



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EVOLUCIÓN DE LA CORROSIÓN EN TRABES DE
CONCRETO REFORZADO BAJO CICLOS DE MOJADO Y
SECADO: EFECTO DEL DIÁMETRO DEL ACERO DE
REFUERZO A TENSIÓN”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. NESTOR ENMANUEL VEGA JUAREZ

**EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
OPCIÓN ESTRUCTURAS**

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2020

Aunque este trabajo hubiera servido para el Examen de Grado y fuera aprobado por el Sínodo, sólo el autor es responsable de las Doctrinas emitidas en él.

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la evolución de la corrosión en traveses de concreto reforzado sometidas a cargas sostenidas. Las dimensiones de las traveses fueron de 15 cm x 30 cm x 350 cm (ancho x altura x longitud). La variable de estudio fue el diámetro de acero de refuerzo longitudinal a tensión. Se consideraron 4 traveses con acero de refuerzo longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y 4 con 13 mm de diámetro, respectivamente. Dos traveses con acero de refuerzo de 10 mm y dos con acero de refuerzo de 13 mm fueron sometidas a un proceso de corrosión acelerada mediante ciclos de mojado y secado. Todas las traveses fueron sometidas a cargas sostenidas que generan el 60% del esfuerzo de fluencia en el acero de refuerzo longitudinal a tensión. Se midieron parámetros electroquímicos y físicos asociados a la evolución de la corrosión. Los parámetros electroquímicos medidos fueron el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto. Los parámetros físicos medidos fueron las cantidades, anchos y longitudes de grietas. Se observó que los mayores valores de probabilidad de corrosión, velocidad de corrosión y menores valores de resistividad eléctrica se presentaron en traveses con acero de refuerzo longitudinal de 13 mm. Se observaron la aparición de nuevos agrietamientos horizontales e incrementos en anchos de grieta transversal. De dicho monitoreo se observó que el proceso de aparición de nuevos agrietamientos fue mayor en traveses con acero de refuerzo de 10 mm de diámetro. Con base en los resultados obtenidos se concluyó la evolución de la corrosión está asociado al incremento de las cantidades, anchos, longitudes de agrietamientos y secciones expuestas de acero de refuerzo, lo cual infiere que dicho proceso está directamente asociado al nivel de daño en la estructura. Para estudiar los efectos de la corrosión en traveses de concreto reforzado se debe utilizar elementos a escala natural, aplicando cargas sostenidas que simulen las condiciones de uso de la estructura, utilizando técnicas que generen características similares a la corrosión natural y considerando el efecto del nivel de daño en el cambio del comportamiento estructural.

ABSTRACT

This research evaluated the evolution of corrosion in reinforced concrete beams subjected to sustained loads. The dimensions of the beams were 15 cm x 30 cm x 350 cm (width x height x length). The study variable was the diameter of longitudinal tensile reinforcing steel. Four beams with longitudinal tension steel of 10 mm diameter and 4 with 13 mm diameter, respectively, were considered. Two beams with 10mm reinforcing steel and two with 13mm reinforcing steel were subjected to an accelerated corrosion process through wet and dry cycles. All the beams were subjected to sustained loads that generate 60% of the yield stress in the longitudinal tensile reinforcing steel. Electrochemical and physical parameters associated with the evolution of corrosion were measured. The electrochemical parameters measured were the corrosion potential, the corrosion rate and the electrical resistivity of the concrete. The physical parameters measured were the amounts, widths and lengths of cracks. It was observed that the highest values of probability of corrosion, rate of corrosion and lower values of electrical resistivity occurred in beams with 13 mm longitudinal reinforcing steel. The appearance of new horizontal cracks and increases in transverse crack widths were observed. From said monitoring it was observed that the process of appearance of new cracks was greater in beams with 10 mm diameter reinforcing steel. Based on the results obtained, the evolution of the corrosion was associated with the increase in the amounts, widths, lengths of cracks and exposed sections of reinforcing steel, which infer that said process is directly associated with the level of damage to the structure. . To study the effects of corrosion on reinforced concrete beams, natural scale elements should be used, applying sustained loads that simulate the conditions of use of the structure, using techniques that generate characteristics similar to natural corrosion and considering the effect of the level of damage in changing structural behavior.

Contenido

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo general.....	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Alcance	3
CAPÍTULO 2 MARCO TEORICO	5
2.1 Glosario de conceptos enfocados a corrosión	5
2.2 Proceso de corrosión en el concreto reforzado	8
2.1 Técnicas experimentales para medir la corrosión.	9
2.1.1 Potencial de corrosión.	9
2.1.2 Velocidad de corrosión.	11
2.1.3 Resistividad eléctrica del concreto.	12
2.1.4 Contenido de iones libres de cloruro.....	13
2.1.5 Porosidad efectiva.	14
2.2 Comportamiento a flexión de traves de CR.	15
2.1 . Normatividad para el diseño de estructuras de CR.....	16
2.2 Recopilación de información de trabajos previos.....	17
2.2.1 Características de traves de CR	18
2.2.2 Proceso constructivo	19
2.2.3 Diagramas momento-curvatura.....	20
2.2.4 Ensayo preliminar de traves	23
2.2.5 Aplicación de cargas sostenidas.	25
2.2.6 Monitoreo previo de los parámetros de corrosión	27
CAPÍTULO 3 REVISIÓN DE LITERATURA.....	37
3.1 Estudios experimentales de traves de concreto reforzado con corrosión.....	37
3.2 Efecto del agrietamiento en la corrosión	41

3.3 Técnicas de inducción de corrosión	43
3.4 Estudios realizados en la Facultad de Ingeniería UADY.....	46
3.5 Conclusiones de la revisión de la literatura.....	49
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	52
4.1 Monitoreo y control de cargas sostenidas en traves de CR.....	52
4.2 Corrosión severa	53
4.3 Inducción de corrosión acelerada.....	54
4.4 Medición de parámetros de corrosión.....	58
4.4.1 Monitoreo de parámetros electroquímicos	58
4.4.2 Control de parámetros físicos.....	59
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	61
5.1 Monitoreo y control de cargas sostenidas en traves de CR.....	61
5.2 Parámetros electroquímicos de corrosión de traves de CR.....	62
5.3 Evolución de agrietamientos en traves de CR con corrosión.....	65
CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
6.1 Monitoreo y control de cargas sostenidas en traves de CR.....	71
6.2 Parametros electroquímicos en traves de CR.	71
6.3 Evolución de agrietamientos en traves de CR con corrosión.....	80
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	92
REFERENCIAS.....	94
APENDICE A.....	97
Índice de Figuras	
<i>Figura 2.1 Diagrama momento-curvatura.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.2. Efecto del cambio de la cantidada de AR en la resistencia y ductilidad de una trabe de CR.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.3 Sección longitudinal de las traves con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm</i>	<i>18</i>

<i>Figura 2.4 Sección transversal de las traves con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm.</i>	19
<i>Figura 2.5 Aislamiento de AR longitudinal del transversal</i>	20
<i>Figura 2.6 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 10 mm de diámetro</i>	21
<i>Figura 2.7 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 13 mm de diámetro</i>	21
<i>Figura 2.8 Sistema de carga en cuatro puntos</i>	22
<i>Figura 2.9 Diagrama de fuerzas cortantes</i>	22
<i>Figura 2.10 Diagrama de momentos flexionantes</i>	23
<i>Figura 2.11 Curva carga - desplazamiento para traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro</i>	24
<i>Figura 2.12 Curva carga - desplazamiento para traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro</i>	25
<i>Figura 2.13 Sistema de cargas sostenidas</i>	25
<i>Figura 2.14 Detalle de aplicación y monitoreo de la carga sostenida</i>	26
<i>Figura 2.15 Velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro</i>	28
<i>Figura 2.16 Potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro</i>	29
<i>Figura 2.17 Resistividad eléctrica del concreto en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro</i>	29
<i>Figura 2.18 Velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro</i>	30
<i>Figura 2.19 Potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro</i>	30
<i>Figura 2.20 Resistividad eléctrica del concreto en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro</i>	31
<i>Figura 2.21 Acumulados de velocidad de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro</i>	32
<i>Figura 2.22 Esquema de grietas de traves T1 a T4 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro</i>	33
<i>Figura 2.23 Esquema de grietas de traves T5 a T8 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro</i>	34
<i>Figura 2.24 Esquema de grietas de traves T9 a T12 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro</i>	35
<i>Figura 2.25 Esquema de grietas de traves T13 a T16 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro</i>	36

<i>Figura 4.1 Esquema de colocación de celdas de carga.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.2 Efecto en el cambio de la cantidad de AR en trabes con AR de 10mm.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.3 Efecto en el cambio de la cantidad de AR en trabes con AR de 13mm.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.4.- Camara de corrosión.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.5 Distribución de franelas humedecidas.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.6 Cilindro presurizado con aspersor.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.7 a) Detalle en planta de aplicación de solución con cloruros, b) Detalle transversal de aplicación de solución con cloruros</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.8 Equipo Gecor6.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.9 Medición del ancho de grietas en trabes de CR con microscopio</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.1 Porcentaje de pérdidas de carga para AR de 10 y 13 mm.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.2 Potencial de corrosión - Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 10 mm de diámetro.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.3 Potencial de corrosión - Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 13 mm de diámetro.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.4 Velocidad de corrosión - Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 10 mm de diámetro.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.5 Velocidad de corrosión - Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 13 mm de diámetro.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.6 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 10 mm de diámetro.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.7 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al centro del claro para trabes con AR de 13 mm de diámetro.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.8 Evolución de agrietamientos en trabes de CR con AR de 10 mm de diámetro a)Cara frontal , b) Cara posterior.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.9 Evolución de agrietamientos en trabes de CR con AR de 13 mm de diámetro a)Cara frontal , b) Cara posterior.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 6.1 Promedios de potenciales de corrosión en centros de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.2 Promedios de potenciales de corrosión en extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.3 Promedios de velocidades de corrosión en centros de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.4 Promedios de velocidades de corrosión en extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....</i>	<i>76</i>

<i>Figura 6.5 Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.6 Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de traves de CR bajo corrosión acelerada con AR de 10 y 13 mm de diámetro.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 6.7 Acumulados de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 6.8 Acumulados de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traves de CR bajo corrosión acelerada con AR de 10 y 13 mm de diámetro.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.9 Evolución de agrietamientos en traves de CR con AR de 10 mm de diámetro a)Cara frontal , b) Cara posterior.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.10 Evolución de agrietamientos en traves de CR con AR de 13 mm de diámetro a)Cara frontal , b) Cara posterior.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 6.11 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 6.12 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.13 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.14 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.15 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.16 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.17 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.18 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 6.19 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 6.20 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 6.21 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.</i>	<i>91</i>

Figura 6.22 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. 91

Figura A. 1 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 10 mm de diámetro. 97

Figura A. 2 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 13 mm de diámetro. 97

Figura A. 3 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 10 mm de diámetro. 98

Figura A. 4 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 13 mm de diámetro. 98

Figura A. 5 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 10 mm de diámetro. 99

Figura A. 6 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 13 mm de diámetro. 99

Figura A. 7 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 10 mm de diámetro. 100

Figura A. 8 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 13 mm de diámetro. 100

Figura A. 9 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 10 mm de diámetro. 102

Figura A. 10 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 13 mm de diámetro. 102

Figura A. 11 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 10 mm de diámetro. 103

Figura A. 12 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 13 mm de diámetro. 103

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El primer intento de usar refuerzo a tensión en concreto o mampostería fue por Marc Brunel en 1832, durante la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres, en este se construyó un arco experimental de ladrillo y cemento, debido a la época se usaron tiras de anillos de hierro y madera como refuerzo. En 1860, el francés Joseph Monier construyó diversas esculturas de concreto reforzado (CR) usando mallas de alambre de hierro, atribuyéndosele la invención del concreto reforzado (Garibaldi 2018). Fue con ello que a partir de aquella época este sistema se implementó en la construcción de estructuras alrededor del mundo. Actualmente este sistema es el más utilizado en el mundo con una producción mundial de 11,000 millones de metros cúbicos por año (Ceballos, 2016).

Uno de los factores que determina el fenómeno de corrosión en las estructuras es el tipo de ambiente al cual están sometidas. Si estas se encuentran en zonas marinas o cercanas a las costas se tendrán intrusiones de NaCl provenientes del mar; por otro lado, si estas se ubican en zonas industriales o en concentraciones de poblaciones se tendrá otro tipo de contaminantes como SO₂ o CO₂ entre los más importantes (Chávez 2010). La causa más común en el deterioro del 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. Debido a esto se generan esfuerzos de tensión dentro del concreto que lo rodea, causando agrietamiento (siendo este el principal medio para el transporte de agentes agresivos) y eventualmente desprendimiento del recubrimiento del concreto (Yingshu 2007). Es por esto que la mayoría de las estructuras de CR que se encuentran sometidas al proceso de corrosión son mantenidas bajo constantes ciclos de reparaciones y mantenimientos; lo que afecta directamente a los usuarios. Se ha estimado que los costos debidos a los efectos de la corrosión ascienden a US \$2.5 trillones, equivalentes al 3.4% del

P.I.B. mundial (NACE 2016). Por lo que es de suma importancia conocer los efectos de la corrosión en estructuras de CR para aminorar estos impactos.

De una revisión de la literatura se encontró que se han realizado numerosos estudios que evalúan el comportamiento de elementos de CR con corrosión. Las variables más estudiadas han sido: el nivel de corrosión (Gu 2010; Yu 2016; Hailong 2018), el diámetro de las barras de AR (Gu 2010; Yu 2016; Ahmad 2017; Ponce 2018), la aplicación de cargas sostenidas (Ballim & Roid 2003; Visairo 2016; Hailong 2018); el efecto del ancho de grieta en la corrosión (Arya 1996; Yuan 2007; Jiménez 2010; Faiz 2018) y la técnica de inducción de corrosión (González 1995; Yuan 2007; Yingshu 2007; Gu 2010; Yu 2016; Hailong 2018).

En la mayoría de estas investigaciones, las dimensiones, la cantidad y distribución del AR de las trabes estudiadas son diferentes a las utilizadas en la práctica común (González 1995; Arya 1996; Ballim & Roid 2003; Yuan 2007; Jiménez 2010; Ahmad 2017; Suvash 2018). Existen pocas investigaciones en donde se someten a los especímenes a cargas sostenidas. Para dichos casos se observó una propagación de la corrosión en zonas con mayor cantidad de grietas asociadas a la aplicación de las cargas (Yingshu 2007; Hailong 2018; Ponce 2018; Suvash 2018). Se ha estudiado el efecto del agrietamiento en la corrosión del AR en trabes de CR. En estas investigaciones se ha observado que la corrosión genera esfuerzos radiales en el AR por la transformación del acero en óxido, lo que propaga la aparición de grietas horizontales que facilitan el acceso de agentes agresivos (Yuan 2007; Hailong 2018). Las técnicas de corrosión más utilizadas fueron mediante corrosión natural, corrosión por corriente impresa y corrosión por ciclos de mojado y secado. La técnica que mejor representa a la corrosión natural es mediante de ciclos de mojado y secado.

Dichos trabajos de investigación se pueden clasificar en tres grupos; los que estudian la corrosión mediante el monitoreo de parámetros electroquímicos, los que analizan la evolución de la corrosión mediante el control de parámetros físicos y por último los

estudios asociados al cambio en el comportamiento estructural de traves de CR debido a los efectos de la corrosión (parámetros estructurales). En la mayoría de estos trabajos el nivel de corrosión fue designado mediante el uso de parámetros electroquímicos. Para dichos casos se observan pérdidas de resistencias a flexión del 5%, lo cual no representa un cambio significativo en el comportamiento estructural.

Por lo que se requieren mayores estudios del efecto de la corrosión en traves de CR a escala natural, bajo cargas sostenidas que simulen las condiciones de servicio de la estructura, utilizando técnicas que generen características similares a la corrosión natural y garantizando un nivel de daño que represente un cambio significativo en el comportamiento estructural. Lo anterior permitirá complementar el conocimiento sobre el comportamiento de traves de CR a flexión afectadas por la corrosión.

1.2 Objetivo general

Evaluar la evolución de la corrosión en traves de concreto reforzado sujetas a cargas sostenidas.

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.

1.4 Alcance

En este trabajo de investigación se evaluará el comportamiento de traves de CR afectadas por corrosión severa. Se considerarán ocho traves de CR a escala natural sujetas a cargas sostenidas (cuatro con corrosión y cuatro sin corrosión). La variable de estudio será diámetro de las barras de AR longitudinal a tensión. Se medirán diferentes parámetros electroquímicos asociados a la corrosión tales como: 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. Se determinará el efecto de la aparición de nuevos agrietamientos en la evolución del proceso de corrosión.

CAPÍTULO 2 MARCO TEORICO

En este capítulo se presenta el marco teórico aplicado en esta investigación. Este se enfocó en presentar un glosario con conceptos enfocados a corrosión, en el proceso de corrosión en el concreto reforzado, los parámetros utilizados para determinar la corrosión, en el comportamiento a flexión de travesaños de CR, de los requisitos establecidos por la normatividad para el diseño de estructuras de CR y la recopilación de información de trabajos previos realizados en la Facultad de Ingeniería UADY.

2.1 Glosario de conceptos enfocados a corrosión

Acero: Aleaciones hierro-carbono, con un contenido máximo de carbono del 2%, aproximadamente. El carbono dota al hierro de destacadas propiedades mecánicas, necesarias para sus aplicaciones industriales.

Activo: Término que se refiere a un estado de los materiales metálicos en el que éstos tienden a corroerse, o a metales o aleaciones que se sitúan en el extremo de potenciales más negativos de las series electroquímicas o galvánicas y son muy corrosivos.

Adherencia: Fuerza de unión entre un recubrimiento cualquiera y el sustrato, metálico o no.

Agente agresivo: Componente del medio ambiente al que es atribuible la acción corrosiva sobre el material metálico.

Capa pasivante: Películas invisibles, de unas decenas de angstroms, de óxidos, oxígeno absorbido o, muchas veces, de naturaleza desconocida, que al formarse reducen la velocidad de corrosión varios órdenes de magnitud, al impedir el contacto directo del material metálico con el medio agresivo.

Corrosión: La transformación de un metal del estado elemental al combinado (estado iónico) por reacción con el medio ambiente.

Corrosión por picaduras: Ataque muy localizado que produce una penetración apreciable en el metal en forma de cavidades de pequeña sección, a veces inapreciable a simple vista. Este tipo de corrosión suele deberse a heterogeneidades del medio.

Corrosión uniforme o generalizada: Ataque que, aproximadamente, afecta por igual a toda superficie metálica. A pesar de que su cuantía pueda resultar importante, es el tipo de corrosión más fácilmente controlable.

Durabilidad: Término que, referido a una pieza o estructura metálica, indica la vida en servicio remanente de la misma.

Concreto: Material de construcción resultante del fraguado de mezclas de cemento, agregados inertes de tamaño controlado (denominados áridos, generalmente grava) y agua.

Concreto reforzado: Concreto en el que se introducen barras de acero durante su fabricación, para dotarle de una mayor resistencia a la tensión y obtener un material mixto en el que se combinan muy favorablemente las características de sus componentes.

Humedad relativa: La relación, expresada como porcentaje, entre la cantidad de vapor de agua presente en la atmosfera a una temperatura dada y la cantidad requerida para la saturación a la temperatura indicada.

Mortero: Mezclas de un conglomerante, arena y agua, que se emplean en construcción por su capacidad de fraguar.

Mortero de cemento: Mortero en que se emplea cemento como conglomerante. Se diferencia del concreto en el tamaño de los áridos o agregados inertes, muchas más finas en el mortero al tratarse de arena. Frecuentemente se utiliza sólo el término mortero para designar a los morteros de cemento.

Pasivación: Transición del estado activo al pasivo, de muchos metales u aleaciones en ciertos medios.

Pasivo: Estado que implica una reactividad muy pequeña, es decir, velocidades insignificantes de corrosión, en condiciones con fuerte tendencia termodinámica a la corrosión del electrodo.

pH: Medida de la acidez o alcalinidad de una solución. En sentido estricto, es el logaritmo inverso de la actividad de iones hidrógeno en la solución. El valor 7 de pH corresponde a una solución neutra; los valores inferiores a medios ácidos y los superiores a medios alcalinos.

Polarización: Es la diferencia matemática entre el potencial del electrodo para unas condiciones dadas de densidad de corriente y el potencial de corrosión o potencial de circuito abierto.

