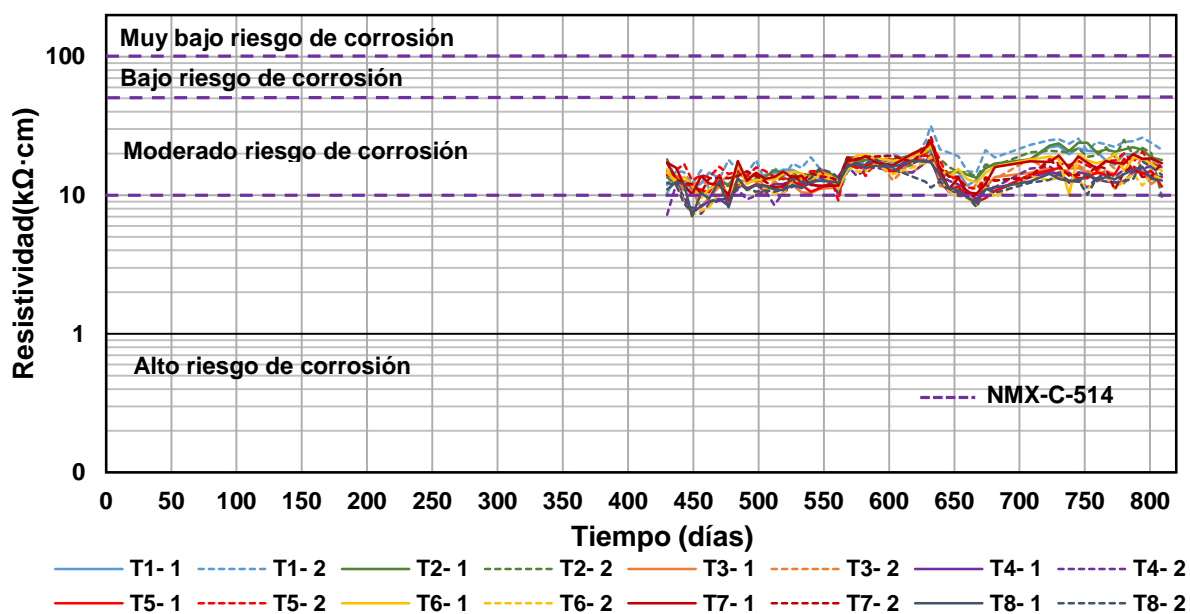


Figura A. 5 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 10 mm de diámetro

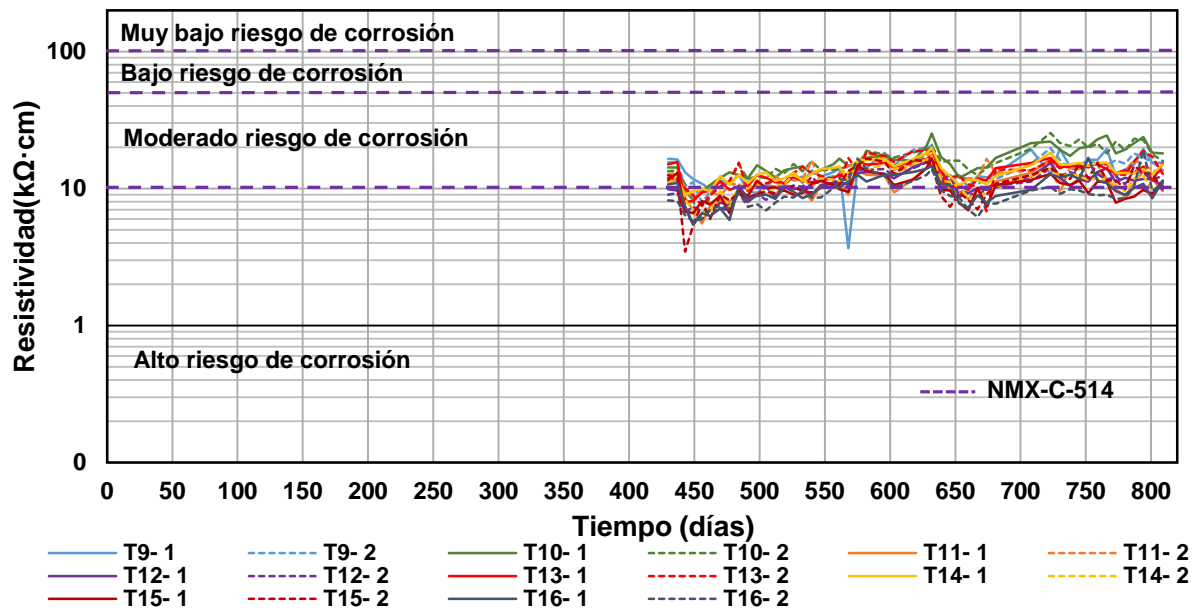


Figura A. 6 Resistividad eléctrica del concreto – Tiempo en los extremos para traveses con AR de 13 mm de diámetro

## APÉNDICE B

En esta sección se presentan de la Figura B.1 a la Figura B. 4 los patrones de agrietamiento y anchos de grieta para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. Se presentan los patrones de agrietamiento de las dos caras (A y B) de las traveses de CR.

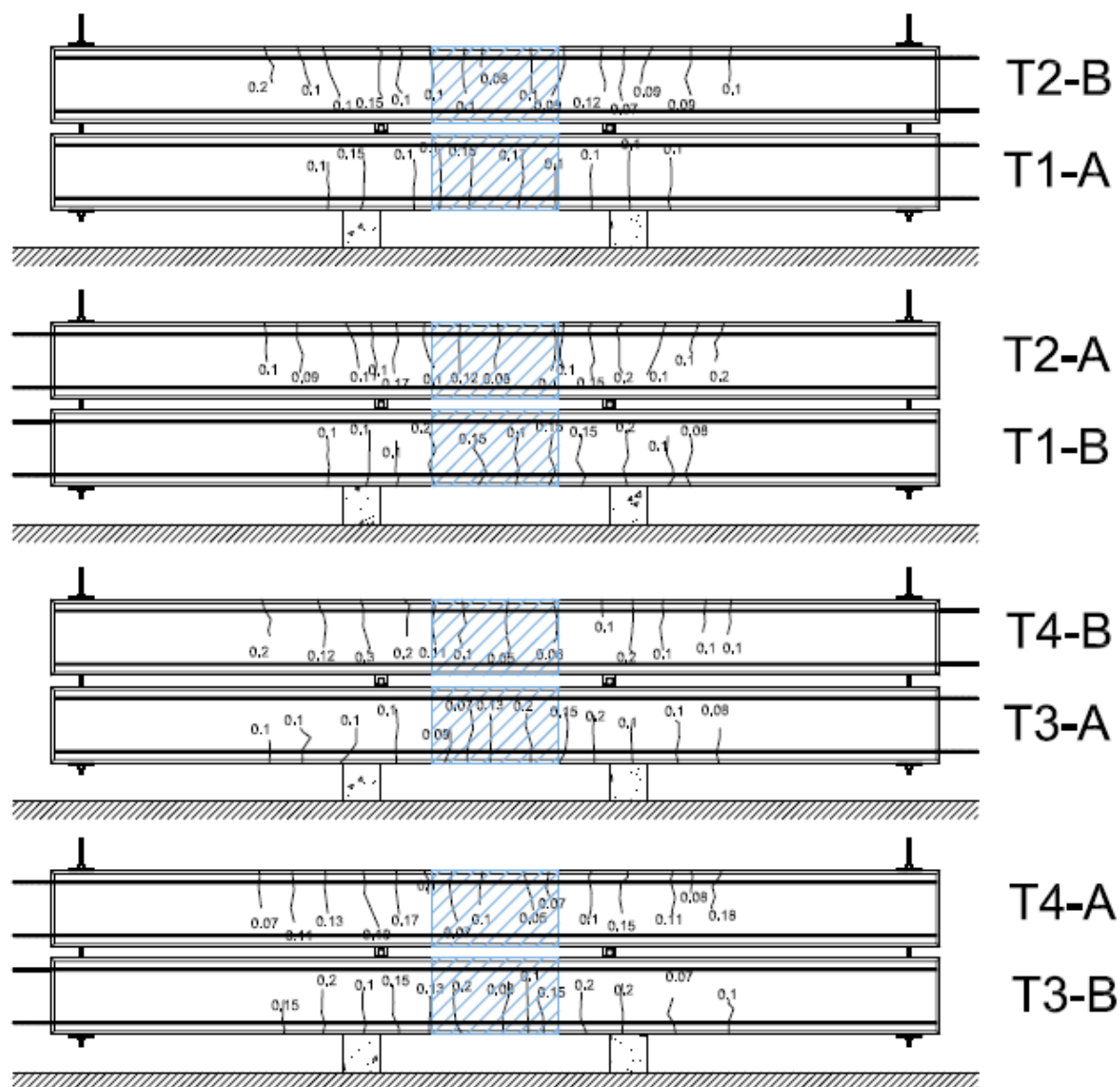


Figura B.1 Esquema de grietas en traveses T1 a T4 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