Porosidad: Canales, muchas veces microscópicos, en un recubrimiento, metálico o no, que se extienden hasta el sustrato. Porcentaje de huecos, formados por canales visibles o invisibles, en un medio sólido discontinuo, como el concreto.

Potencial: Diferencia de potencial de un electrodo definida con relación a otro electrodo en específico, conocido por electrodo de referencia.

Potencial de corrosión: Es el potencial de un electrodo que se corroe en un medio dado, sin flujo de corriente externa.

Potenciostato: Dispositivo o instrumento electrónico que mantiene a un electrodo a potencial constante y es capaz de variarlo también, según una secuencia de tiempo, dentro de un margen amplísimo de velocidades de barrido. Actualmente, los potenciostatos comerciales incluyen también la posibilidad de funcionar como galvanostatos. El potenciostato quizá sea el instrumento más usado actualmente en los estudios de corrosión.

Repasivación: Fenómeno consistente en la recuperación del estado pasivo en toda la superficie de un metal que lo había perdido localmente, corroyéndose por picaduras. La repasivación se produce al imponer potenciales iguales o inferiores (más negativos) que el denominado potencial de corrosión, repasivación o de pasivación perfecta, que de todas estas formas se conoce.

Resistividad: Es la resistencia eléctrica específica de un determinado material.

Velocidad de corrosión: Cantidad de metal o aleación deteriorada (oxidada) por unidad de tiempo. Puede expresarse en función de la penetración (mm/año, m/año, etc.); de la variación de peso por unidad de superficie ($\text{g/m}^2\text{d}$, es decir gramos por metro cuadrado y día), etc.

2.2 Proceso de corrosión en el concreto reforzado

La corrosión es un proceso de destrucción de los metales y sus aleaciones, provocado por la acción química o electroquímica (Chávez 2010). Este proceso degenerativo tiene su concepción desde la fabricación del concreto, el cual se conforma de dos componentes; el primero es el esqueleto conocido como agregados que tienen la propiedad de hasta cierto punto ser impermeables y no conductores; y el segundo es la pasta de cemento, que funge como aglutinante. A este último componente se le toma la mayor importancia electroquímica, ya que a través de este ocurre el proceso de transporte de masa y carga, esto se debe a la presencia de millones de poros

capilares conectados entre sí. La cantidad de poros existentes en la pasta está directamente relacionado con la cantidad de agua que se utiliza para elaborar la mezcla, en la práctica se usan relaciones a/c mayores con el fin de tener productos más trabajables, esto provoca que la reacción entre los agregados y el aglutinante no sea la suficiente para consumir la cantidad de agua existente en la mismas, esto genera residuos de agua que al momento de evaporarse crean poros. Al combinarse la presencia de poros con la humedad, se genera el electrolito necesario para el transporte de sustancias agresivas como son los iones de CO_2 o NaCl entre los más importantes. La combinación del proceso anterior con repetitivos ciclos de mojado y secado (intrusión de oxígeno) prolifera la corrosión en el AR.

2.1 Técnicas experimentales para medir la corrosión.

Las técnicas experimentales más utilizadas para estudiar la corrosión en estructuras de CR son las pruebas electroquímicas. En dichas pruebas se obtiene información asociada al comportamiento electroquímico del AR, por lo que la conjunción de las diferentes mediciones de los parámetros electroquímicos ayuda a predecir la evolución de la corrosión a través del tiempo. Mediante las pruebas electroquímicas se pueden obtener parámetros asociados a la corrosión del AR como son: la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión, la resistividad eléctrica del concreto y el contenido de iones de cloruro libres en el concreto. Los parámetros anteriores están directamente asociados a la porosidad efectiva del concreto, por lo que esta se estudia para conocer la calidad del concreto en términos de durabilidad.

2.1.1 Potencial de corrosión.

El potencial de corrosión (E_{corr}) o de media celda es un parámetro que permite evaluar el grado de corrosión de las estructuras de CR, ya que esta cualitativamente asociada con la tasa de corrosión del acero. Esta medición se basa en que cualquier material metálico sumergido en un medio corrosivo tiene un potencial característico en ausencia de polarizaciones externas, a este potencial se le conoce como potencial de reposo en circuito abierto o potencial de corrosión (E_{corr}). El valor del E_{corr} se calcula

como la diferencia de potencial entre el material a estudiar (barra de acero embebida en mortero) y otro material usado como referencia (Cobre/Sulfato de cobre). Así mismo el E_{corr} se puede medir por comparación con una celda normalizada de referencia, la cual contiene un valor conocido constante (ASTM C 876, 2014). Para obtener un mejor índice de confiabilidad de la presencia de corrosión en las estructuras el E_{corr} requiere ser complementado con otra medición conocida como velocidad de corrosión (NMX-C-501-ONNCCE-2015). Con base a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015 los criterios para evaluar el E_{corr} se presentan en la Tabla 2-1:

Tabla 2-1 Criterio de evaluación del potencial de corrosión.

Potenciales de corrosión (E_{corr}) Cu/CuSO₄ (mV)	Probabilidad de corrosión
< - 500	Corrosión severa
< - 350	90% de probabilidad de corrosión
- 350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de probabilidad de corrosión

Dichos criterios establecen los límites de electronegatividad para determinar la probabilidad de desarrollar corrosión en el AR. Ya que dichos valores tienen un carácter probabilístico estos se deben monitorear de manera periódica para validar los resultados. Con base a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2015, en la Tabla 2-2 se proporciona la relación entre el E_{corr} , los diversos factores y la corrosión del AR:

Tabla 2-2 Relación entre E_{corr} , factores diversos y la condición de corrosión del acero de refuerzo.

Condición	Potenciales de corrosión (E_{corr}) Cu/CuSO₄ (mV)	Observaciones	Riesgo de daño
Estado Pasivo	+ 0,200 a - 0,200	Ausencia de Cl- pH > 12.5 H ₂ O (HR↑)	Despreciable

Corrosión Localizada	- 0,200 a -0,600	Cl, O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Alto
Corrosión Uniforme	+ 0,200 a - 0,150	Carbonatado O ₂ , Seco, (HR↑)	Bajo
	- 0,150 a - 0,600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O, (HR↑)	Moderado Alto
	- 0,400 a - 0,600	Cl- elevado, H ₂ O, ó carbonatado H ₂ O, (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	< - 0,600	↑Cl; ↑ H ₂ O (Sin O ₂)	Despreciable

2.1.2 Velocidad de corrosión.

La velocidad de corrosión (i_{corr}) es la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo, aunque la forma más usual para reportarla es a través de medidas de tipo electroquímico ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Este parámetro es determinado con una técnica electroquímica utilizando un potenciostato/galvanostato (Gecor6). Para ello los equipos electrónicos realizan un barrido de potencial en un rango muy cercano al potencial de corrosión (± 25 -30 mV). Con ello se obtiene una densidad de corriente conocida como corriente de corrosión, correspondiente a una medida de la velocidad del proceso de corrosión. Con base a la norma NMX-C-501-ONNCCE-2014 se presenta la Tabla 2-3 con los criterios para evaluar los valores de i_{corr} :

Tabla 2-3 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
-----	------	---------------------------------------

2.1.3 Resistividad eléctrica del concreto.

La resistividad eléctrica (ρ) es una propiedad característica de los materiales, dicha indica la facilidad o dificultad del tránsito de corriente eléctrica a través de la configuración del material. Es por ello que el monitoreo de este parámetro es muy sensible a la porosidad del material, al grado de saturación de los poros y a la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Los criterios para poder evaluar la ρ con base a la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016 son presentados en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4 Criterio de evaluación de la resistividad eléctrica real en especímenes de concreto.

Resistividad del concreto (k Ω -cm)	Pronóstico de corrosión
> 100 a 200	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.
50 a 100	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.
10 a 50	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.
10<	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.
--	--

2.1.4 Contenido de iones libres de cloruro.

Existen tres maneras en las cuales los iones de cloruro se presentan en la masa del concreto: enlazados, absorbidos y disueltos en el agua de los poros (libres). Cuando estos se encuentran en estado libre pueden dañar al AR y a su vez los iones de cloruro absorbidos pueden afectar cuando se integran a los iones libres. Cuando existe la presencia de iones de cloruro en la elaboración de la mezcla, una parte de esta reacciona con los compuestos hidratados del concreto y forman sales, mientras la otra parte es absorbida en las paredes de los poros y la parte restante se disuelve en el agua existente en 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 2-5.

Tabla 2-5 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

Así mismo 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 se presentan en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Umbrales de cloruros obtenidos en cilindros de concreto diseñados con agregados pétreos calcáreos típicos de la región y expuestos al ambiente marino en Progreso, 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
¹ Corrosión instantánea, valor puntual obtenido asociado al momento de la despasivación del acero de refuerzo.						
² Corrosión promedio, la media aritmética de los I_{corr} .						
³ Corrosión acumulada, cambio de pendiente de la línea de tendencia entre I_{corr} acumulado con respecto al tiempo.						

2.1.5 Porosidad efectiva.

La porosidad efectiva del concreto depende directamente de los materiales usados para su elaboración, la dosificación utilizada para la fabricación de la mezcla, tales como la relación agua-cemento, la compactación del concreto y el uso de aditivos. La presencia y el tamaño de los poros son fundamentales para determinar la facilidad de acceso de los cloruros al AR. Los criterios para poder evaluar la (ξ_e) son presentados con base en el manual de la Red DURAR (2000) en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7 Criterios de evaluación de porosidad efectiva.

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

2.2 Comportamiento a flexión de traves de CR.

Las traves son elementos estructurales capaces de soportar los momentos internos y fuerzas cortantes provocados por las acciones impuestas y su peso propio. Su resistencia a flexión depende de la cantidad de AR suministrado, la ubicación del AR, de la forma de la sección transversal y del tipo de concreto utilizado. Para determinar la resistencia a flexión de traves de concreto reforzado se utiliza la teoría de flexión, la cual se basa en tres hipótesis fundamentales:

- **Hipótesis cinemática:** Secciones planas antes de la deformación del elemento permanecen planas después de la deformación. No existe deslizamiento relativo entre el concreto y el acero de refuerzo.
- **Hipótesis constitutiva:** Se conocen los modelos constitutivos del concreto y del AR (curvas esfuerzo (σ) -deformación unitaria (ϵ)).
- **Hipótesis de equilibrio:** En la sección analizada existe equilibrio entre las fuerzas resultantes a tensión y a compresión.

Con estas tres hipótesis se puede construir un modelo capaz de describir el comportamiento a flexión de las traves de concreto reforzado, conocido como diagrama Momento-curvatura (Figura 2.1). En el cual se puede obtener información de algún punto de interés como: el momento asociado al agrietamiento de la sección (Punto C), el momento asociado a la fluencia del AR (Punto Y), entre otros.

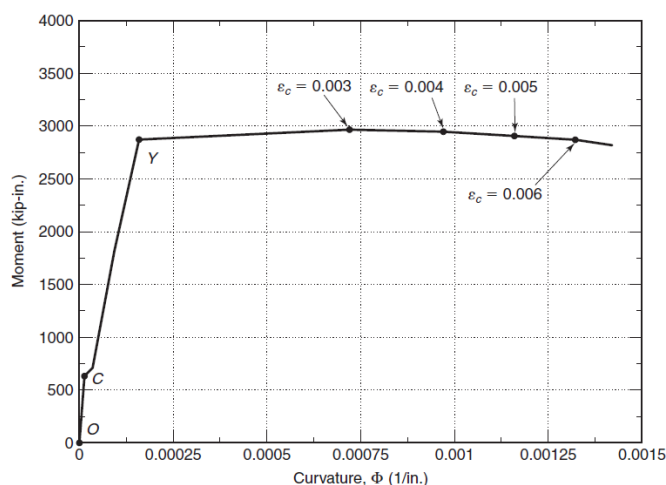


Figura 2.1 Diagrama momento-curvatura.

Cada punto en este diagrama se determina asignando un valor de deformación unitaria (criterio de falla) en un punto de interés de la sección y asumiendo la posición del eje neutro (EN). Mediante la hipótesis cinemática se tiene que la distribución de deformaciones unitarias a lo largo de la sección será lineal. Por lo cual una vez conocidas la distribución de deformaciones se aplica la hipótesis constitutiva para determinar el nivel de esfuerzo en cada fibra de la sección. Para cada fibra se integra el volumen de esfuerzos para determinar las fuerzas resultantes y su punto de aplicación. Por último se aplica la hipótesis de equilibrio para comprobar que las fuerzas resultantes a compresión equilibren a las de tensión, si se cumple esta condición se procederá a calcular el momento resistente de la sección, en caso contrario se modificará la posición del EN hasta cumplir el equilibrio de fuerzas. En la Figura 2.2 se presenta el efecto de incrementar la cantidad de AR para una misma sección transversal. En dicha figura se puede observar que a medida que incrementa la cantidad de AR la resistencia de la sección aumenta y su capacidad de deformarse (ductilidad) disminuye.

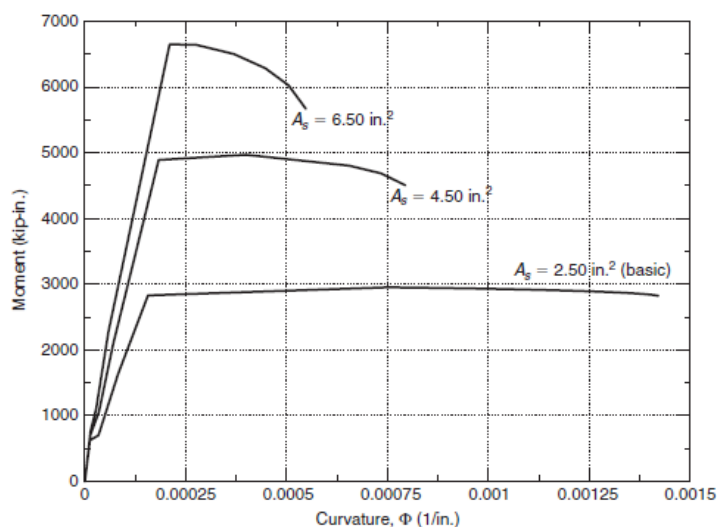


Figura 2.2. Efecto del cambio de la cantidad de AR en la resistencia y ductilidad de una trabe de CR.

2.1 . Normatividad para el diseño de estructuras de CR.

En la normatividad se establece los requisitos mínimos para el diseño de estructuras de concreto. El criterio de estados límites de falla establecido en las normas menciona

que todas las estructuras deben dimensionarse de modo que la resistencia de diseño de toda sección debe ser igual o mayor a cada fuerza o momento interno actuante. La resistencia de diseño debe incluir el correspondiente factor de resistencia (F_R). Las fuerzas y momentos internos de diseño se obtienen multiplicando a las acciones por su correspondiente factor de carga (F_C). El factor de seguridad (F_S) se obtiene dividiendo los correspondientes F_C entre el F_R . En la Tabla 2-8 se presentan los F_R , F_C y F_S correspondientes a las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto (NTCC), el Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) y el Eurocode 2.

Tabla 2-8 Factores utilizados por diferentes normativas para el diseño de traveses de CR.

Normatividad	FR	FC		FS	
		CM	CV	CM	CV
NTCC	0.9	1.5	1.7	1.67	1.89
ACI 318-02	0.9	1.4	1.7	1.56	1.89
Eurocode 2	0.98	1.35	1.5	1.38	1.53
*FR utilizados para el diseño a flexión de traveses.					
*CM-Acciones permanentes					
*CV-Acciones variables					

2.2 Recopilación de información de trabajos previos.

Este trabajo forma parte del proyecto “comportamiento de traveses de concreto reforzado con corrosión”. La primera etapa de dicho proyecto fue desarrollada por León Chablé (2017), y Ponce Galera (2018). Se cuentan con 16 traveses de concreto reforzado. Los datos sobre las características de las traveses estudiadas en este trabajo, así como la

medición inicial de parámetros de corrosión corresponden a los reportados por León, Arceo y Ponce.

2.2.1 Características de traves de CR

Visairo, León y Ponce 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 a compresión axial del concreto fue de 276 kg/cm². El módulo de elasticidad del concreto fue de 184521 kg/cm². La resistencia a la fluencia promedio del AR longitudinal fue de 4532 kg/cm² (Visairo 2016). La resistencia nominal a la fluencia del AR transversal fue de 2320 kg/cm². A los 479 días respecto a la construcción de las traves el promedio de contenido de iones de cloruros libres en el concreto fue de 0.019% y 0.016% para AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm, respectivamente. La porosidad efectiva promedio del concreto fue de 12.25%. Las cantidades de acero y la distribución del AR longitudinal y transversal de las traves se presentan en las Figura 2.3 y Figura 2.4.

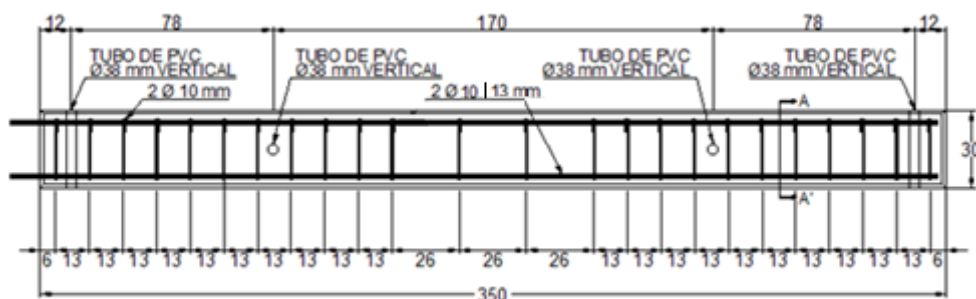


Figura 2.3 Sección longitudinal de las traves con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm

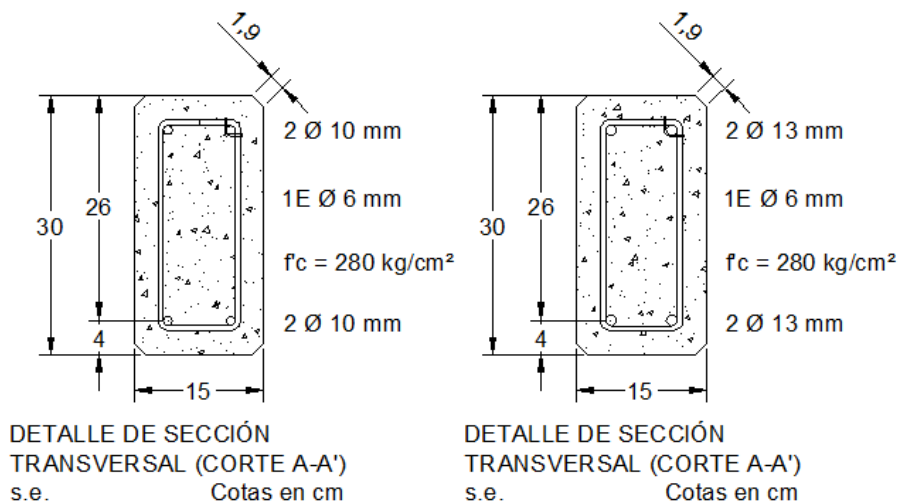


Figura 2.4 Sección transversal de las traves con barras de AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm

2.2.2 Proceso constructivo

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 acero de refuerzo transversal al longitudinal. Se colocó cinta aislante en cada zona de contacto entre el refuerzo longitudinal, el acero de refuerzo transversal y los sujetadores de plástico (Figura 2.5). Dichas precauciones fueron necesarias para aislar electroquímicamente el AR longitudinal a compresión y el AR transversal. (León 2017)



Figura 2.5 Aislamiento de AR longitudinal del transversal

2.2.3 Diagramas momento-curvatura

En las Figura 2.6 y Figura 2.7 se presentan los diagramas momento-curvatura para las traves con AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm, donde el momento de fluencia fue de 156,037 kg-cm y 270,297 kg-cm, respectivamente. La ductilidad de curvatura de las traves con AR longitudinal a tensión de 10mm y 13mm de diámetro fue de 10.91 y 6.33, respectivamente. (León 2017)