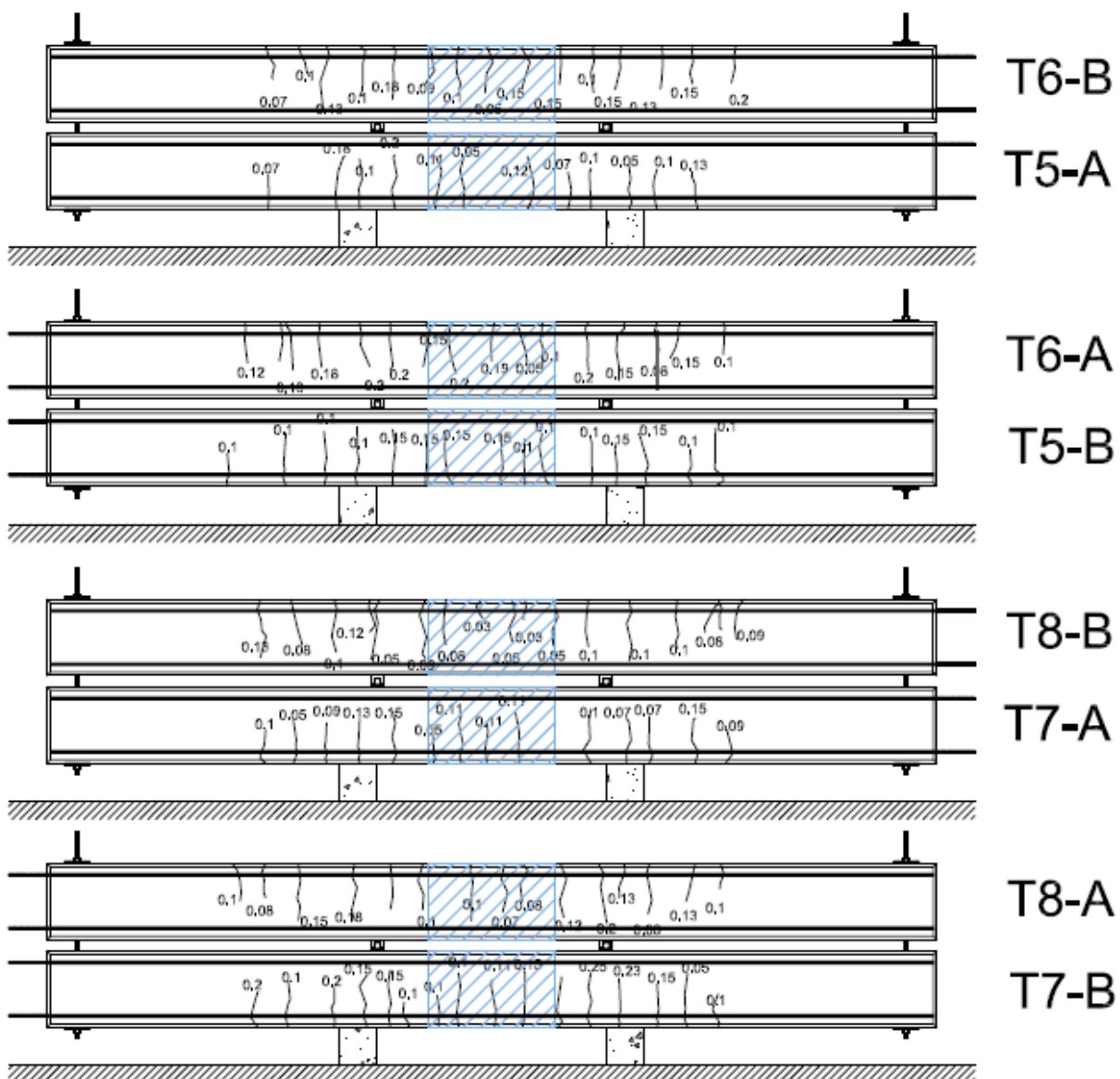


Figura B. 2 Esquema de grietas en traves T5 a T8 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