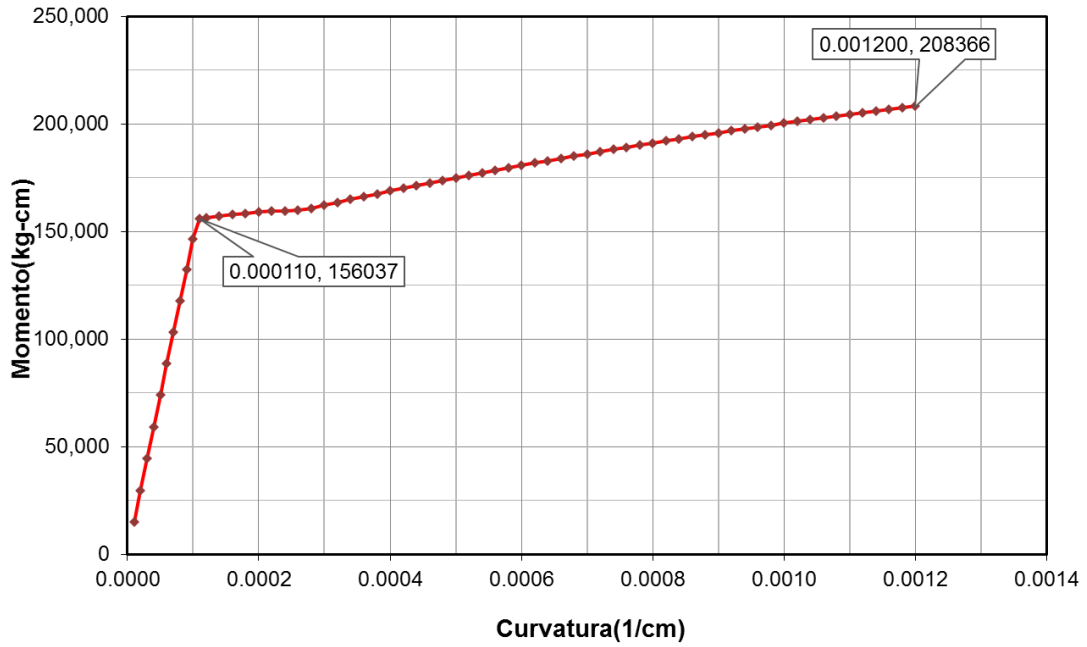


Figura 2.6 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 10 mm de diámetro

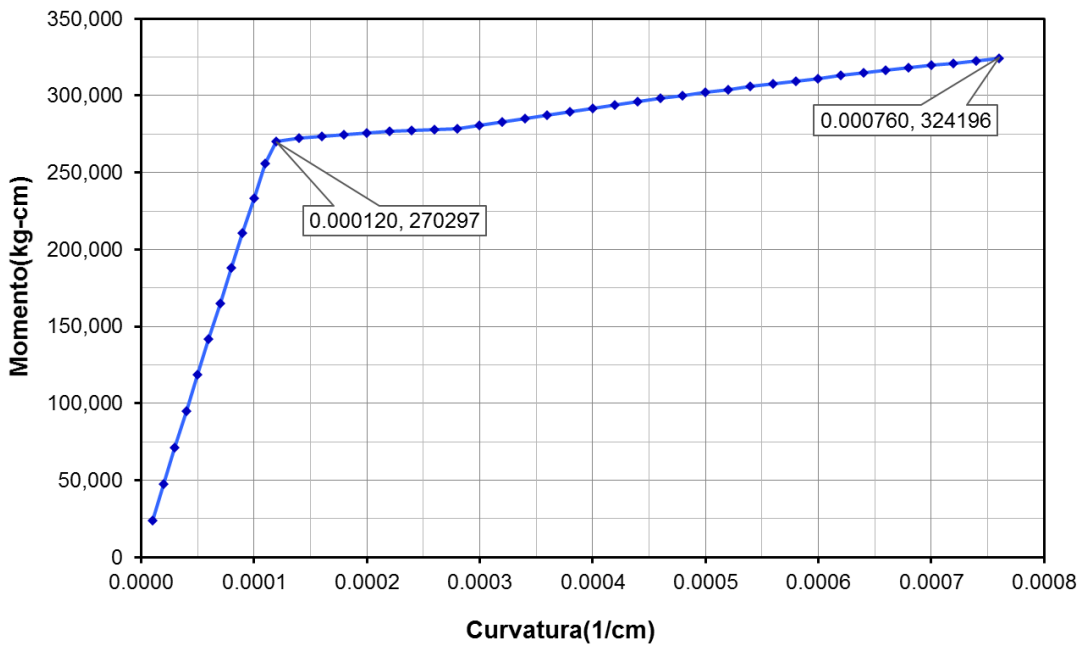


Figura 2.7 Diagrama momento-curvatura de trabe de CR con AR de 13 mm de diámetro

Para estudiar el comportamiento a flexión de las trabes se planteó un sistema de cargas en cuatro puntos (Figura 2.8). Se consideraron cargas puntuales ($P/2$) equidistantes a los apoyos. También se consideró que las cargas concentradas sean de la misma magnitud. Con dicho sistema de carga se garantiza una zona de cortante nulo y flexión pura (Figura 2.9 y Figura 2.10).

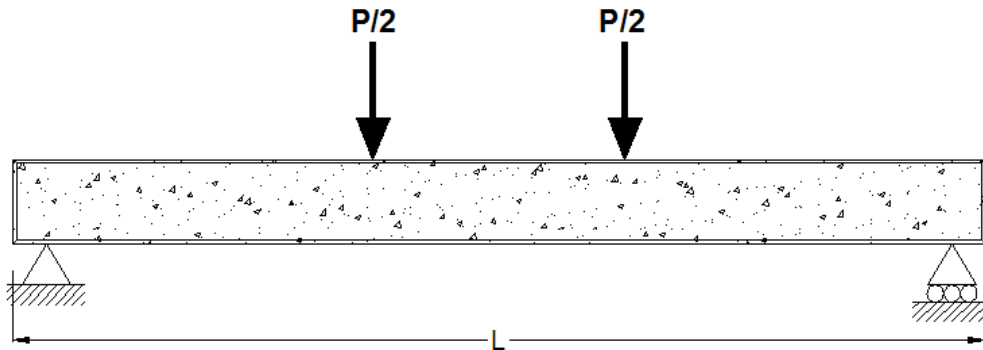


Figura 2.8 Sistema de carga en cuatro puntos

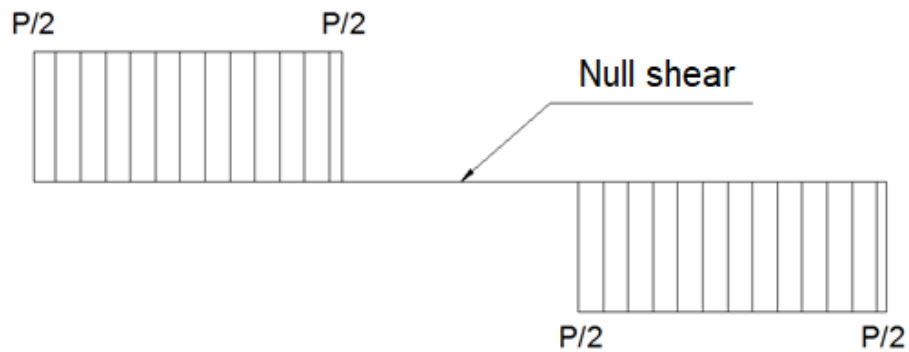


Figura 2.9 Diagrama de fuerzas cortantes

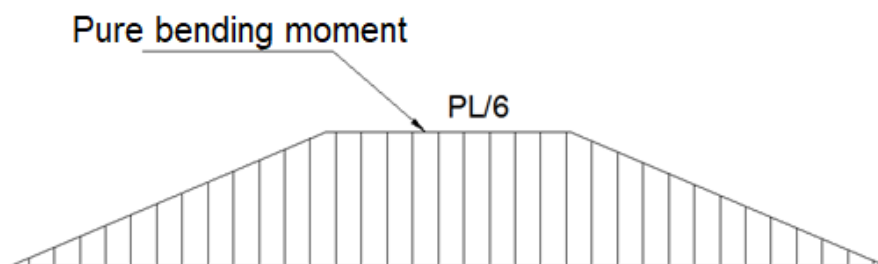


Figura 2.10 Diagrama de momentos flexionantes

2.2.4 Ensaye preliminar de traveses

Previo a la aplicación de la carga sostenida, las traveses se ensayaron utilizando un sistema de cargas en cuatro puntos. Dicho ensaye se realizó 150 días después de la construcción. Para el ensaye 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 obtuvieron las curvas carga – desplazamiento (Figura 2.11 y Figura 2.12). Para la medición se utilizaron celdas de carga, potenciómetros lineales y un sistema de adquisición de datos.

Finalmente, se descargaron las traveses y se registraron los desplazamientos residuales.
(León 2017)

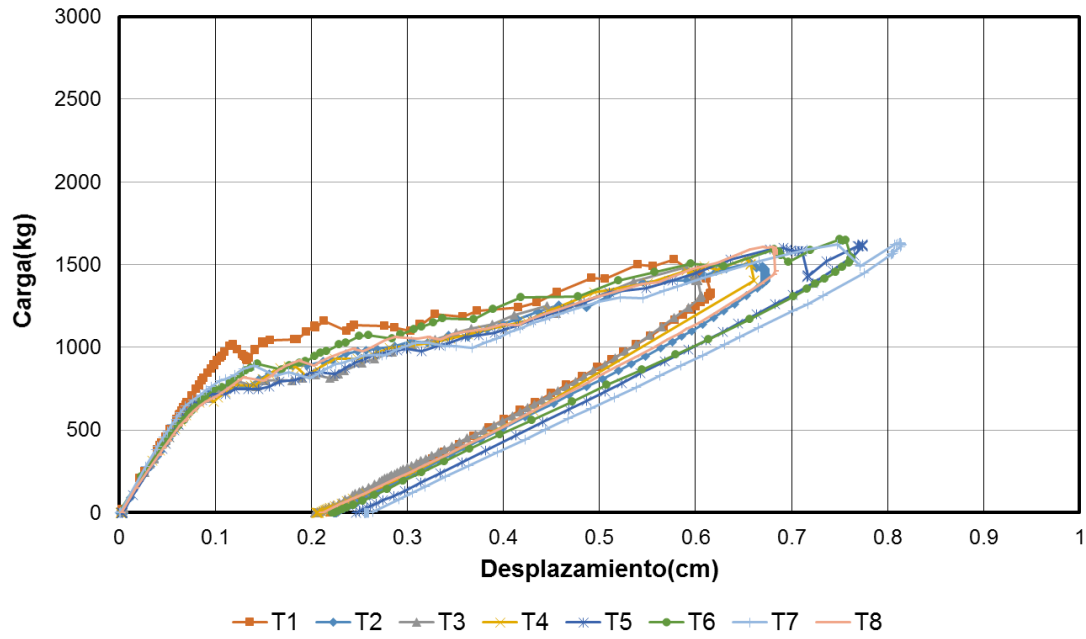


Figura 2.11 Curva carga - desplazamiento para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro

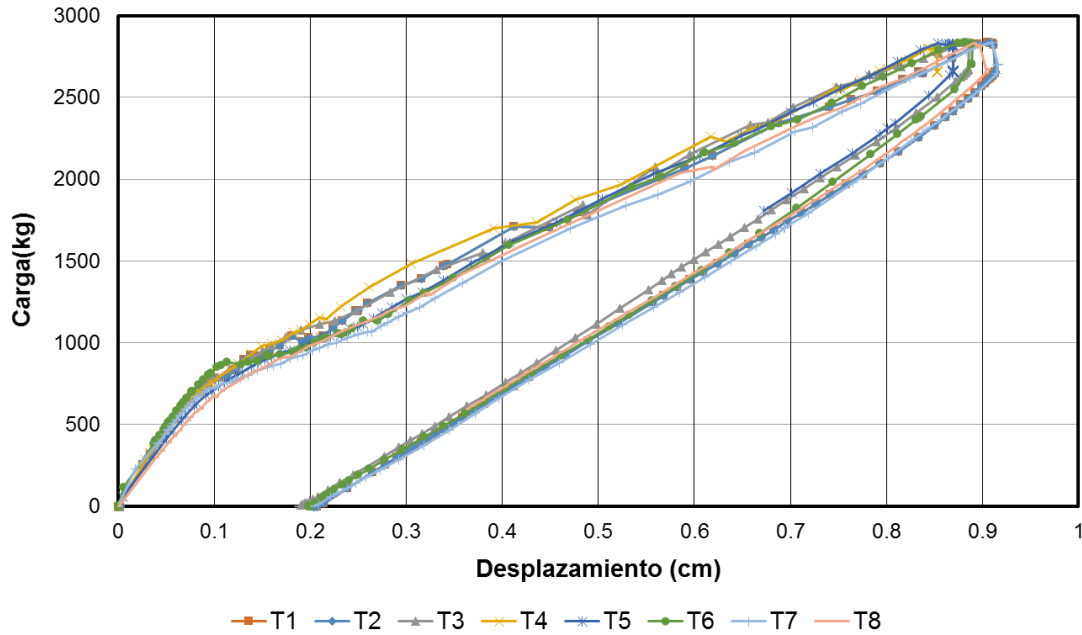


Figura 2.12 Curva carga - desplazamiento para traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro.

2.2.5 Aplicación de cargas sostenidas.

Para la aplicación de cargas sostenidas se utilizó un sistema de cuatro puntos, mediante el uso de barras roscadas postensadas (Figura 2.13). Inicialmente, se aplicaron cargas mediante actuadores hidráulicos a dichas barras roscadas.

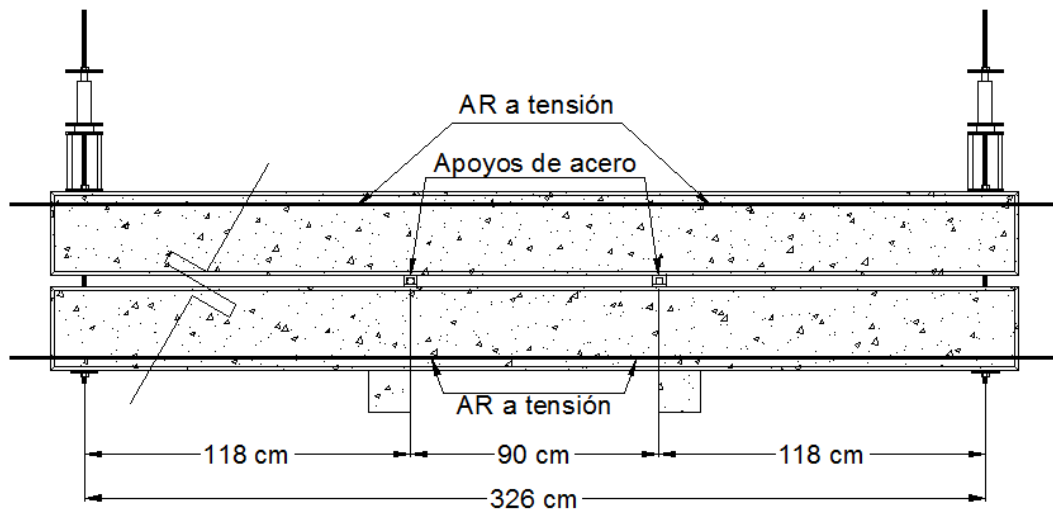
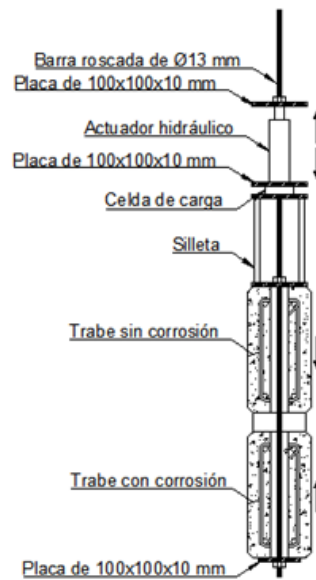
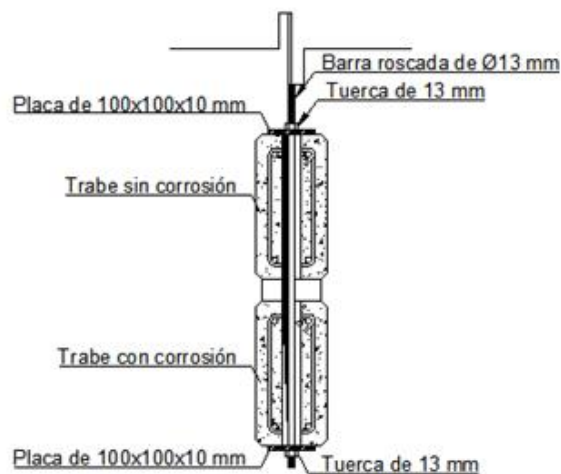


Figura 2.13 Sistema de cargas sostenidas

En el sistema de cargas sostenidas las traveses fueron colocadas en pares, una sobre otra. 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. El detalle de la aplicación y monitoreo de la carga sostenida se presentan en la Figura 2.14.



a) Aplicación de carga axial a la barra



b) Monitoreo de la carga sostenida

Figura 2.14 Detalle de aplicación y monitoreo de la carga sostenida.

Para verificar la conservación de la carga en el sistema, se realizaron controles de carga a las trabes. En las Tabla 2-9 y Tabla 2-10 se presentan las pérdidas de cargas en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm, respectivamente. Con base en la información presentada se definió que los controles de carga se deben realizar cada dos meses para evitar una pérdida de carga mayor al 13% (Ponce 2018).

Tabla 2-9 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
Promedio		20.16%		11.41%
CV		32.06%		38.32%

Tabla 2-10 Pérdidas de carga en trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro

Trabes	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
Promedio		14.29%		11.40%
CV		43.30%		35.13%

2.2.6 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 1054 (05-sept-2016 a 13-mar-2019) 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 2.15 a la Figura 2.20 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. Se observó que aparentemente todas las traveses de CR, presentaban un comportamiento electroquímico similar, en el cual los parámetros electroquímicos disminuían. Lo cual estaba directamente asociado a que todas las traveses se ubicaban en mismo tipo de ambiente.

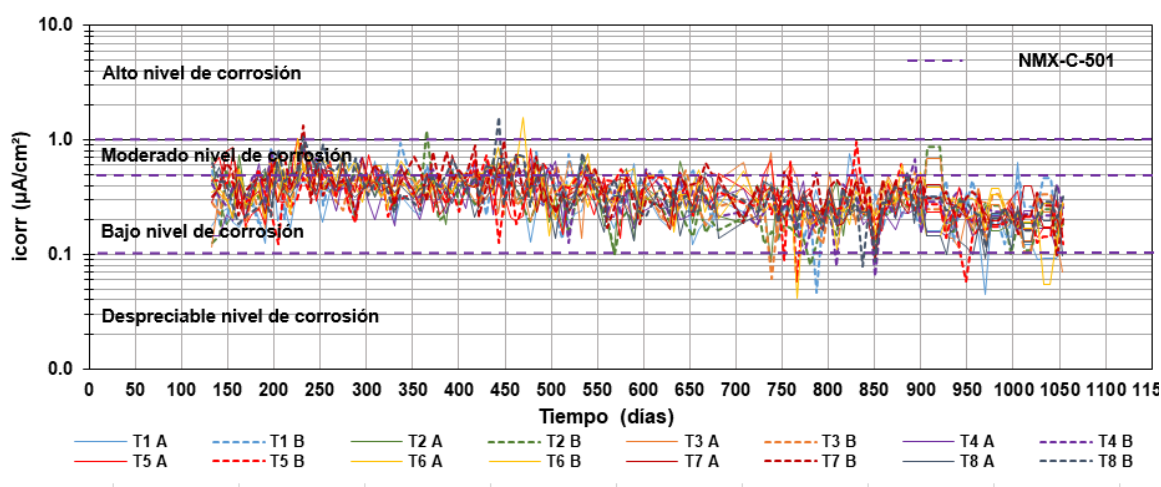


Figura 2.15 Velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro.

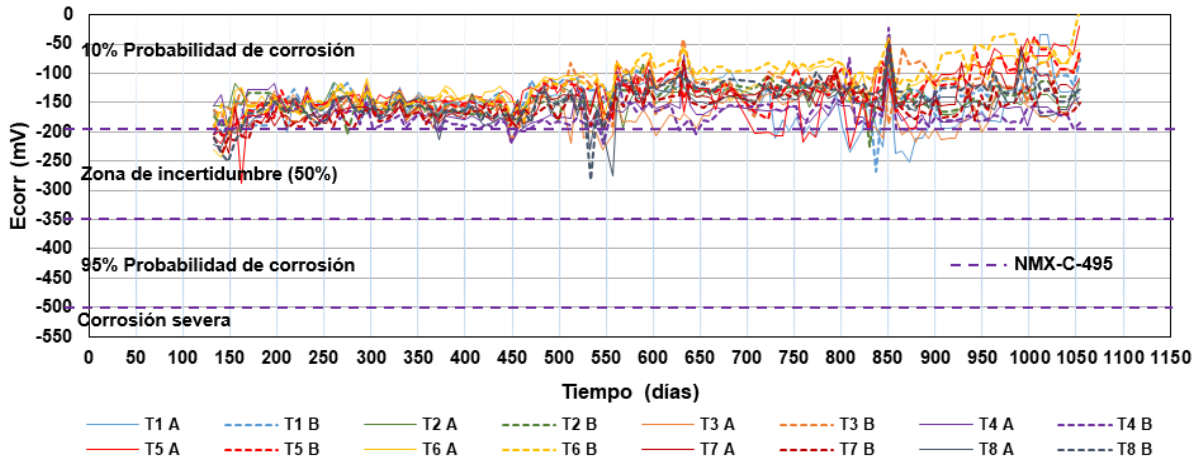


Figura 2.16 Potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro.

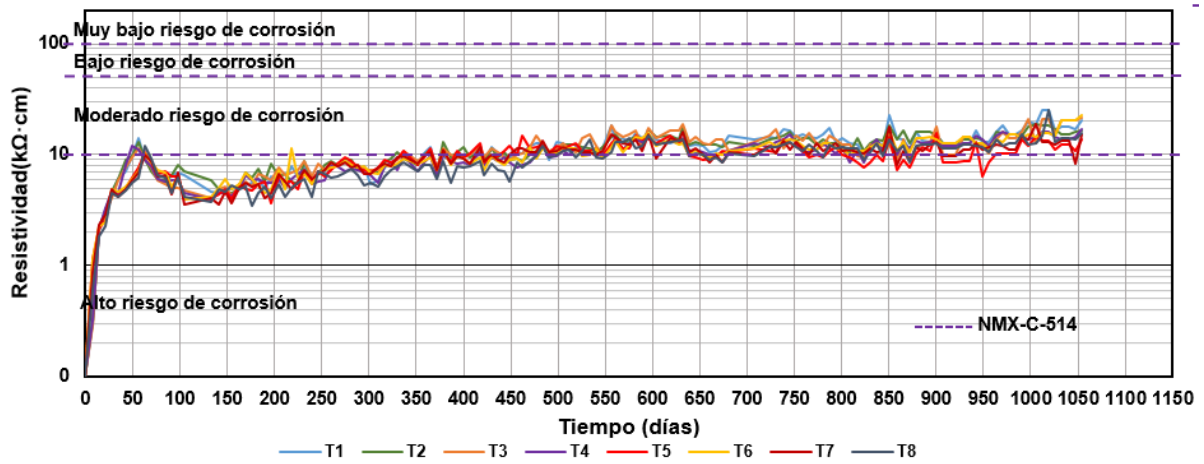


Figura 2.17 Resistividad eléctrica del concreto en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro.

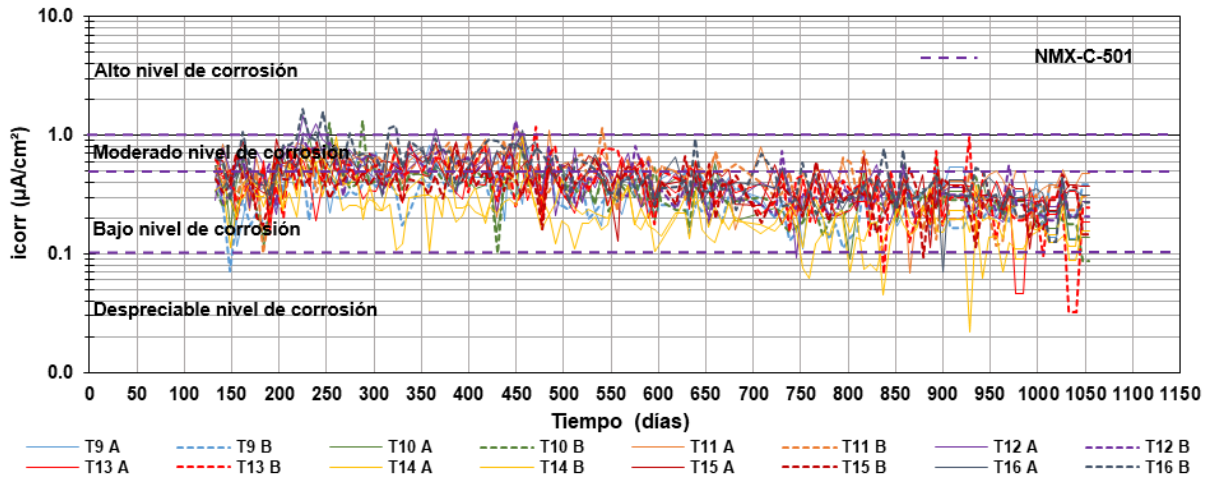


Figura 2.18 Velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro.

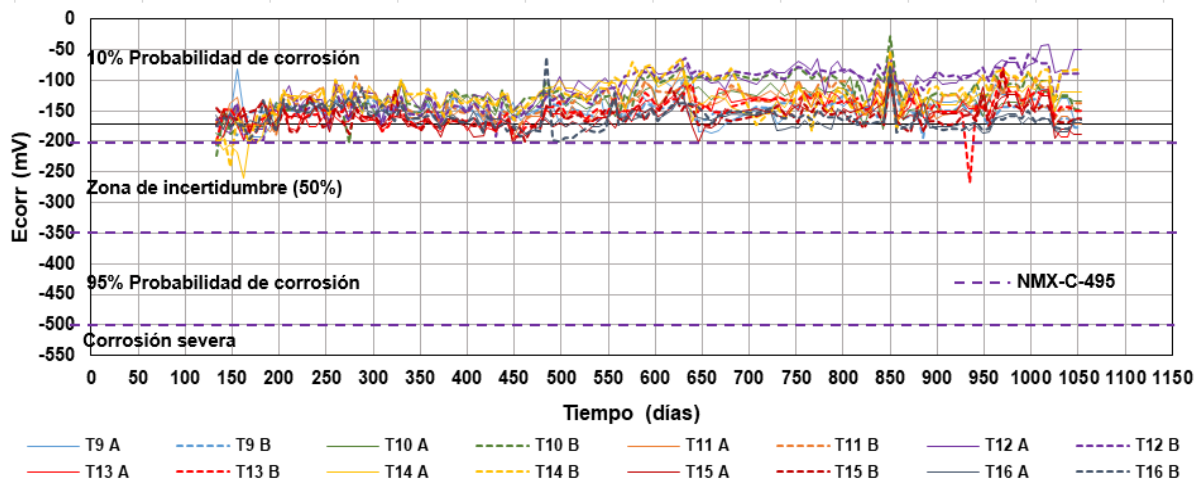


Figura 2.19 Potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro.

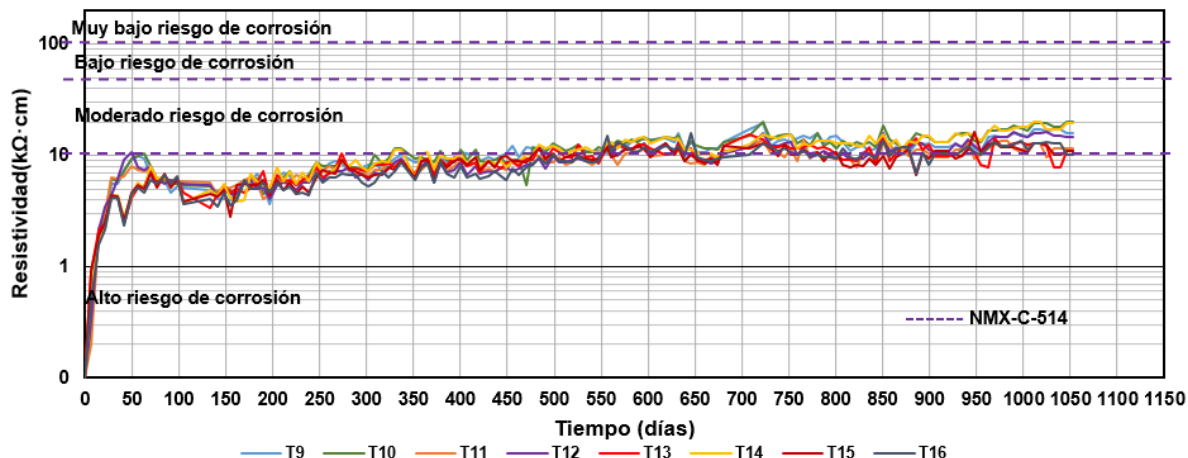


Figura 2.20 Resistividad eléctrica del concreto en travesas de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro.

Para tener un mejor entendimiento del efecto del diámetro del AR longitudinal a tensión en la evolución de la corrosión se procedió a realizar la acumulación de las velocidades de corrosión (Figura 2.21). En dichas gráficas se pudo observar claramente que los mayores acumulados de velocidad de corrosión se presentaron en travesas con AR de 13 mm de diámetro. Lo cual pudo estar asociado a que después de la aplicación de la carga sostenida, dichas travesas presentaron un mayor volumen de agrietamiento y con ello la interacción con el medio ambiente es superior. Adicionalmente se pudo observar que a partir de la aplicación de la carga sostenida ocurriría un cambio de pendiente en la acumulación, lo cual infería que debería existir un efecto en la aparición de nuevos agrietamientos asociados a la aplicación de la carga sostenida en la evolución del proceso de corrosión. Por lo que si se procediera a someter a las travesas a un nuevo tipo de ambiente, esto provocaría un cambio en el proceso de corrosión asociado al agrietamiento en las travesas. (Ponce (2018)).

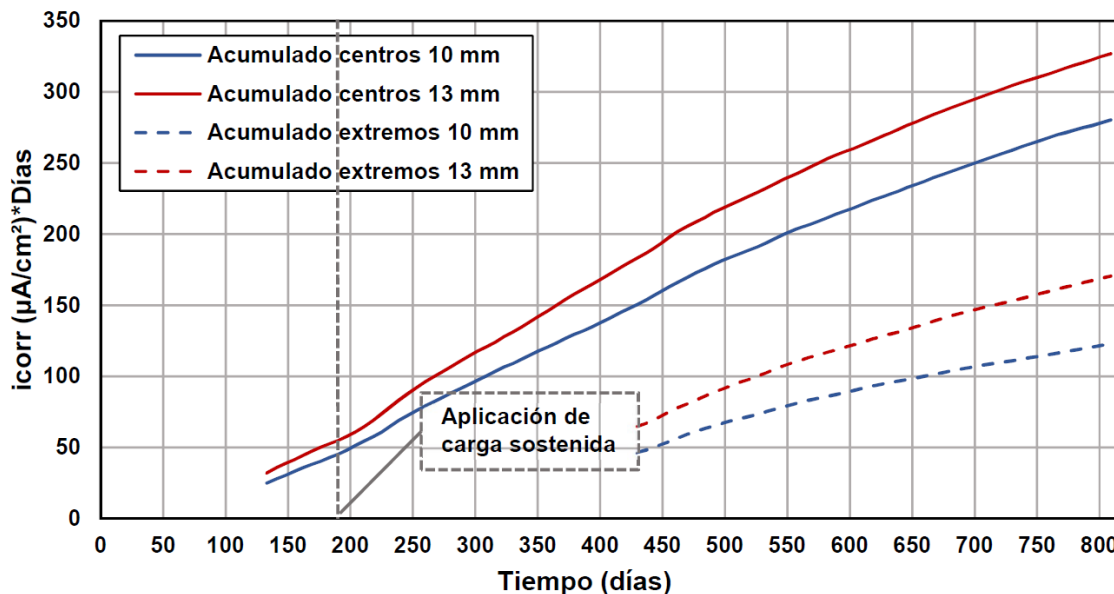


Figura 2.21 Acumulados de velocidad de corrosión en centros y extremos de trabes de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

Con el fin de continuar estudiando el efecto del agrietamiento en la evolución de la corrosión, se procedió a tomar registro del agrietamiento, para tener un punto de referencia (León 2017). De la Figura 2.22 a la Figura 2.25 se presentan los patrones de agrietamiento y anchos de grieta para trabes de CR con AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm de diámetro. Estos registros corresponden a los 150 días con respecto a la construcción de las trabes. Se presentan los patrones de agrietamiento de las dos caras (A y B) de las trabes de CR. En dichas figuras se puede observar que las trabes con AR de 13 mm de diámetro presentaron la mayor cantidad y anchos de grieta, lo cual justificaría la diferencia entre las mediciones de velocidad de corrosión entre ambos tipos de AR.

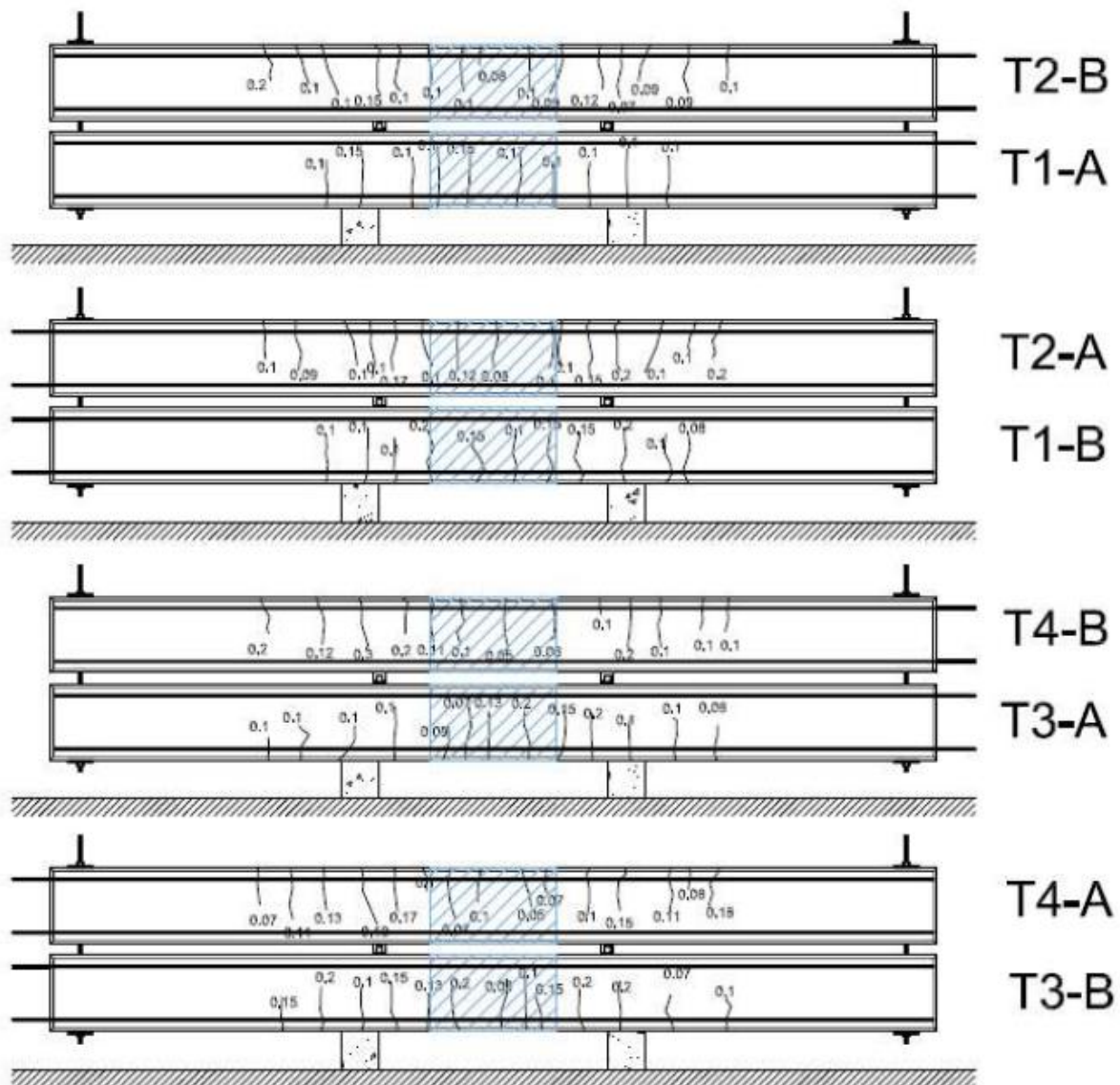


Figura 2.22 Esquema de grietas de traves T1 a T4 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro.

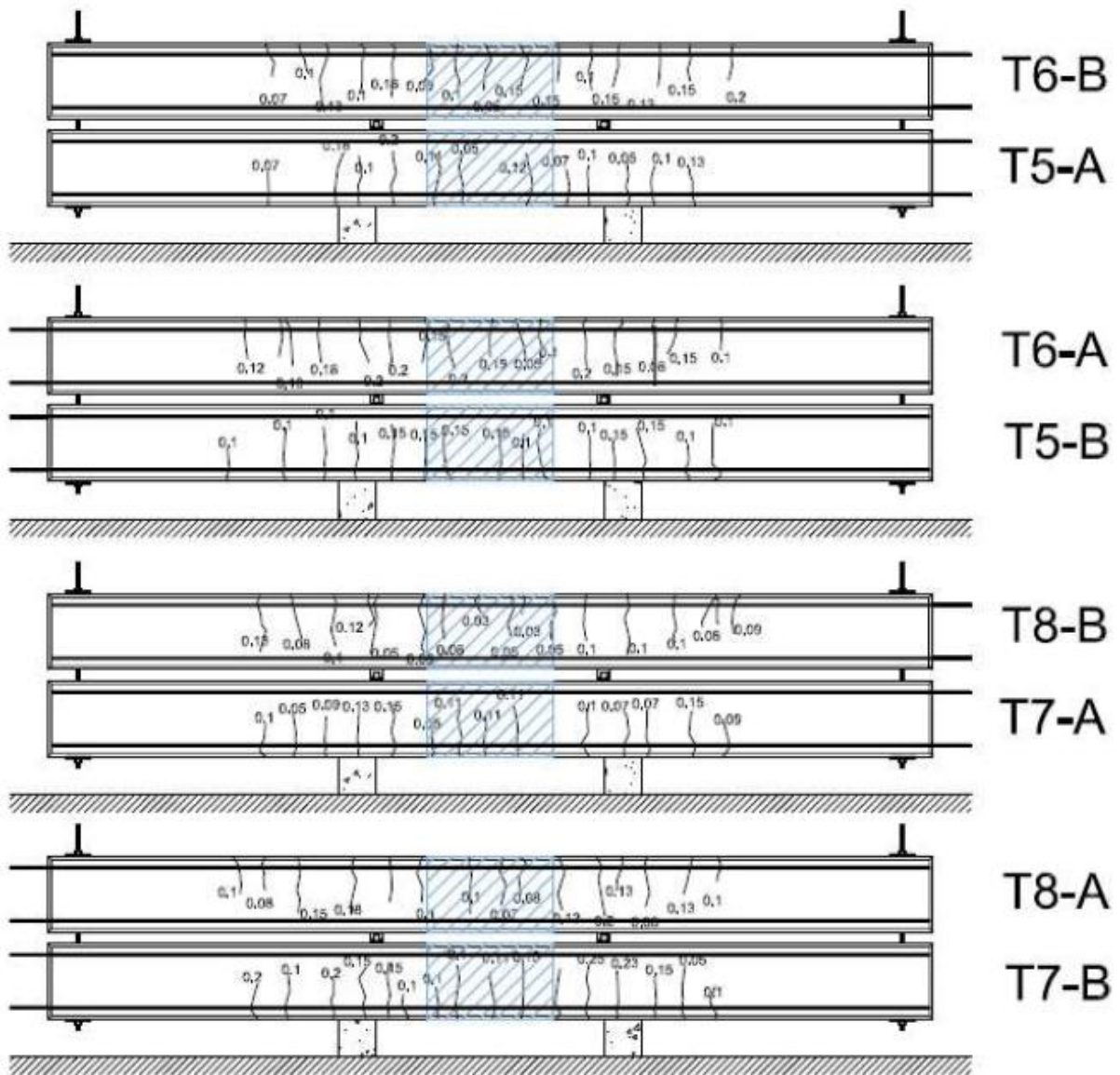


Figura 2.23 Esquema de grietas de traves T5 a T8 de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro.