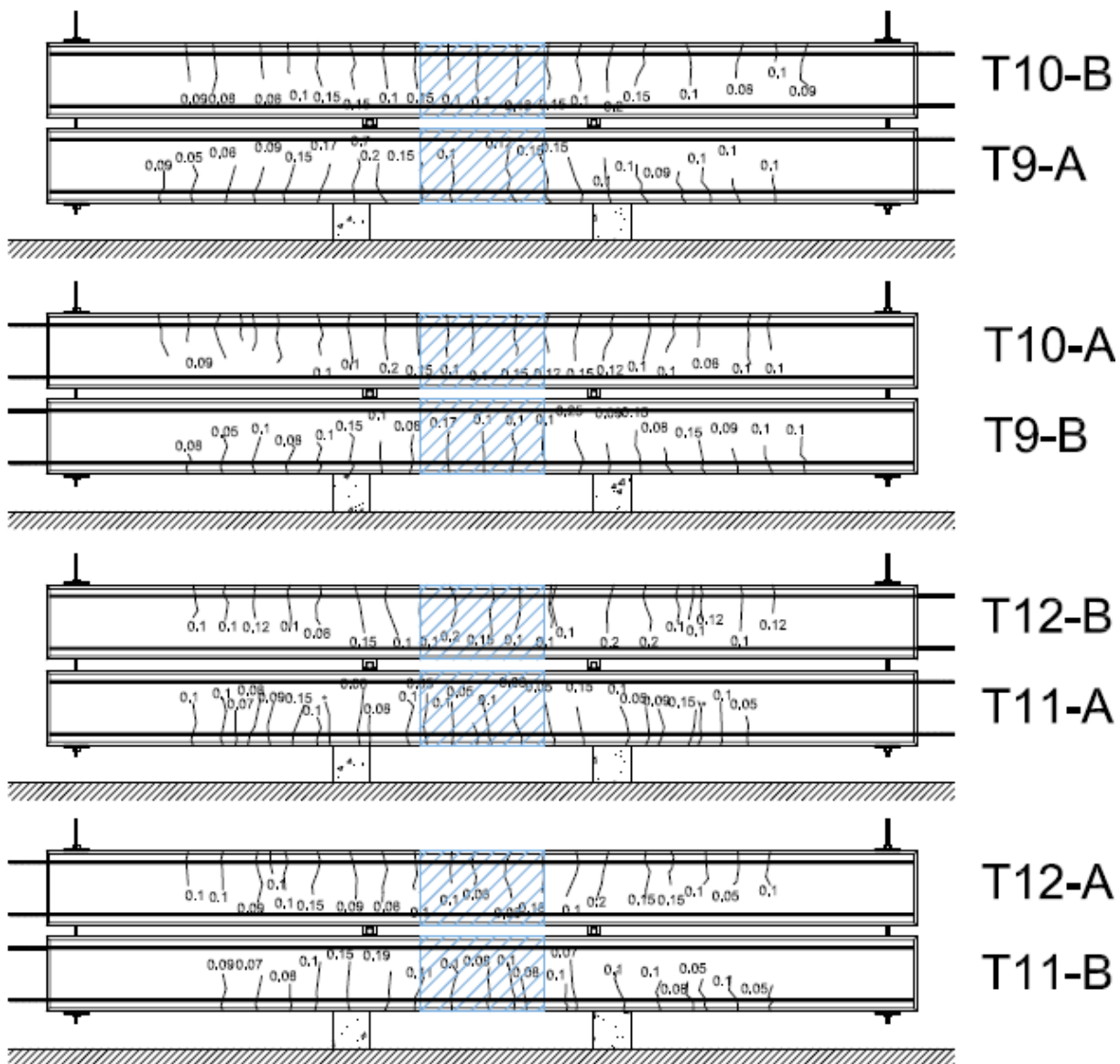


Figura B. 3 Esquema de grietas en traves T9 a T12 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

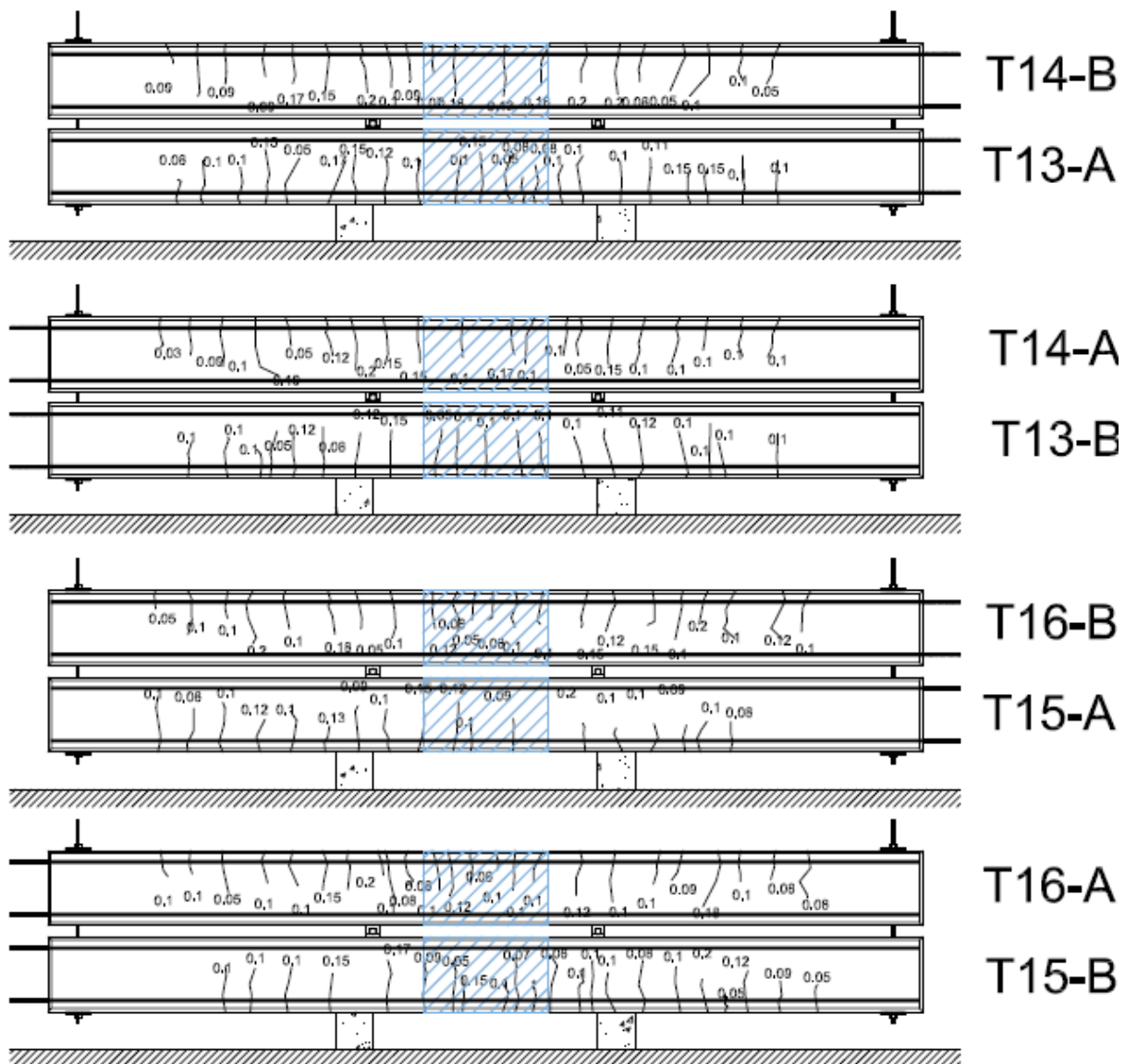


Figura B. 4 Esquema de grietas en traves T13 a T16 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

## APÉNDICE C

En esta sección de la Tabla C. 1 a la Tabla C. 8 se presentan los resultados experimentales de ubicación relativa, ancho de grieta, longitud de grieta y distancia entre grietas para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

Tabla C. 1 Ubicación relativa de grietas en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