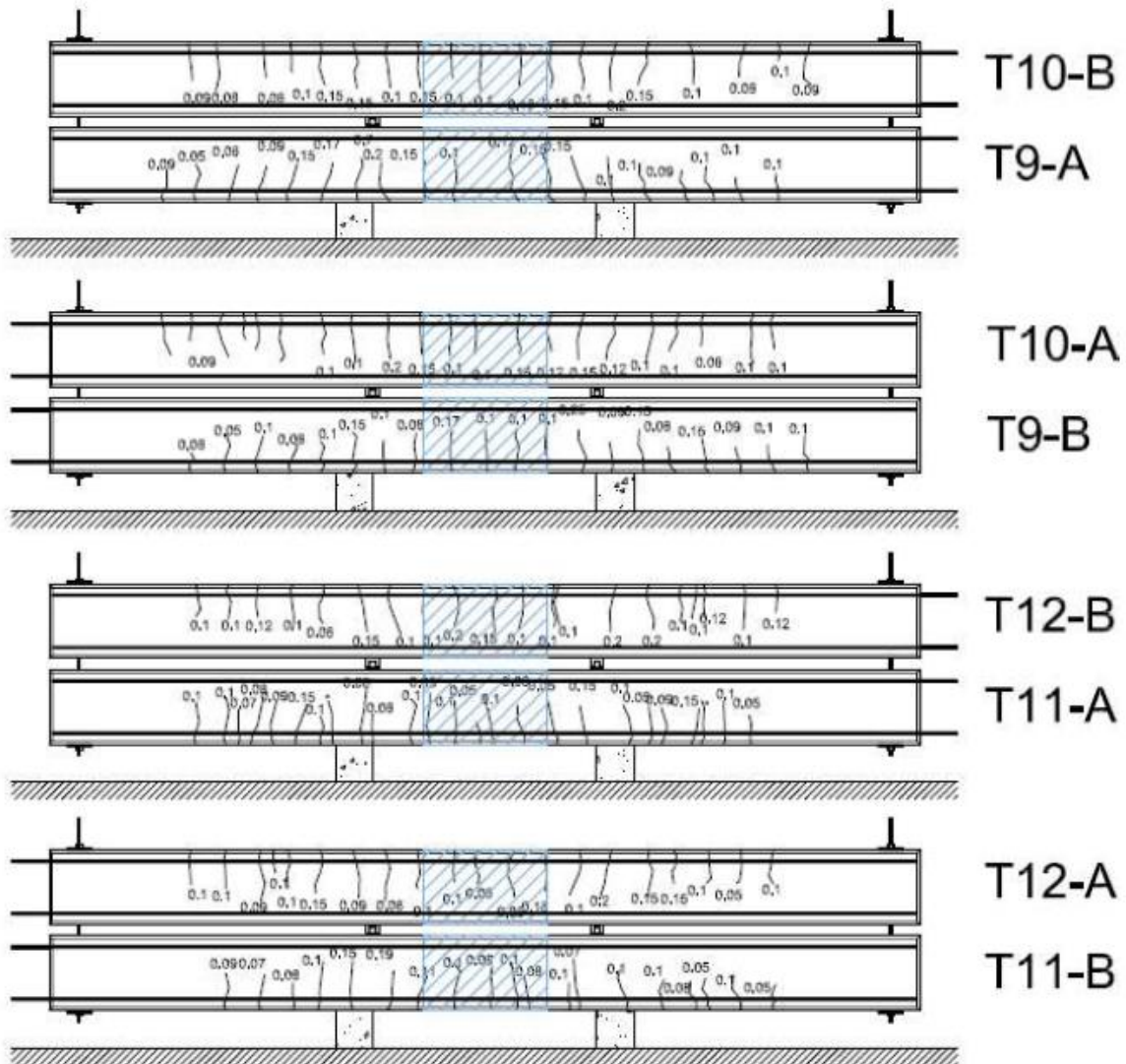


Figura 2.24 Esquema de grietas de traves T9 a T12 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro.

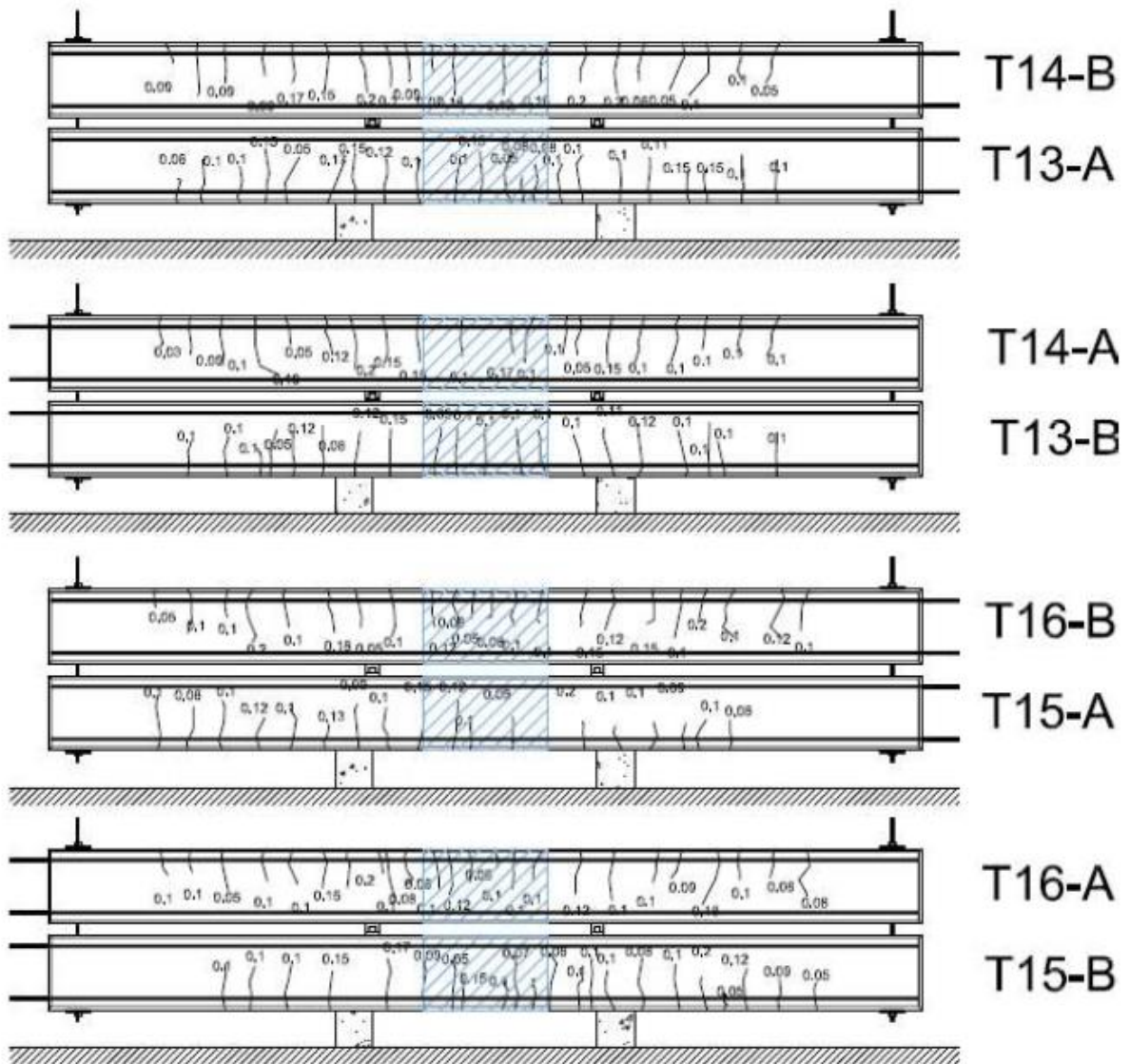


Figura 2.25 Esquema de grietas de traves T13 a T16 de CR con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro.

CAPÍTULO 3 REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se presenta la revisión de la literatura. Dicha revisión se enfocó en estudios experimentales de traves de CR con corrosión, los efectos del agrietamiento en la corrosión, las técnicas de inducción de corrosión y los estudios realizados en la Facultad de Ingeniería UADY.

3.1 Estudios experimentales de traves de concreto reforzado con corrosión

Ballim & Roid (2003) estudiaron el comportamiento de 12 traves de CR, de las cuales seis se consideraron con corrosión en el AR y seis sin corrosión. Las dimensiones de las traves fueron de 10x16x150 cm (ancho x altura 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 fue de 5853 kg/cm². La resistencia a compresión axial del concreto fue de 407 kg/cm². Para el proceso de corrosión las traves fueron sumergidas en una solución conformada por agua contaminada por NaCl al 3% del peso del agua y se aplicó corriente eléctrica en el AR longitudinal a tensión en un rango de 10-100 µA/cm² por 3 meses. La variable de estudio fue la magnitud de la carga sostenida. Se consideraron dos magnitudes de carga, la primera fue del 23% de la carga asociada con la resistencia última y la segunda del 34%. 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 la trave de CR. Una vez alcanzado el nivel de corrosión deseado se retiró la carga sostenida. Se concluyó que al aumentar la magnitud de las cargas sostenidas incrementa la presencia de agrietamientos y con ello el nivel de corrosión del AR. 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.

Gu et al. (2010) estudiaron el comportamiento a flexión de 15 traveses de CR. Se consideraron nueve traveses con corrosión inducida mediante corriente impresa, tres traveses con corrosión natural y tres traveses sin corrosión. Las dimensiones de las traveses con corrosión inducida y sin corrosión fueron de 15x20x220 cm (ancho x altura x longitud). Las dimensiones de las traveses con corrosión natural fueron de 16.4x17.5x268 cm, 14.8x19.1x268.5 cm y 14.7x18.7x263.8 cm (ancho x altura 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 fue dos barras lisas de 10 mm. El AR transversal consistió en barras lisas con diámetro de 6 mm a una separación de 15 cm. La resistencia promedio a la fluencia del AR longitudinal a tensión de las traveses con corrosión natural fue de 3620 kg/cm². La resistencia promedio a la fluencia del AR longitudinal a tensión de las traveses con corrosión acelerada fue de 3,579 kg/cm². La resistencia a compresión axial promedio del concreto de las traveses con corrosión natural fue de 223 kg/cm². La resistencia a compresión axial de las traveses con corrosión acelerada fue de 281 kg/cm². 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 y corrosión por corriente impresa. Para la técnica de corrosión natural se recuperaron traveses pertenecientes a un edificio sometido durante décadas a ambiente salino. Para la segunda variable se consideraron niveles de corrosión asociados al 10, 20 y 30% de la pérdida de masa en el AR longitudinal. Para la tercera variable se eligieron barras de AR con diámetros de 12, 14 y 16 mm. Las traveses se ensayaron hasta la falla utilizando un sistema de cargas de tres puntos. Posteriormente, se demolieron las traveses, se limpió el AR y se midió la pérdida de masa y profundidad de picaduras. Se observó que las traveses 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).

Yu-Chen et al. (2016) estudiaron el comportamiento a tensión de barras de AR con corrosión. 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 trabes de CR a las que se aplicó corriente impresa en laboratorio para inducir la corrosión del AR. 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 y corriente impresa. 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 4290 kg/cm² y de 4688 kg/cm² para 13 mm y 29 mm de diámetro, respectivamente. La resistencia a la fluencia de las barras de AR con corrosión inducida fue de 3116 kg/cm², de 2555 kg/cm² y de 4213 kg/cm² para 13 mm, 16 mm y de 19 mm de diámetro, 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 inducida, debido a que ésta es más uniforme en comparación con la corrosión natural. Por lo tanto, tomar como referencia la resistencia última de las barras de AR sometidas a corrosión por corriente impresa puede ser conservador.

Ahmad et al (2017) desarrollaron un modelo para predecir la resistencia residual a flexión de traveses de CR sujetas a la corrosión en el AR. Se consideraron 28 traveses de CR de 15x15x110 cm (ancho x altura x longitud), en todas las traveses se consideraron dos barras de AR longitudinal a compresión de 10mm de diámetro el cual fue aislado eléctricamente. El AR transversal rectangular fue de 6mm de diámetro separado a cada 9cm. Las variables de estudio fueron el diámetro del AR longitudinal, el espesor del recubrimiento y el tiempo de aplicación de la corrosión. Para la primera variable 14 traveses fueron reforzadas con dos barras en el AR longitudinal a tensión de 10mm de diámetro y el resto con dos barras de AR longitudinal a tensión de 12mm de diámetro. Para la segunda variable se consideraron dos espesores de recubrimiento (2.5 y 4cm). Para la tercera variable se utilizaron tres tiempos de aplicación de corrosión (4, 6 y 8 días). Se formaron grupos con especímenes de cada caso, los cuales no fueron sometidos a corrosión. Para las otras traveses se aplicó corrosión por corriente impresa, variando la densidad de corrosión aplicada a las barras. Concluido el periodo de estudio las traveses fueron sometidas a pruebas de flexión hasta la falla y se recuperó el AR longitudinal para registrar la pérdida de masa. Con los resultados de las mediciones se calibró una fórmula para predecir la resistencia a flexión residual. Para ello se consideró la velocidad de corrosión, el tiempo de aplicación de la corrosión y el diámetro del AR. Se concluyó que la velocidad de corrosión y el diámetro del AR tienen efecto significativo en la resistencia residual a flexión, debido que a medida que estos parámetros se incrementan la resistencia residual disminuye. La fórmula generada en esta investigación predice con un error del 5% la resistencia residual a flexión de las traveses de CR reportadas en anteriores investigaciones.

Suvash et. al (2018) estudiaron el comportamiento de traveses reforzadas con acero tipo SHCC y morteros sometidos a la corrosión. Se consideraron 36 traveses SHCC de 10x10x50cm (ancho x altura x longitud). En el caso de morteros se estudiaron 10 especímenes. Todas las traveses fueron reforzadas con una barra de 10mm de diámetro, con una resistencia a tensión de 5200 kg/cm². La variable de estudio fue el recubrimiento. Para el caso de traveses SHCC, en 18 se utilizaron recubrimientos de 15,

25 y 35mm, para el resto solo se consideraron recubrimientos de 15 y 25mm. Para el caso de morteros, seis utilizando un recubrimiento de 15mm y los otros cuatro con recubrimientos de 15 y 25mm con una deflexión al centro de 0.15mm. Se aplicó un sistema de tres puntos a las trabes para generar los agrietamientos, los cuales fueron registrados. Se indujo la corrosión con ciclos de mojado y secado, para ello todas las caras agrietadas de los especímenes fueron puestas en contacto con agua contaminada con NaCl al 3.5% del peso del agua para inducir la corrosión mediante ascensión capilar. Se midió de manera semanal la velocidad de corrosión. Durante el periodo de estudio se extrajeron muestras de polvo a cada 3mm de profundidad hasta alcanzar los 45mm para determinar el contenido de iones de cloruro libres. Todos los especímenes fueron llevados hasta la falla y se recuperó el AR para registrar las picaduras y la pérdida de masa. Se observó que a medida que incrementa la frecuencia de las grietas el patrón de corrosión en el AR tiende ser más localizado. A medida que incrementa la frecuencia de las grietas, la picadura en el AR disminuye. Al incrementar la picadura disminuye la resistencia del AR. Por último, el contenido de iones de cloruro disminuye conforme incrementa la profundidad de estudio.

3.2 Efecto del agrietamiento en la corrosión

Arya et al. (1996) estudiaron la relación entre la cantidad de las grietas y la evolución de la corrosión en el AR. Para ello se utilizó dos modelos de estudio, el primero se conformó de 28 trabes de 13.5x10x136 cm (ancho x altura x longitud), todas las trabes fueron reforzadas con una barra de acero inoxidable de 8mm de diámetro al centro y dos barras de acero en los extremos de 8 mm de diámetro. En el caso del segundo modelo se estudió una trabe de CR de 17x15x400cm (ancho x altura x longitud). Esta última fue contaminada con 5% de NaCl en su fabricación. El refuerzo consistió en una barra de 2 cm de diámetro, la cual se dividió en 19 segmentos que simulaban la posición de las grietas. La variable de estudio fue la cantidad de grietas en trabes de CR. Para esta variable se consideraron anchos de grieta de 0, 1, 4, 8, 12, 16 y 20 mm. Las trabes del primer modelo fueron rociadas 3 veces por semana con una solución de agua contaminada con NaCl al 3% en un periodo de 7 meses, posteriormente se

rociaron 3 veces por mes, durante dichos periodos se tomó registro de las velocidades de corrosión. En el segundo modelo cada segmento del AR fue conectado con cables de manera sucesiva para obtener el efecto acumulativo del número de grietas en la evolución de la velocidad de corrosión. Para ambos modelos se concluyó que a medida que incrementa la cantidad de grietas mayor es la velocidad de corrosión reportada. Por lo que la presencia de grietas tiene un efecto en acelerar el proceso de corrosión.

Jiménez et al. (2010) analizaron el efecto del ancho de grieta en la corrosión del AR en especímenes de concreto expuestos a ambientes marinos. Para ello se estudiaron 20 trabes de CR de 5.5x20x30 cm (ancho x altura x longitud). Todos los especímenes fueron reforzados con 2 barras de acero inoxidable en los extremos y un contra electrodo en el centro. El recubrimiento utilizado fue de 2cm. Las variables de estudio fueron la relación a/c y los anchos de grieta. Para la primera variable se consideraron cuatro relaciones de agua-cemento (0.3, 0.4, 0.5 y 0.6). Para la segunda variable cinco anchos de grieta (0.0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mm) La técnica para acelerar el proceso de corrosión fue mediante exposición en ambiente natural. Se realizaron inspecciones visuales y mediciones de parámetros de corrosión (velocidad de corrosión y potencial de corrosión) en un periodo de 5 años. Se observó que después de 5 años de exposición las trabes con relación a/c de 0.5 y 0.6 contaban con presencia de grietas, mientras para trabes con relación a/c de 0.3 y 0.4 comenzaban a agrietarse. Las trabes con relación a/c de 0.5 y 0.6 presentaron una mayor degradación en la superficie del concreto. El agrietamiento horizontal fue más rápido en trabes de CR con anchos de grieta vertical de 0.1 y 0.4mm. Los valores de velocidad de corrosión y potencial de corrosión indican la presencia de una corrosión activa con un alto riesgo de corrosión, que concuerda a lo reportado en la inspección visual. Se concluyó que las trabes con relaciones a/c bajas tienen el efecto de desacelerar el proceso de corrosión y con ello reducir la presencia de agrietamientos debidos a estos procesos en el CR. Se recomendó realizar un estudio similar utilizando especímenes a escala natural

aplicando cargas sostenidas para analizar el efecto del agrietamiento por flexión en trabes de CR.

Uddin et al (2018) realizaron una revisión exhaustiva de la literatura y relacionaron los efectos del agrietamiento en la evolución de la corrosión en el AR. Se consideraron los resultados de diversas investigaciones que traten sobre los parámetros de corrosión y el agrietamiento de trabes de CR. Se relacionó el efecto del agrietamiento con la evolución de la corrosión en el AR. Se observó una tendencia en la evolución de la velocidad de corrosión hasta llegar a un ancho de grieta de 0.3mm. Igualmente se observó que a medida que incrementa el ancho de grietas mayor es la pérdida de masa del AR. Conforme incrementa la cantidad de las grietas aumenta la pérdida de masa del AR. Si la cantidad de grietas disminuye la corrosión pasa de ser localizada a semi-uniforme. Así mismo conforme incrementa la profundidad de las grietas el contenido iones de cloruros libres disminuye, lo cual indica que existe un transporte de agentes agresivos del exterior al interior de las trabes. Por último, cuando las grietas tienen un ancho inferior a 0.3mm se observa un efecto de auto reparación de grietas, esto debido a la formación de una capa cuando los elementos están en contacto con el oxígeno y la humedad, que impide el transporte de agentes externos.