Grieta	T-01		T-02		T-03		T-04		T-05		T-06		T-07		T-08	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	109	98	85	84	86	83	86	83	87	87	84	86	86	86	85	84
2	122	107	95	97	99	104	98	105	114	97	101	99	97	98	95	96
3	143	123	108	107	114	125	105	122	123	114	110	110	110	110	113	113
4	153	141	125	128	136	139	123	139	137	126	123	123	123	125	123	127
5	165	154	137	137	155	156	137	150	153	136	137	136	136	136	133	131
6	184	167	148	149	164	162	154	162	164	152	155	151	152	149	148	149
7	199	182	152	163	173	172	164	180	189	162	165	162	163	163	155.8	171
8	213	199	174	170	189	188	180	198	205	171	174	173	173	174	163	183
9	228	214	189	189	200	201	192	217	214	190	191	187	186	188	170	188
10	244	226	203	202	214	213	203	229	229	201	201	202	214	196	183	199
11		241	214	217	229	227	214	241	240	214	215	215	228	208	202	213
12			224	226	247	243	227	258	256	228	227	226	237	215	215	229
13			234	237	263	259	242	268.3		241	243	242	255	224	229	248
14			253	252			255			256	256	254	267	237	251	264
15			266	268			268			279	258	271		255	264	268
16											272			267	277	274





Tabla C. 3 Anchos de grieta en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

Grieta	T-01		T-02		T-03		T-04		T-05		T-06		T-07		T-08	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0.1	0.08	0.2	0.2	0.1	0.1	0.18	0.2	0.07	0.1	0.1	0.07	0.1	0.1	0.1	0.13
2	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.07	0.08	0.12	0.18	0.05	0.15	0.1	0.05	0.05	0.13	0.08
3	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.11	0.3	0.1	0.15	0.08	0.13	0.09	0.15	0.08	0.1
4	0.1	0.15	0.2	0.15	0.1	0.2	0.15	0.2	0.2	0.15	0.15	0.1	0.13	0.23	0.13	0.12
5	0.15	0.15	0.15	0.1	0.09	0.15	0.1	0.11	0.11	0.2	0.2	0.18	0.15	0.25	0.2	0.09
6	0.17	0.1	0.1	0.1	0.07	0.1	0.07	0.1	0.05	0.1	0.1	0.09	0.05	0.09	0.12	0.05
7	0.1	0.15	0.1	0.1	0.13	0.08	0.05	0.05	0.12	0.09	0.05	0.1	0.11	0.15	0.08	0.03
8	0.1	0.2	0.08	0.08	0.2	0.2	0.1	0.06	0.07	0.15	0.19	0.05	0.11	0.11	0.07	0.05
9	0.1	0.1	0.12	0.1	0.15	0.13	0.07	0.1	0.1	0.15	0.2	0.15	0.11	0.1	0.1	0.03
10	0.1	0.1	0.1	0.09	0.2	0.15	0.1	0.2	0.05	0.15	0.15	0.15	0.1	0.1	0.1	0.05
11		0.1	0.17	0.12	0.1	0.1	0.17	0.1	0.1	0.15	0.2	0.1	0.07	0.1	0.15	0.1
12			0.1	0.07	0.1	0.2	0.19	0.1	0.13	0.1	0.2	0.15	0.07	0.15	0.18	0.1
13			0.1	0.09	0.08	0.15	0.13	0.1		0.18	0.18	0.13	0.15	0.15	0.15	0.1
14			0.09	0.09			0.11			0.1	0.13	0.15	0.09	0.2	0.15	0
15			0.1	0.1			0.07			0.1		0.2		0.1	0.08	0.08
16											0.12			0.2	0.1	0.09



Tabla C. 5 Longitud de grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

Grieta	T-01		T-02		T-03		T-04		T-05		T-06		T-07		T-08	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	18.7	19.3	15	14.3	8.9	13.6	15	14.3	13.3	22.8	12.6	13.3	13	13	9.9	22.8
2	19.9	19.7	12.3	15.6	13.6	14.2	8.7	18.7	20.8	14.5	14.1	12.2	16.6	21.2	14.8	17.8
3	19.7	22.3	20.4	20.3	13.7	19.7	17.1	20.8	19.7	20.7	22.1	24.9	15.8	16.9	19.9	20.7
4	23.9	20.4	19.8	19.8	21.2	16.6	16.6	14.4	21.3	17.2	22.8	20.3	17.2	19.2	13.4	12.8
5	20.4	20.6	21.6	18.3	13.6	14.8	19.1	17.8	20.7	18.3	19.1	21.2	20.4	21.6	23.5	23.5
6	19.7	21.6	17.9	17.1	21	21.7	10.2	18.9	20.4	20.8	17.5	15.3	10.9	19.8	21.1	23.3
7	18	18.3	18.8	18.3	19.2	20.7	15.3	21.4	20.7	18.6	17.1	17.4	19	22.2	14.7	17.8
8	17.9	20.8	18.3	8.2	19.5	16.9	13.3	16.9	14.5	20.1	15.2	18.8	16.4	18.6	19.2	7.6
9	23.2	17.8	19.8	18.2	19.8	14.9	19.8	6.8	15.9	19.8	20.1	16.6	19.9	21.3	22.6	16.5
10	20.4	22.1	17.7	19.5	18.7	19.4	8.9	21.5	17	20.6	17.3	15.4	21.3	12.5	18.2	7.9
11		18.7	19.8	17.6	16.1	17.3	17.1	19.8	15.7	22.2	18.8	18.6	17.7	9.8	17.9	18.2
12			22.6	21.4	16.6	17.5	22.1	12.8	14.7	23.4	17.3	17.4	18.4	22.6	22.4	18.6
13			17.8	14.6	13.6	13.4	16.7	13.7		21.5	17.6	17.2	17.8	20.7	22.3	24.2
14			19.4	19.3			20.2			20.9	18.7	15.2	14.5	15.6	13.4	19.2
15			15.3	14			14.5			12.9	15.2	14.7		18.1	14.7	13
16											16			14		11.9



Tabla C. 7 Distancia entre grietas en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

Grieta	T-01		T-02		T-03		T-04		T-05		T-06		T-07		T-08	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1																
2	13	9	10	13	13	21	12	22	27	10	17	13	11	12	10	12
3	21	16	13	10	15	21	7	17	9	17	9	11	13	12	18	17
4	10	18	17	21	22	14	18	17	14	12	13	13	13	15	10	14
5	12	13	12	9	19	17	14	11	16	10	14	13	13	11	10	4
6	19	13	11	12	9	6	17	12	11	16	18	15	16	13	15	18
7	15	15	4	14	9	10	10	18	25	10	10	11	11	14	7.8	22
8	14	17	22	7	16	16	16	18	16	9	9	11	10	11	7.2	12
9	15	15	15	19	11	13	12	19	9	19	17	14	13	14	7	5
10	16	12	14	13	14	12	11	12	15	11	10	15	28	8	13	11
11		15	11	15	15	14	11	12	11	13	14	13	14	12	19	14
12			10	9	18	16	13	17	16	14	12	11	9	7	13	16
13			10	11	16	16	15	10.3		13	16	16	18	9	14	19
14			19	15			13			15	13	12	12	13	22	16
15			13	16			13			23	2	17		18	13	4
16											14			12	13	6



## APÉNDICE D

En esta sección se presentan de la Figura D. 1 a la Figura D. 6 las curvas contenido de cloruros (% ppc) – profundidad (cm) para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. Los resultados se presentan considerando los anchos de grieta correspondientes, así como la condición de mojado (M) y no mojado (NM).

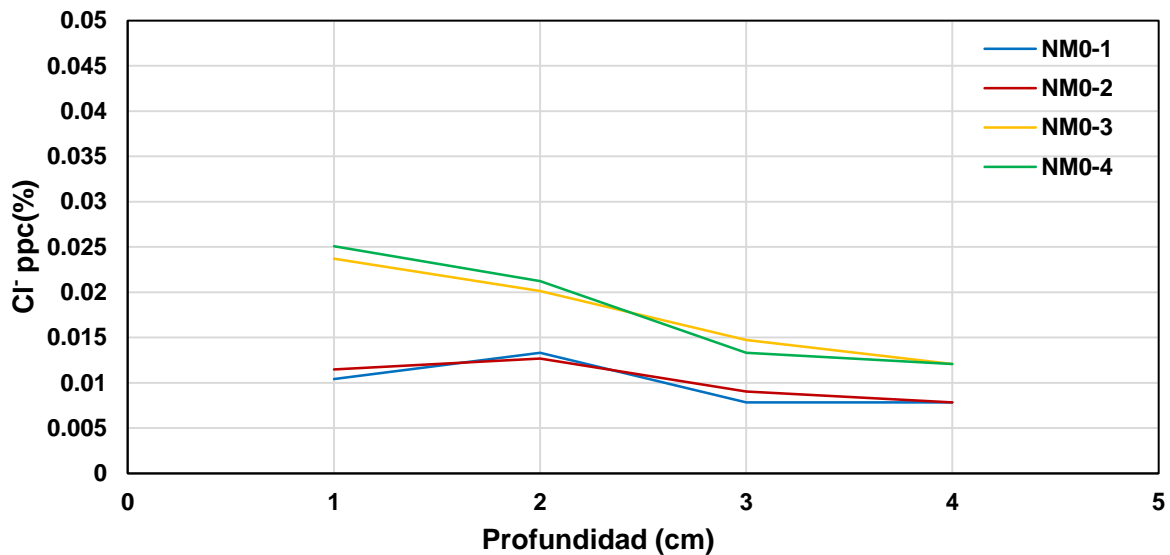


Figura D. 1 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “no mojado” (NM) y ancho de grieta de 0.00 mm