3.3 Técnicas de inducción de corrosión

González et al. (1995) estudiaron la corrosión en el AR de 28 trabes sometidas a diferentes técnicas de corrosión. La variable de estudio fue la técnica de inducción de corrosión. Para ello se utilizó dos modelos de estudio, el primero se conformó de 14 trabes de CR con corrosión natural de 50x50x10 cm (ancho x altura x longitud), las trabes fueron reforzadas con una barra de acero inoxidable de 8mm de diámetro al centro. Para el proceso de corrosión se colocaron paños húmedos sobre las trabes de CR mientras fueron expuestas a un ambiente de laboratorio manteniendo entre 50-60% de humedad relativa (HR) por 6 años. El segundo modelo consistió en 14 trabes de CR con corrosión por corriente impresa de 2x5.5x8cm (ancho x altura x longitud), estas fueron reforzadas con una barra de acero inoxidable de 6mm de diámetro al

centro. Para el proceso de corrosión las traveses fueron sumergidas en una solución conformada por agua contaminada por NaCl al 3% del peso del agua y se aplicó corriente eléctrica en el AR en un rango de 10-100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ por 3 meses. Todas las traveses fueron contaminadas con 3% de CaCl_2 ppc en su fabricación. Una vez finalizado el proceso de corrosión en traveses reforzadas se demolieron las 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 la profundidad de picadura máxima es de 4 a 8 veces la profundidad de picadura promedio. La velocidad de corrosión fue superior en traveses con corrosión por corriente impresa. Por lo que existe diferencias entre la corrosión por corriente impresa y la corrosión natural.

Yuan et al. (2007) compararon dos técnicas de aceleración de corrosión en traveses de concreto reforzado. Las dimensiones de las traveses de CR fueron de 100x160x11500 mm (ancho x altura x longitud). El AR longitudinal a tensión consistió en dos barras corrugadas de 12 mm de diámetro. El AR longitudinal a compresión consistió en dos barras lisas de 8 mm. Las variables de estudio fueron los anchos de grieta provocados por los efectos de la corrosión y las técnicas de inducción de corrosión. Para la primera variable se consideraron anchos de grieta provocados por los efectos de la corrosión de 0.2, 0.5 y 0.8mm. Para la segunda variable se consideraron tres técnicas, corrosión natural, corrosión por corriente impresa y corrosión por ciclos de mojado y secado. Para la primera técnica, se sumergieron tres traveses de CR en una solución de agua contaminada con NaCl al 3.5% del peso del agua y se les aplicó corriente eléctrica en el AR a tensión dentro del rango de 20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ por tres meses. Para la segunda técnica, se ubicaron a tres traveses en un cuarto con ambiente controlado (80% HR), el cual simulaba los ciclos de mojado y secado. Para el ciclo de mojado se rociaron a las traveses con una solución de agua contaminada con 3.5% de NaCl por 1 hora. Para el ciclo de secado se realizó sometiendo a las traveses a luz infrarroja por 7 horas. Para la tercera técnica, se recuperaron tres traveses de una construcción sometida a 20 años de ambiente salino. Se aplicó un sistema de cargas sostenidas para someter a las traveses

al 60% del esfuerzo de fluencia en el AR longitudinal a tensión. Una vez alcanzado los anchos de grietas deseados se prosiguió a ensayar a las trabes y determinar el efecto de la corrosión en el AR. No se observaron pérdidas de resistencia en el AR en grietas horizontales inferiores a 0.5mm. Así mismo al recuperar el AR se observó que para los especímenes con corriente impresa el patrón de corrosión resulto ser semi-uniforme, mientras que para los especímenes sometidos a ciclos de mojado y secado se observó la presencia de corrosión en zonas próximas a los recubrimientos y a los agrietamientos. Debido al patrón de corrosión presentado en trabes con corriente impresa (uniforme), el AR tuvo mayores pérdidas de resistencia. Se concluyó que la corrosión por corriente impresa tiene la ventaja de controlar el grado de corrosión (pérdida de masa) y generar especímenes corroídos en cortos periodos de tiempo, pero desde el aspecto electroquímico el proceso de corrosión es diferente a si fuera sometido a un proceso de ambiente natural. Por último, el proceso y características de corrosión en el AR bajo el efecto de los ciclos de mojado y secado son similares a los obtenidos por medios naturales, por lo que este método para acelerar la corrosión es más representativo.

Hailong et al. (2018) compararon dos técnicas de inducción de corrosión en el comportamiento a flexión de trabes de CR. Se construyeron 19 trabes de 100 x 160 x 1400 mm (ancho x altura x longitud). La resistencia a compresión del concreto fue de 468 kg/cm². El AR longitudinal a tensión consistió en dos barras de 12mm y dos barras de 8 mm para AR longitudinal a compresión. El AR transversal consistió en estribos de 6mm a cada 100 mm. Las trabes estuvieron sujetas a cargas sostenidas utilizando un sistema de cargas en cuatro puntos. Las variables de estudio fueron la técnica de corrosión, el esfuerzo en acero de refuerzo a tensión y el nivel de corrosión. Para la primera variable se consideraron dos técnicas, corrosión por corriente impresa y corrosión por ciclos de mojado y secado. Para la primera técnica se sumergieron las trabes en una solución de agua contaminada con 3.5 % de NaCl mientras se aplicaba una corriente eléctrica constante de 2 A en el AR longitudinal a tensión. Para la segunda técnica fue corrosión por ciclos de mojado y secado en un ambiente artificial

el cual mantenía un ambiente de 40°C y 90% de HR. Para la segunda variable, se aplicaron cargas hasta alcanzar un momento asociado al 0, 30 y 60% del esfuerzo de fluencia del AR longitudinal a tensión. Para la tercera, los niveles de corrosión se definieron cuando se observaron anchos de grietas horizontales de 0.3, 0.5, 0.8 y 1.0mm. Las traveses se ensayaron hasta la falla utilizando un sistema de cargas en cuatro puntos. Posteriormente, se extrajo el AR longitudinal a tensión de las traveses y se determinó su pérdida de masa. Se concluyó que la corrosión por corriente impresa generó en las traveses un patrón de corrosión uniforme en todo el AR. Por el contrario, la corrosión por ciclos de mojado y secado en ambiente controlado presenta características de corrosión en el AR similares a los obtenidos en investigaciones aplicando ambientes naturales (semi-localizada en zonas próximas al agrietamiento o a los recubrimientos). Igualmente se concluyó que la aplicación de cargas sostenidas en las traveses de CR acelera el proceso de corrosión en la zona de flexión pura. Se observó menor nivel de corrosión en traveses sometidas a ciclos de mojado y secado. Por último, del ensaye a flexión de traveses contaminadas con ciclos de mojado y secado se observó que para un mismo nivel de carga a medida que se generaban anchos de grietas horizontales de 5mm la capacidad de deformación de las traveses disminuían sin embargo las resistencias solo se redujeron en un 5%. Existe una fuerte relación entre el ancho de grieta horizontal y la pérdida de masa del AR.

3.4 Estudios realizados en la Facultad de Ingeniería UADY.

Rejón (2016) estudió la efectividad de realizar imprimaciones al AR después de haber sido limpiado y exponerlo a ambientes corrosivos. Para ello en una primera etapa se construyeron 4 especímenes cilíndricos de CR de 7.5x15cm (diámetro x altura) para someterlos a diferentes ciclos de mojado y secado. Todos fueron reforzados con una varilla de 10 mm al centro. Con el fin de determinar el ciclo ideal para realizar esta investigación, se sometieron a 4 diferentes ciclos 2-22, 4-20, 12-12 y 48-120 horas de mojado y secado, respectivamente. En cada una de estas se tomaron mediciones del potencial de corrosión (E_{corr}) y velocidad de corrosión (i_{corr}) durante 8 semanas. Para el primer ciclo el último valor del E_{corr} fue de -531 mV, el i_{corr} fue de 22.1 $\mu A/cm^2$.

Para el segundo ciclo el último valor del E_{corr} fue de -546 mV, el i_{corr} fue de 15.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Para el tercer ciclo el último valor del E_{corr} fue de -582 mV, el i_{corr} fue de 3.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Para el cuarto ciclo el último valor del E_{corr} fue de -93 mV, el i_{corr} fue de 0.16 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Con base en los resultados obtenidos se definió que el ciclo ideal era 12 horas de mojado y 12 horas de secado. La variable de estudio fue el tiempo transcurrido entre la limpieza y la imprimación del AR. Para esta variable se utilizó 1 y 5 días de pre-corrosión marina y 1 y 11 días de pre-corrosión urbana. Se realizó la imprimación en el AR y se midió de manera periódica los parámetros de corrosión. Se concluyó que las barras pre corroídas en un ambiente urbano presentaron mayor efectividad en la imprimación que en las barras pre corroídas en un ambiente marino. El tiempo de exposición del AR en ambiente marino fue de gran importancia, ya que este afecta directamente a la efectividad de la imprimación y a la durabilidad del AR.

Visairo. (2016) estudió el comportamiento a tensión de barras de AR con corrosión. Se estudiaron ocho traveses de CR, las dimensiones de las traveses fueron de $15 \times 30 \times 350$ cm (ancho \times altura \times longitud). El AR longitudinal a tensión consistió en dos barras corrugadas de 13 mm de diámetro. El AR longitudinal a compresión consistió en dos barras corrugadas de 10 mm. Para el AR transversal se utilizaron barras lisas de 6 mm a cada 13 cm. La resistencia a la fluencia del AR fue de 4200 kg/cm^2 . La resistencia a compresión axial del concreto fue de 250 kg/cm^2 . La variable de estudio fue el porcentaje del esfuerzo de fluencia en el AR longitudinal a tensión (40 y 80%). La corrosión se indujo de manera acelerada en el AR, para ello se contaminó al concreto con una solución salina en su fabricación. Posteriormente se aplicaron ciclos de mojado y secado. En una etapa inicial se realizó un ensayo preliminar de las traveses y posteriormente se aplicó un sistema de postensado en pares aplicando los niveles de esfuerzos requeridos. Se concluyó que la pérdida de rigidez tangente promedio posterior al agrietamiento por flexión de las traveses fue del 76%. Se observó poca variación en los potenciales de corrosión correspondientes a traveses sujetas al 40% y al 80% del esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo longitudinal. Por lo que se

encontró que, para los especímenes estudiados, los esfuerzos de tensión en el acero no influyen en el nivel de potencial de corrosión medido en las trabes.

Ponce (2018). Evaluó el efecto del agrietamiento y de las condiciones climáticas en la evolución de los parámetros de corrosión de trabes de CR sujetas a flexión. Se consideraron 16 trabes de CR de 15x30x350 cm (ancho x altura x longitud). En todas las trabes el AR longitudinal a compresión fue conformado por dos barras de 10 mm de diámetro. Para el AR transversal se consideraron barras lisas de 6 mm de diámetro con un esfuerzo de fluencia de 2320 kg/cm². Este refuerzo se conformó de estribos rectangulares separados a cada 13 cm. La resistencia a compresión axial de diseño del concreto fue de 280 kg/cm². Se consideró un recubrimiento constante de 4 cm de espesor. Para el AR longitudinal, se consideraron barras corrugadas con esfuerzo de fluencia de 4544 kg/cm². La variable de estudio fue el diámetro del AR longitudinal a tensión. Ocho trabes se consideraron con dos barras de AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y para las 8 restantes se consideraron dos barras de AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro. En las trabes se aplicó un sistema de cargas sostenidas conformado por un sistema de carga en cuatro puntos, estas se aplicaron hasta generar un momento asociado al 60% del esfuerzo de fluencia. Se midió semanalmente la velocidad de corrosión, potencial de corrosión, resistividad eléctrica, humedad relativa, temperatura y precipitación. Estas últimas tres se recabaron de una estación meteorológica. Para todas las trabes se ubicaron las grietas con sus respectivos anchos y longitudes. De manera periódica se determinó el contenido de iones de cloruros libres. Se concluyó que las trabes conformadas con AR longitudinal de menor diámetro presentaron valores más altos de potencial de corrosión. Así mismo los valores de velocidad de corrosión reportados indican una corrosión activa. Por otra parte, el contenido de cloruros indicó que el AR está pasivado, por lo que existe un efecto del agrietamiento en la evolución de la corrosión en trabes de CR sujetas a flexión. No se observó una correlación entre los factores climáticos y los parámetros de corrosión medidos.

3.5 Conclusiones de la revisión de la literatura.

Con base en la revisión de literatura se observó que:

1. Las variables más estudiadas en trabes de CR han sido el nivel de corrosión, el diámetro del AR longitudinal a tensión, la aplicación de cargas sostenidas, el ancho de grietas y la técnica de inducción de corrosión.
2. En trabes de CR, a medida que incrementa el nivel de corrosión en el AR, la resistencia a flexión disminuye. Así mismo se observó que el efecto de la corrosión en AR transversal puede generar un cambio de un comportamiento asociado a flexión a uno asociado a cortante.
3. Se ha observado que conforme incrementa el diámetro del AR longitudinal a tensión en trabes de CR disminuye los efectos de la corrosión, esto se debe a la menor presencia de anchos de grieta verticales por lo que se dificulta el transporte de agentes agresivos.
4. Existen pocas investigaciones en donde se someten a los especímenes a cargas sostenidas. Para dichos casos se observó una propagación de la corrosión en zonas con mayor concentración de grietas asociadas a la aplicación de dichas cargas.
5. Se ha estudiado el efecto del agrietamiento en la corrosión del AR en trabes de CR. En dichas investigaciones se ha observado que la corrosión genera esfuerzos radiales en el AR por la transformación del acero en óxido, lo que propaga la aparición de grietas horizontales que facilitan el acceso de agentes agresivos. Por lo que la corrosión se puede considerar como una acción que modifica la respuesta en las estructuras y está asociada al nivel de daño (Arietamientos).
6. Las técnicas de corrosión más utilizadas fueron mediante corrosión natural, corrosión por corriente impresa y corrosión por ciclos de mojado y secado. La corrosión natural genera un patrón de corrosión localizado en el AR. La técnica que mejor representa a la corrosión natural es mediante de ciclos de mojado y

secado. La técnica de corrosión por corriente impresa genera un patrón de corrosión uniforme en el AR.

7. Se ha observado que existe poca diferencia entre los parámetros reportados usando los ciclos de 2-22 y 4-20 horas mojado y secado, respectivamente. Por otro lado, se observan mayores valores velocidades de corrosión en ciclos de 4 horas de mojado y 20 horas de secado en comparación a los reportados usando ciclos de 12 horas de mojado y 12 horas de secado. Por lo que para acelerar el proceso de corrosión se recomienda usar ciclos de 4-20 horas de mojado y secado, respectivamente.
8. Existen pocos estudios de trabes de CR a escala real, bajo cargas sostenidas que simulen las condiciones de servicio de la estructura y que a su vez utilicen técnicas que generen características similares a la corrosión natural.
9. La mayoría de las investigaciones se dividen en tres grupos de enfoque; los que estudian la evolución de la corrosión en trabes mediante el control de parámetros electroquímicos (Potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad eléctrica del concreto), los que analizan la evolución de la corrosión mediante el control de parámetros físicos (Pérdida de sección en el AR y Agrietamientos) y los que analizan el cambio en el comportamiento estructural de las trabes mediante el estudio de parámetros mecánicos (Pérdida de resistencia a flexión, rigidez y ductilidad).
10. En la mayoría de los grupos de investigación el nivel de corrosión se controló con parámetros electroquímicos, siendo la velocidad de corrosión el más usado. En dichas investigaciones se ha observado reducciones de resistencia menores al 5% debido que no existe control en el cambio en la cantidad de AR durante el periodo de investigación.
11. El nivel de corrosión se tiene que controlar mediante el uso de parámetros estructurales asociados al cambio en el comportamiento estructural de trabes de CR. Dicho control se puede realizar tomando en cuenta la evolución de los parámetros físicos y electroquímicos. Con base en la revisión de literatura se ha observado que los principales parámetros asociados a la pérdida de resistencia

son los parámetros físicos. Mientras que los parámetros electroquímicos se utilizan como técnicas experimentales no destructivas por lo que con estos se puede fijar un criterio no destructivo al alcanzar el nivel de corrosión.

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología desarrollada para el cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo.

1. Monitoreo y control de cargas sostenidas
2. Corrosión severa
3. Inducción de corrosión acelerada
4. Monitoreo de parámetros de corrosión

Los detalles de cada una de estas actividades se presentan en las siguientes secciones.

4.1 Monitoreo y control de cargas sostenidas en trabes de CR

Para realizar el control de cargas sostenidas se aplicaron cargas sostenidas a las trabes con el sistema descrito en la sección 2.2.5. Las cargas se aplicaron en incrementos graduales hasta generar un momento asociado al 60% de la fluencia del AR longitudinal a tensión. En la Figura 4.1 se presenta el esquema de colocación de celdas de carga. Los valores de carga P (Figura 2.8) para generar el 60% de momento de fluencia son: 1600 kg para trabes con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y 2800 kg para trabes 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 kg y 2800 kg) como referencia y se compararon con los valores de carga en las trabes al momento de realizar el control de cargas sostenidas. Se registraron las pérdidas de carga por pares de trabes y dichas pérdidas se expresaron en porcentajes. Con base a los anteriores controles de cargas realizados este proceso se repitió cada 2 meses (pérdidas de carga menores al 13%).

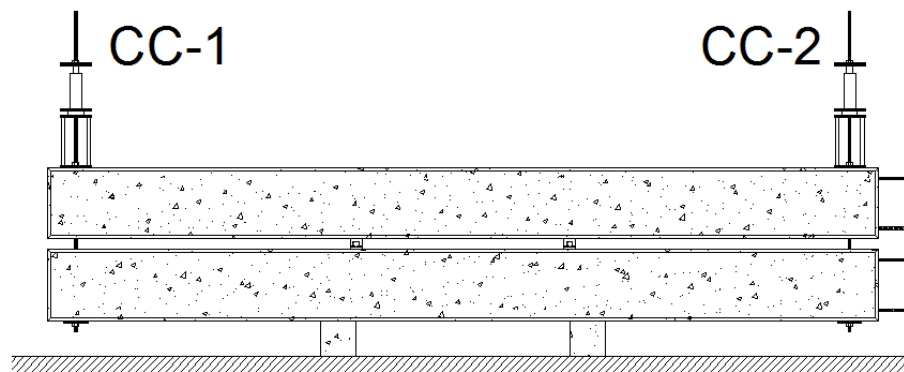


Figura 4.1 Esquema de colocación de celdas de carga.

4.2 Corrosión severa

Con base en la revisión de literatura el nivel de corrosión se controlará con el uso de parámetros mecánicos asociados al cambio en el comportamiento estructural de trabes de CR. Para este trabajo de investigación se considerará como corrosión severa a la pérdida del 20% de la resistencia a flexión o cortante. Dicho nivel de corrosión se controlará mediante el uso de parámetros físicos asociados a la reducción de la resistencia (Agrietamientos y pérdida de sección en el AR). Se continuará el monitoreo de la evolución de los parámetros electroquímicos para tener un criterio no destructivo de este nivel de corrosión.

Mediante el análisis de la sección se realizó una primera estimación de la pérdida necesaria en la cantidad de AR para reducir la resistencia a flexión en un 20% (Figura 4.2 y Figura 4.3). En ambos casos se requiere reducir la sección del AR a tensión en un 20%. Con base en la revisión de literatura se determinó que el ancho de grieta horizontal asociado a dicha pérdida de resistencia corresponde a 1mm (Hailong, 2018). Estos criterios servirán como punto base para realizar las inspecciones físicas en las trabes de CR.

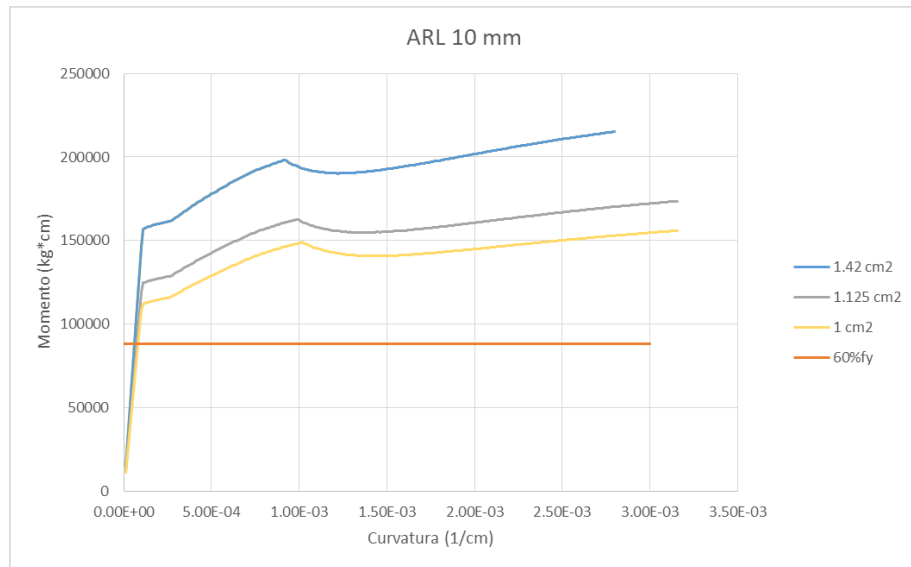


Figura 4.2 Efecto en el cambio de la cantidad de AR en traves con AR de 10mm.

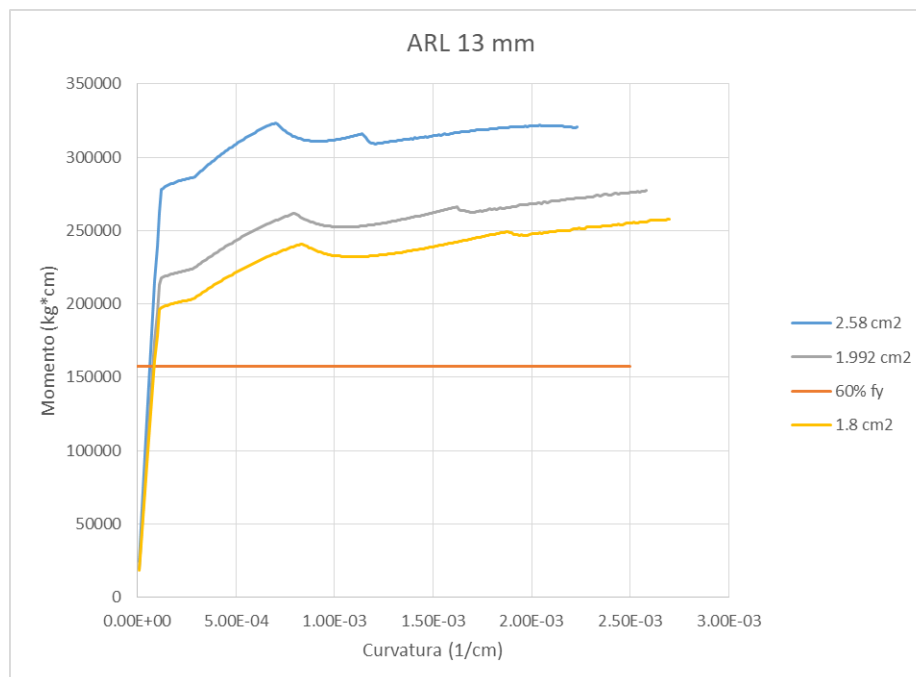


Figura 4.3 Efecto en el cambio de la cantidad de AR en traves con AR de 13mm.

4.3 Inducción de corrosión acelerada

Se seleccionaron cuatro traves dos con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm, respectivamente. Para asegurar la protección del laboratorio y del resto de los traves

se elaboró una cámara para ubicar a dichas traveses y posteriormente contaminarlas con cloruros (Figura 4.4).



Figura 4.4.- Cámara de corrosión.

El proceso de corrosión acelerada fue inducido por medio de ciclos de mojado y secado con agua desionizada contaminada por cloruros (NaCl) al 3.5% del peso del agua. Para ello se utilizaron ciclos de 4 horas de mojado y 20 horas de secado. Este proceso se continuará hasta alcanzar una corrosión severa. A continuación, se describe el proceso de inducción de corrosión:

Previo a la inducción de la corrosión, todas las traveses fueron cubiertas con franelas de dimensiones de 50 cm x 105 cm (ancho x largo) en las zonas donde se inducirá la contaminación con cloruros (Figura 4.5).

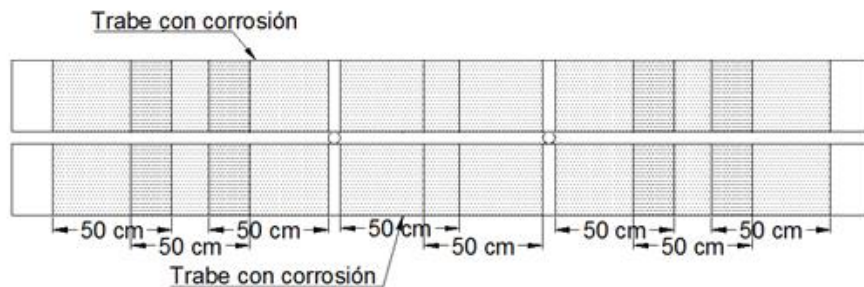


Figura 4.5 Distribución de franelas humedecidas

Una vez colocadas las franelas se aplicó la solución contaminada con cloruros hasta saturarlas. Dicho proceso se llevó a cabo con ayuda de un cilindro presurizado (Figura 4.6). Después de saturar las franelas se dejó esperar un lapso de cinco minutos para que las traveseras absorbieran la solución en cantidades similares. Una vez transcurrido dicho lapso de tiempo se aplicó nuevamente la solución con cloruros.



Figura 4.6 Cilindro presurizado con aspersor.

La solución se aplicó longitudinalmente (Figura 4.7a) y de arriba hacia abajo (Figura 4.7b) en ambas caras de la trabe sin volver a pasar por el mismo punto, la distancia de aplicación fue de 25 cm. Para controlar la velocidad de aplicación se utilizó un metrónomo a una frecuencia de 30 bpm (bips por minuto), el tiempo de aplicación (2 segundos) se distribuyó a lo largo del peralte de la trabe (30 cm), por tanto la velocidad de aplicación fue de 15 cm/s. Lo anterior permitió una aplicación uniforme de la solución contaminada con cloruros.

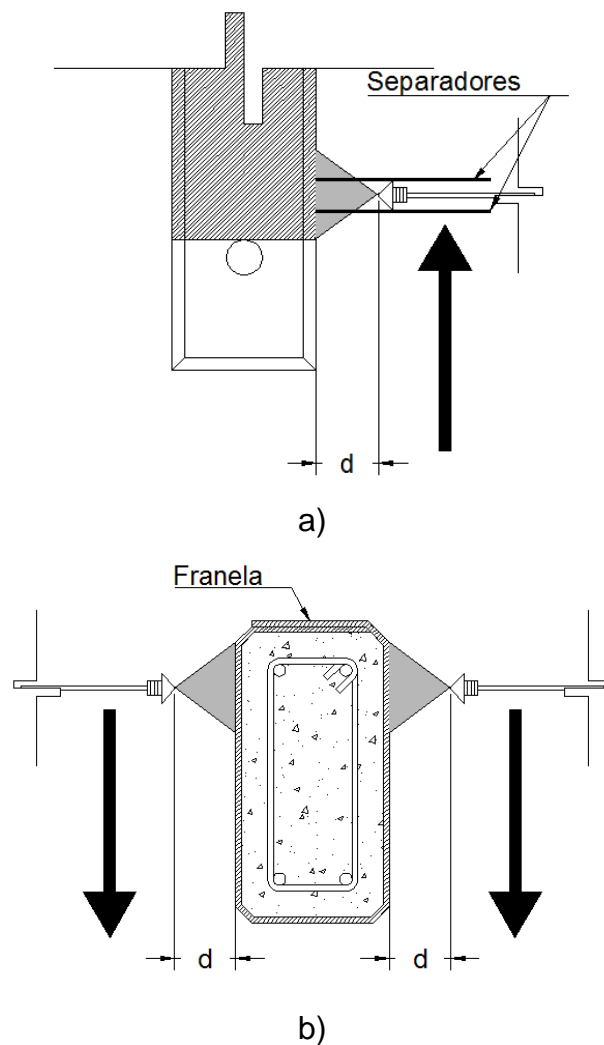


Figura 4.7 a) Detalle en planta de aplicación de solución con cloruros, b) Detalle transversal de aplicación de solución con cloruros

Una vez terminado el proceso de contaminación por cloruros descrito anteriormente, se procedió a cerrar la cámara con cubiertas de plástico a base de polímero de polietileno. La precaución antes mencionada se tomó con el propósito de conservar en la mayor medida posible la humedad a la cual serán sometidas las traveses con corrosión. Se verificó la conservación de la humedad dos veces hasta cumplir el ciclo de mojado de 4 horas. Concluido el ciclo anterior las traveses con corrosión se dejarán secar durante un periodo de 20 horas. Posterior a este lapso se repetirá el ciclo completo.

4.4 Medición de parámetros de corrosión

A continuación se describe el procedimiento utilizado para la medición de los parámetros electroquímicos y físicos considerados en este trabajo.

4.4.1 Monitoreo de parámetros electroquímicos

Se continuaron midiendo el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión, y resistividad eléctrica del concreto con un equipo Gecor6. Dichas mediciones se continúan hasta alcanzar el nivel severo de corrosión. Los pasos a realizar para las mediciones con el equipo Gecor6 (Figura 4.8) son los siguientes:

1. Las trabes se mojaron con agua potable durante 15 minutos aproximadamente. El mojado fue el necesario para saturar con agua los poros de las trabes, lo cual garantizó una adecuada conductividad para la medición de los parámetros de corrosión.
2. Se realizó la toma de lecturas con el equipo Gecor6 en el centro del claro de las trabes 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 de medio.



Figura 4.8 Equipo Gecor6.

Se realizó la conversión de la resistencia eléctrica obtenida del equipo Gecor6 a resistividad eléctrica con la Ecuación 4.1

$$\text{Resistividad eléctrica} = 2 * R * D \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

R Es la resistencia eléctrica obtenida con el Gecor6.

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

Para tomar las lecturas con el equipo Gecor6, se utilizaron paños esponja humedecidos. El paño esponja fue colocado entre el sensor de los equipos y el área donde se realizó la lectura. Se procedió a medir los parámetros de corrosión de las 16 trabes en estudio una vez por semana.

4.4.2 Control de parámetros físicos

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 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 4.9).



Figura 4.9 Medición del ancho de grietas en trabes de CR con microscopio

Se definieron tres zonas de agrietamiento; dos correspondientes a los agrietamientos ubicados en los extremos derecho e izquierdo donde el esfuerzo en el AR longitudinal

varia linealmente y uno correspondiente a los agrietamientos ubicados en la zona de flexión pura (centro de las traveses). Lo anterior se realizó para evaluar el efecto del agrietamiento en el cambio de los parámetros electroquímicos en dichas zonas. Se evaluó dicho efecto con el volumen de agrietamiento en el cambio del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Dicho análisis se realizó considerando los valores promedios por trabe del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión el día de la medición de grietas (150 días). Se consideró el efecto del ancho, longitud y cantidad de grietas. Las cantidades se presentan en términos de volumen de agrietamiento (mm^3). Se proponen dos formas para determinar el volumen de agrietamiento. Para el primer caso (Vg1), se consideró el ancho de grieta, una longitud de grieta unitaria y la cantidad de grietas. Para el segundo caso (Vg2) se consideró el ancho de grieta, la longitud de grieta y cantidad de grietas.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

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

1. Monitoreo y control de cargas sostenidas en traveses de CR
2. Parámetros electroquímicos de corrosión de traveses de CR
3. Evolución de agrietamientos en traveses de CR con corrosión

5.1 Monitoreo y control de cargas sostenidas en traveses de CR

En la Figura 5.1 se presentan las pérdidas promedio de carga sostenida para los traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Se presentan los valores de pérdida en términos de porcentaje a los 520, 597, 1068, 1131 y 1243 días respecto de la fabricación de los traveses. El porcentaje de pérdida de carga se calculó con el promedio de las pérdidas 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 los traveses con AR longitudinal a tensión de 10 y 13 mm de diámetro, respectivamente.

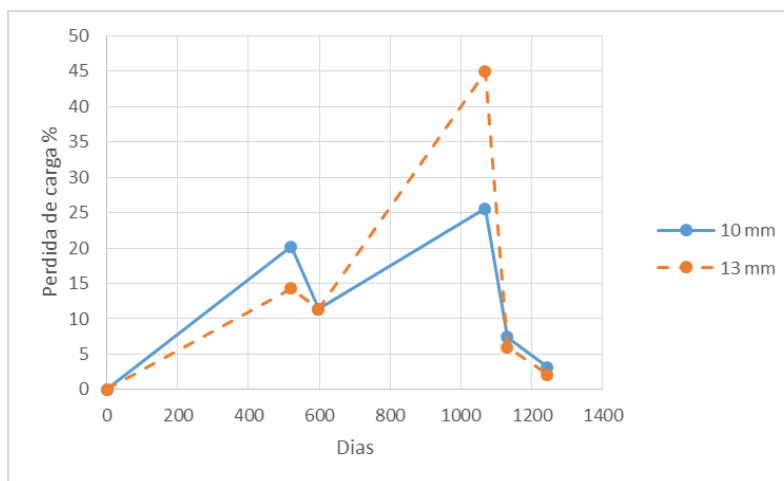


Figura 5.1 Porcentaje de pérdidas de carga para AR de 10 y 13 mm.

5.2 Parámetros electroquímicos de corrosión de traves de CR

En la Figura 5.2 y Figura 5.3 se presentan las gráficas de potencial de corrosión (E_{corr}) – Tiempo medido al centro del claro de las traves con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Las traves de referencia se representan con la nomenclatura T3, T4, T11 y T12 y las traves contaminadas con cloruros con T7, T8, T15 y T16. Se presentan los potenciales obtenidos, calculados como el promedio de las dos caras laterales de cada trave. Las líneas moradas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016. Las líneas negras punteadas verticales corresponden al preagrietamiento de las traves (día 150) y el inicio de inducción de corrosión (día 1100), respectivamente.. En el Apéndice A se presentan los potenciales de corrosión medidos en los extremos de las traves.

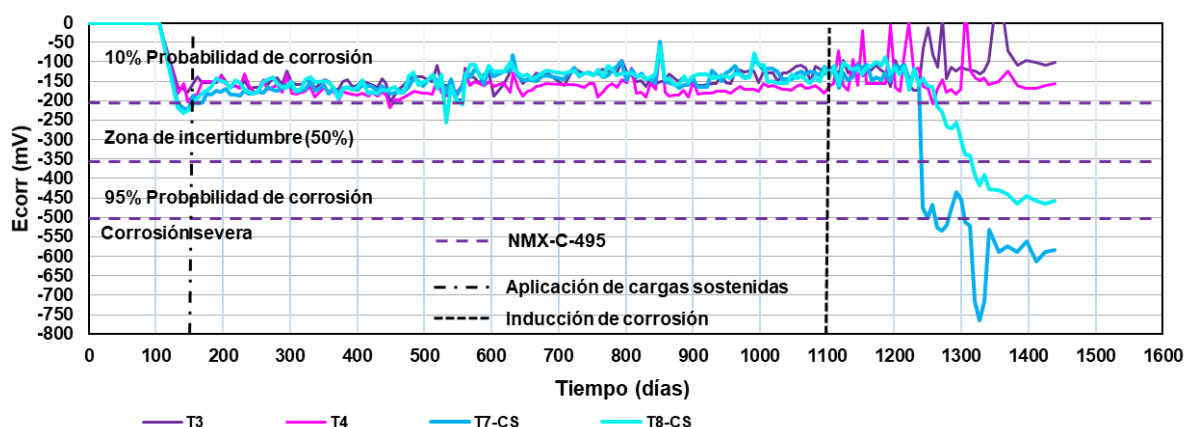


Figura 5.2 Potencial de corrosión - Tiempo al centro del claro para traves con AR de 10 mm de diámetro.

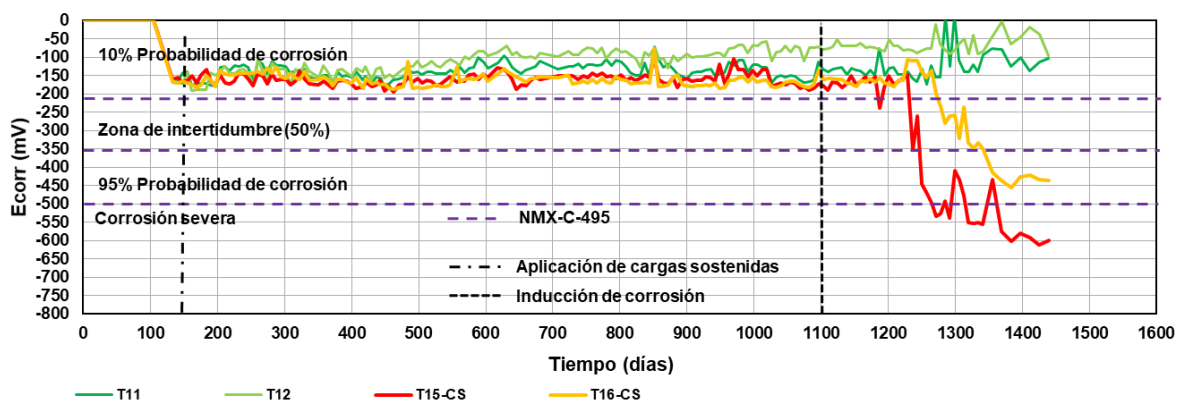


Figura 5.3 Potencial de corrosión - Tiempo al centro del claro para traveses con AR de 13 mm de diámetro.

En la Figura 5.4 y Figura 5.5 se presentan las gráficas de velocidad de corrosión (i_{corr}) – Tiempo medido al centro del claro de las traveses con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Las traveses de referencia se representan con la nomenclatura T3, T4, T11 y T12 y las traveses contaminadas con cloruros con T7, T8, T15 y T16. Se presentan las velocidades de corrosión obtenidas, calculadas como el promedio de las dos caras laterales de cada travesa. Las líneas moradas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016. Las líneas negras punteadas verticales corresponden al preagrietamiento de las traveses (día 150) y el inicio de inducción de corrosión (día 1100), respectivamente. En el Apéndice A se presentan las velocidades de corrosión medidos en los extremos de las traveses.

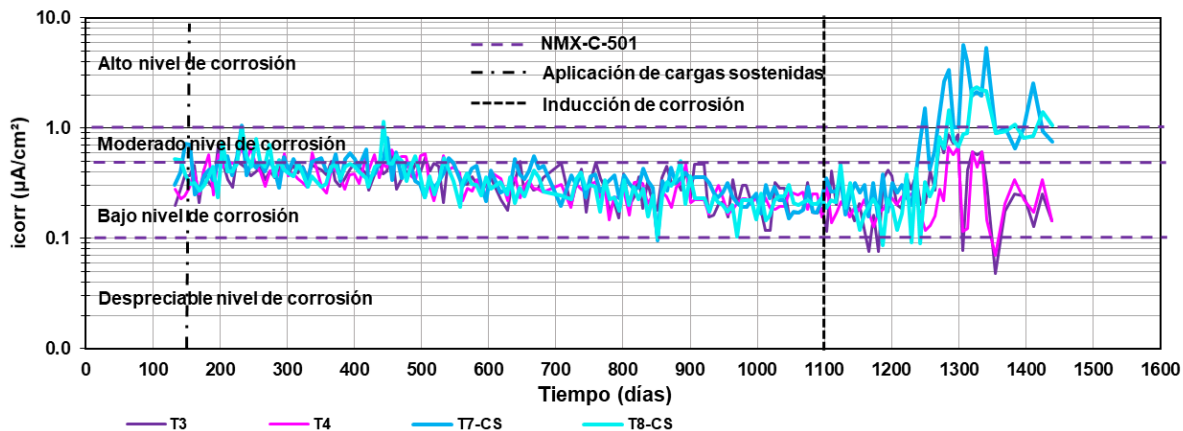


Figura 5.4 Velocidad de corrosión - Tiempo al centro del claro para traveses con AR de 10 mm de diámetro.

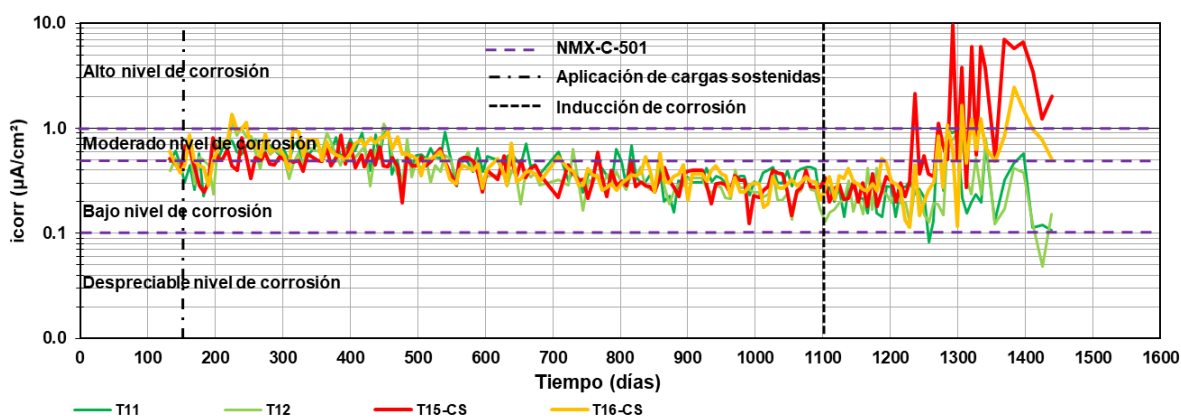


Figura 5.5 Velocidad de corrosión - Tiempo al centro del claro para traveses con AR de 13 mm de diámetro.