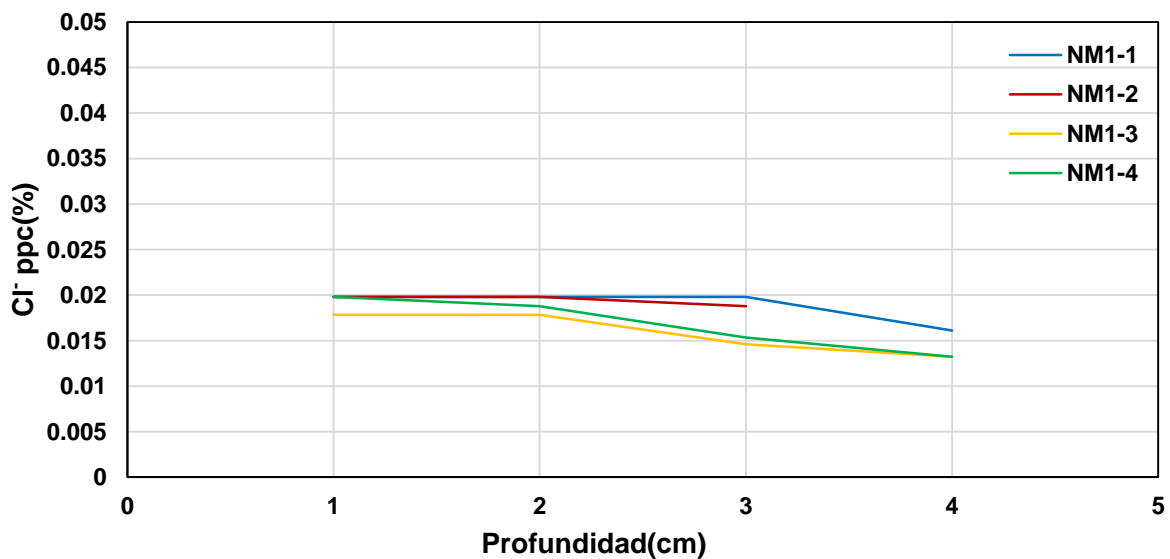


Figura D. 2 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “no mojado” (NM) y ancho de grieta de 0.10 mm



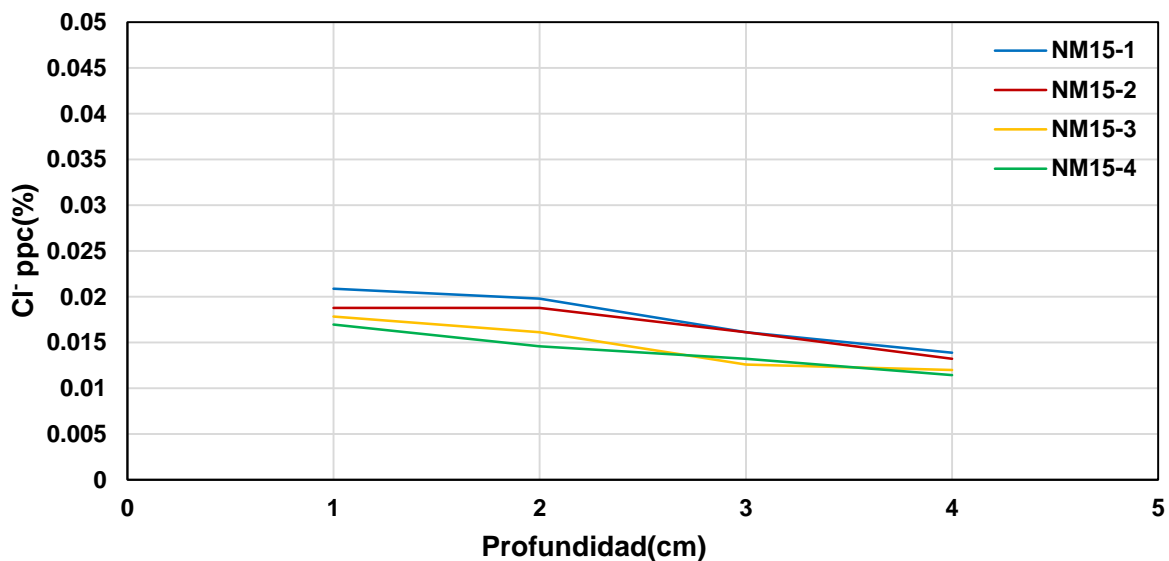


Figura D. 3 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “no mojado” (NM) y ancho de grieta de 0.15 mm

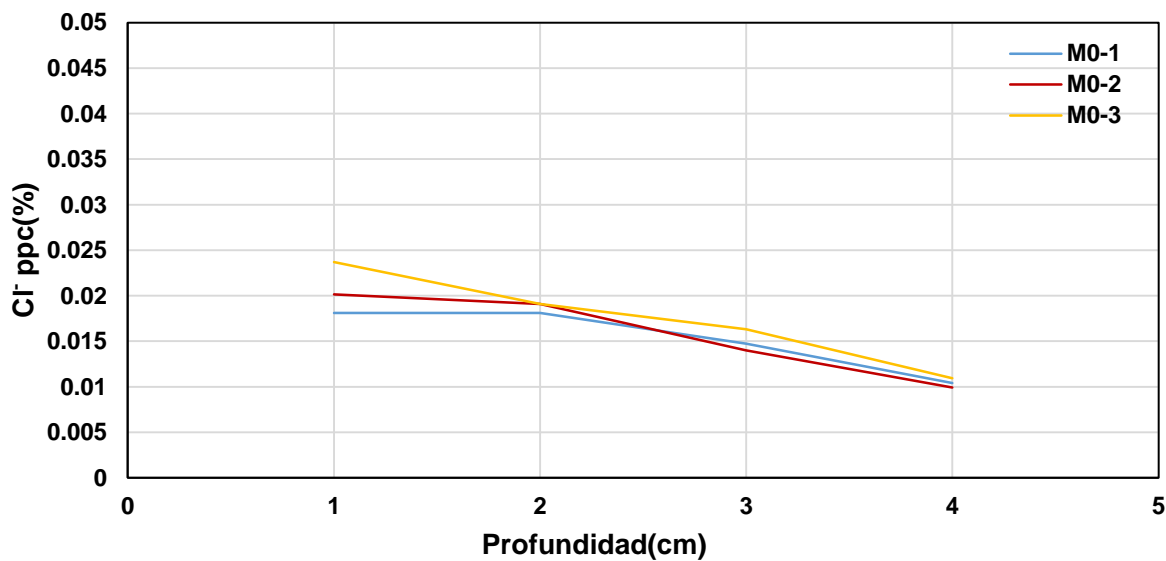


Figura D. 4 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición “mojado” (M) y ancho de grieta de 0.00 mm

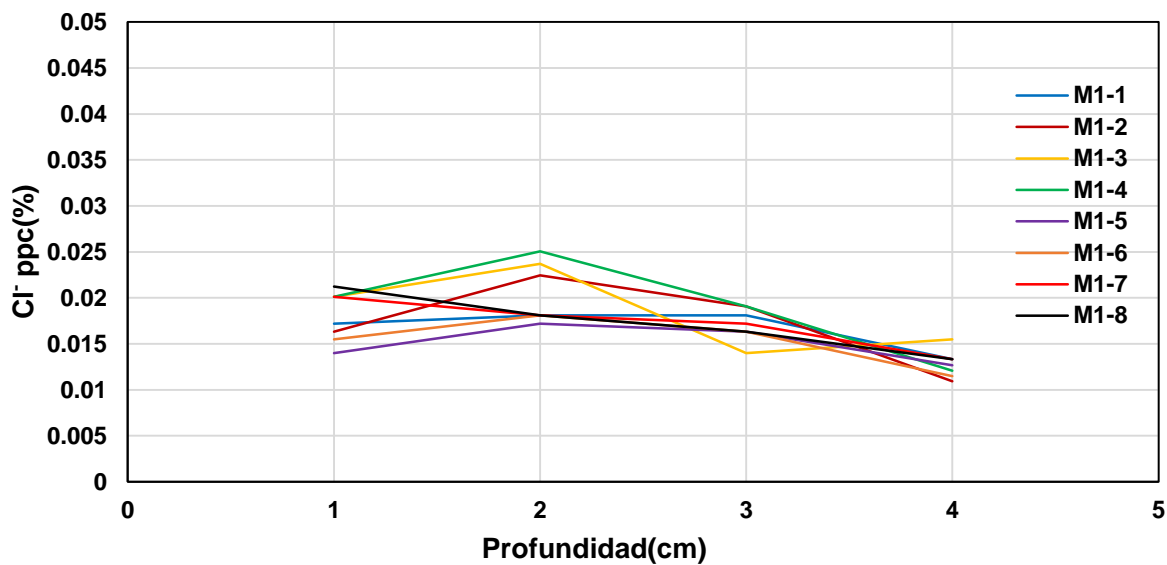


Figura D. 5 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición "mojado" (M) y ancho de grieta de 0.10 mm

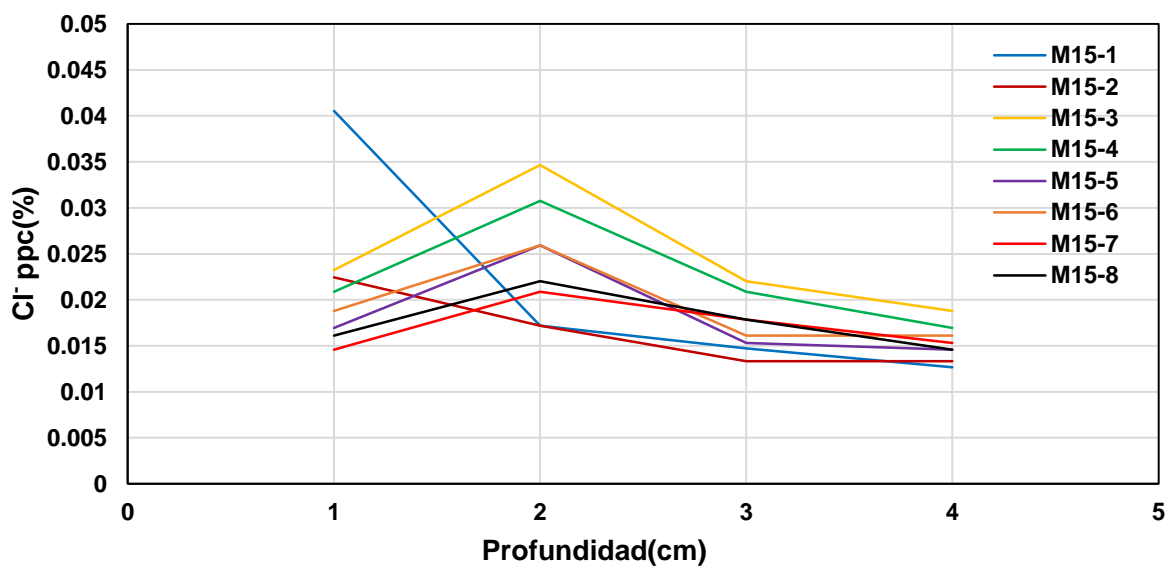


Figura D. 6 Contenido de cloruros (% ppc) - profundidad (cm) de polvos de concreto endurecido para la condición "mojado" (M) y ancho de grieta de 0.15 mm