En la Figura 5.6 y Figura 5.7 se presentan las gráficas de resistividad eléctrica del concreto – Tiempo medido al centro del claro de las traveses con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Las traveses de referencia se representan con la nomenclatura T3, T4, T11 y T12 y las traveses contaminadas con cloruros con T7, T8, T15 y T16. Se presentan las resistividades obtenidas, calculadas como el promedio de las dos caras laterales de cada traves. Las líneas moradas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016. Las líneas negras punteadas verticales corresponden al preagrietamiento de las traveses (día 150) y el

inicio de inducción de corrosión (día 1100), respectivamente. En el Apéndice A se presentan resistividades eléctricas del concreto medidos en los extremos de las traves.

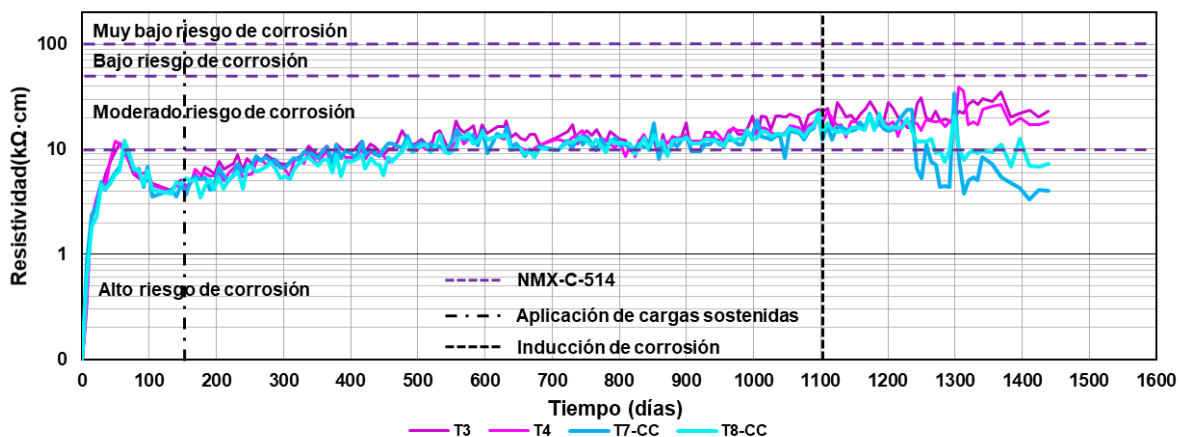


Figura 5.6 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al centro del claro para traves con AR de 10 mm de diámetro.

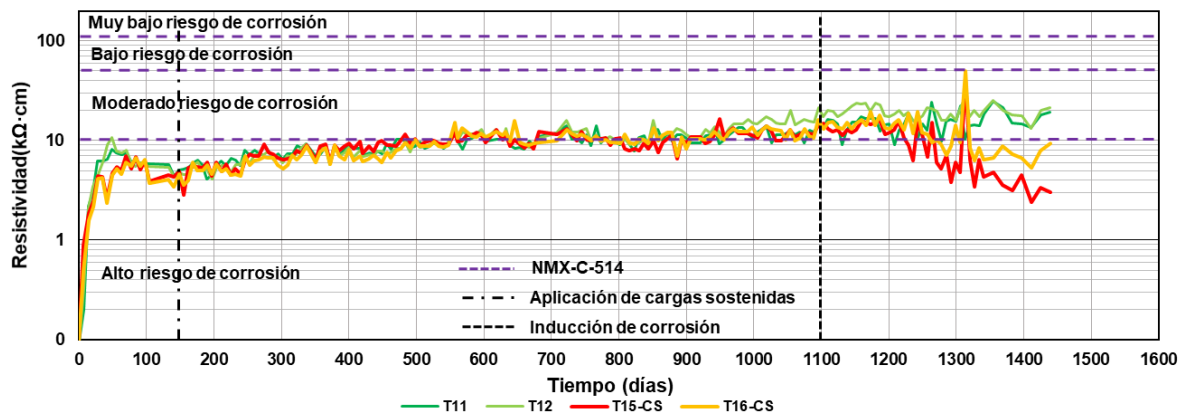
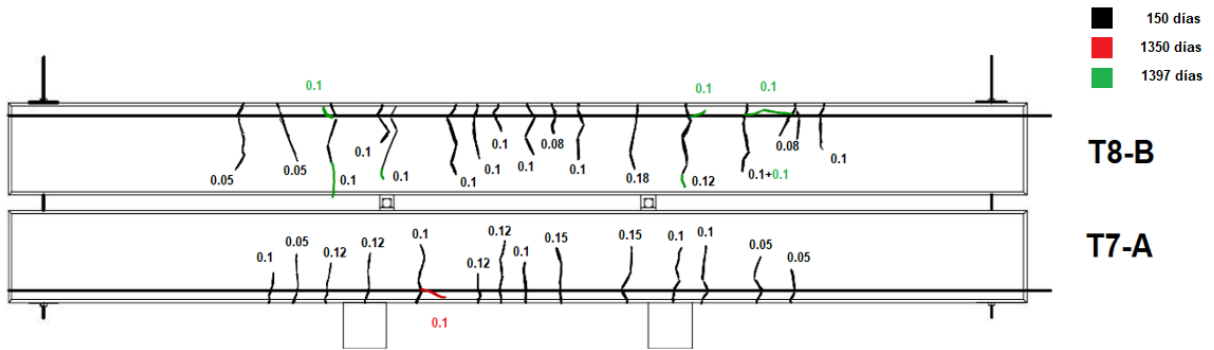


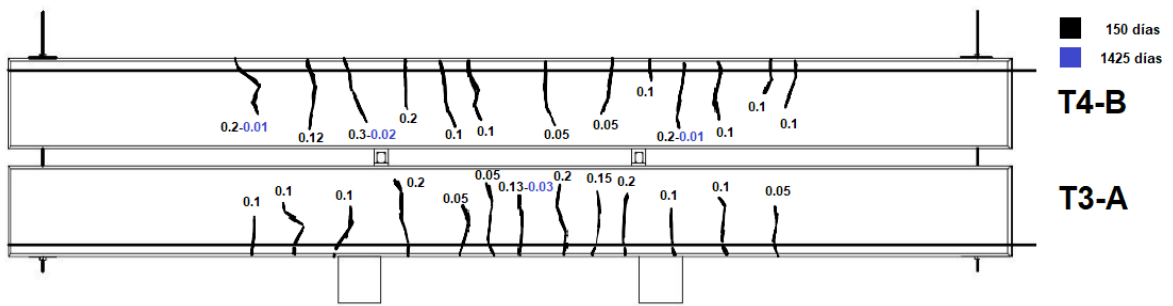
Figura 5.7 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al centro del claro para traves con AR de 13 mm de diámetro.

5.3 Evolución de agrietamientos en traves de CR con corrosión

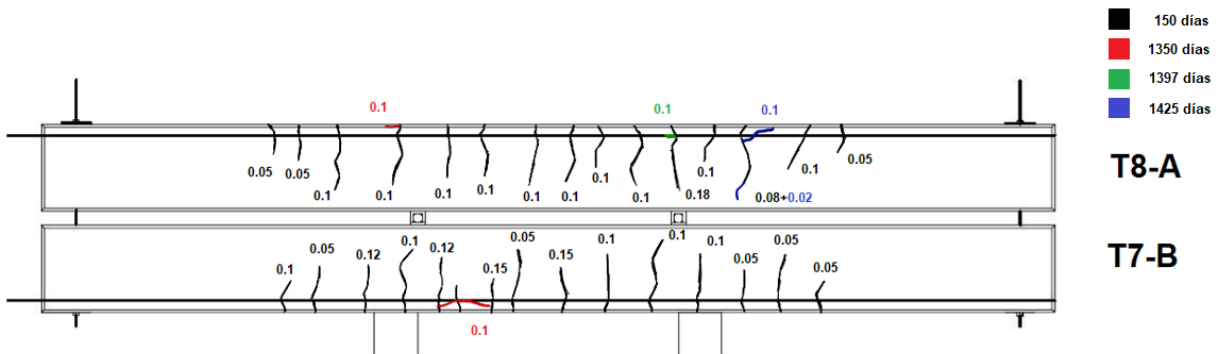
En la Figura 5.8 y Figura 5.9 se presentan la evolución de agrietamiento de traves con AR de 10mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Se presentan los levantamientos tomados en las caras frontales y posteriores de las traves. Dichos levantamientos se realizaron al observar nuevos agrietamientos. Los datos reportados corresponden a los 150, 1350, 1397 y 1425 días respecto de la fabricación de las traves.



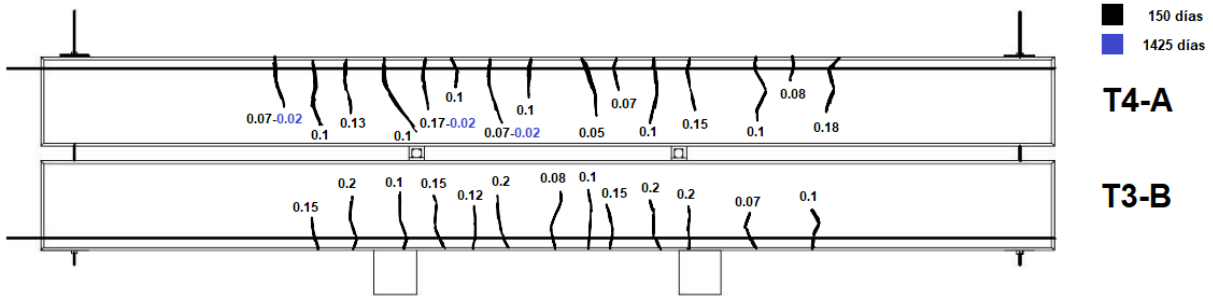
a.1)



a.2)

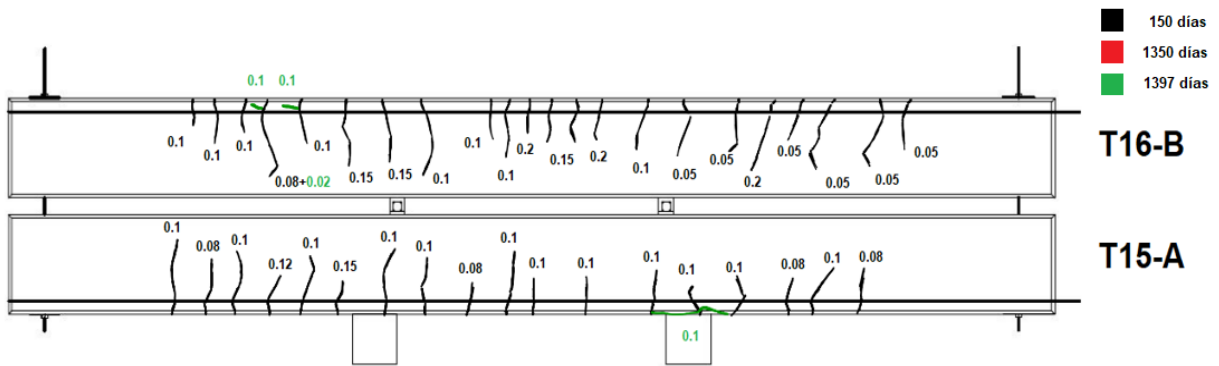


b.1)

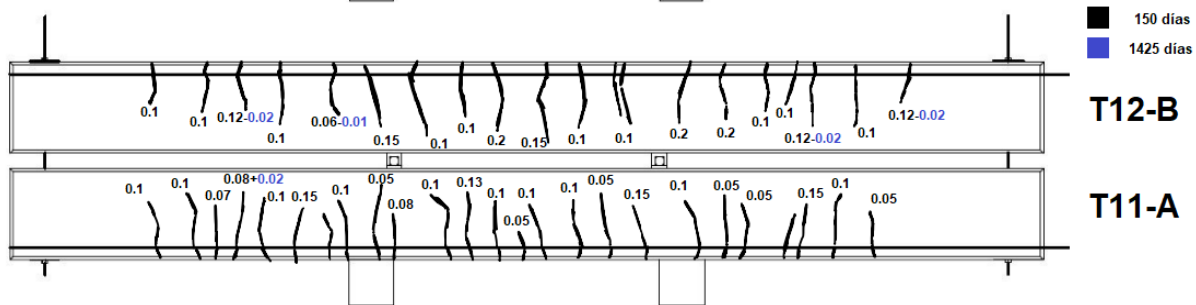


b.2)

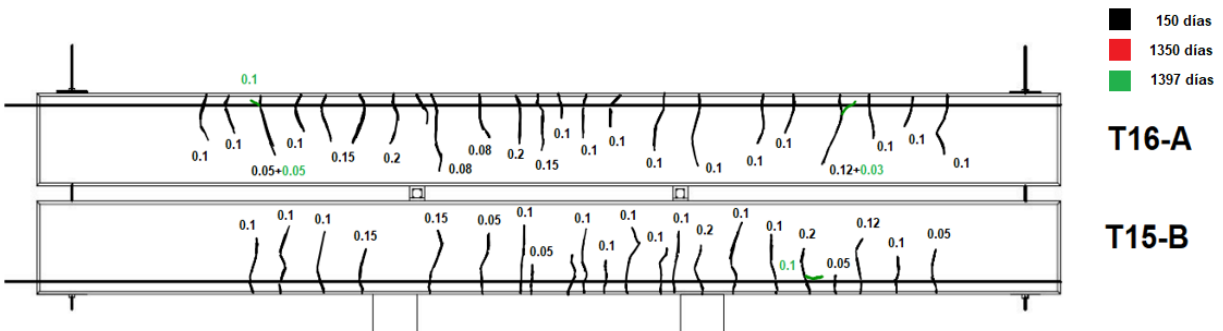
Figura 5.8 Evolución de agrietamientos en traves de CR con AR de 10 mm de diámetro a) Cara frontal , b) Cara posterior.



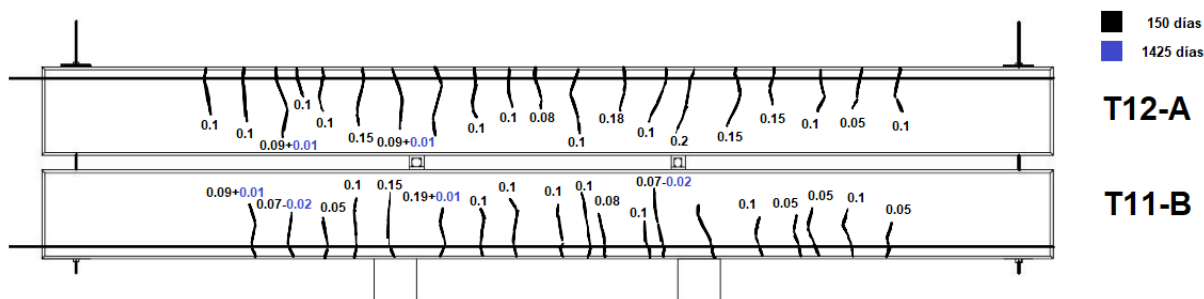
a.1)



a.2)



b.1)



b.2)

Figura 5.9 Evolución de agrietamientos en travesaños de CR con AR de 13 mm de diámetro a) Cara frontal , b) Cara posterior.

En las Tabla 5-1, Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se presentan los volúmenes de agrietamiento promedio, potencial de corrosión promedio y velocidad de corrosión promedio medidos a los 150 y 1425 días en travesaños con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro. Para los 150 días el volumen de agrietamiento en los extremos derechos Vg1 para travesaños con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 0.77 y 1.37 mm³, respectivamente. El volumen de agrietamiento Vg2 fue de 79.77 y 131.22 mm³. El volumen de agrietamiento en los centros Vg1 para travesaños con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 1.72 y 1.85 mm³, respectivamente. El volumen de agrietamiento Vg2 fue de 152.39 y 188.70 mm³. El volumen de agrietamiento en los extremos izquierdos Vg1 para travesaños con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 0.64 y 1.13 mm³, respectivamente. El volumen de agrietamiento Vg2 fue de 56.45 y 112.94 mm³.

Para los 1425 días el volumen de agrietamiento en los extremos derechos Vg1 para travesaños con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 0.87 y 1.46 mm³, respectivamente. El volumen de agrietamiento Vg2 fue de 86.60 y 133.86 mm³. El volumen de agrietamiento en los centros Vg1 para travesaños con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 1.79 y 1.88 mm³, respectivamente. El volumen de agrietamiento Vg2 fue de 156.53 y 189.90 mm³. El volumen de agrietamiento en los extremos izquierdos Vg1 para travesaños con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro fue de 0.74 y 1.23 mm³, respectivamente. El volumen de agrietamiento Vg2 fue de 64.47 y 120.04 mm³.

Tabla 5-1 Volúmenes de agrietamiento promedio y parámetros electroquímicos medidos en extremos izquierdos de traveses de CR.

150 días	ϕ	Izquierda				
		Vg1	Vg2	icorr	Ecorr	
10 mm	T3	0.65	45.65	0.16	-116.75	
	T4	0.98	86.20	0.10	-83.80	
	T7	0.54	42.38	0.14	-26.95	
	T8	0.63	47.05	0.15	-61.55	
	T11	0.94	73.16	0.11	-40.90	
	T12	1.37	105.19	0.26	-51.95	
	T15	1.57	125.47	0.14	-50.75	
	T16	1.30	95.27	0.20	-112.65	
1425 días	Izquierda					
		Vg1	Vg2	icorr	Ecorr	
	10 mm	T3	0.65	45.65	0.23	3.20
		T4	0.95	83.41	0.17	50.85
		T7	0.54	42.38	1.24	-463.05
		T8	1.00	66.68	1.94	-411.50
	13 mm	T11	0.96	75.07	0.06	-14.20
		T12	1.30	102.53	0.04	2.30
		T15	1.67	135.77	1.17	-556.00
		T16	1.45	112.90	0.90	-350.30

Tabla 5-2 Volúmenes de agrietamiento promedio y parámetros electroquímicos medidos en centros de traveses de CR.

150 días	ϕ	Centro				
		Vg1	Vg2	icorr	Ecorr	
10 mm	T3	2.09	192.00	0.30	-122.40	
	T4	1.41	112.26	0.32	-161.75	
	T7	1.80	168.04	0.31	-137.35	
	T8	1.54	137.36	0.35	-134.85	
13 mm	T11	1.74	146.09	0.40	-126.15	
	T12	1.95	171.30	0.64	-92.85	
	T15	1.43	115.50	0.37	-149.75	
	T16	2.26	160.41	0.39	-172.00	

1425 días	ϕ	Centro				
			Vg1	Vg2	icorr	Ecorr
10 mm	10 mm	T3	2.06	189.12	0.25	-108.85
		T4	1.37	108.82	0.34	-161.65
		T7	2.00	183.34	0.93	-587.60
		T8	1.64	138.61	1.39	-465.15
13 mm	13 mm	T11	1.72	144.50	0.12	-112.55
		T12	1.96	172.20	0.05	-96.15
		T15	1.53	120.30	1.22	-598.95
		T16	2.26	160.41	0.78	-434.45

Tabla 5-3 Volúmenes de agrietamiento promedio y parámetros electroquímicos medidos en extremos derechos de traveses de CR.

150 días	ϕ	Derecha				
			Vg1	Vg2	icorr	Ecorr
10 mm	10 mm	T3	0.62	51.22	0.27	-54.70
		T4	0.90	73.67	0.16	-36.65
		T7	0.57	48.82	0.17	-38.95
		T8	0.70	58.82	0.14	-51.65
13 mm	13 mm	T11	1.29	94.25	0.41	-69.05
		T12	1.33	104.32	0.42	-69.00
		T15	0.91	53.01	0.43	-68.30
		T16	1.30	108.68	0.29	-71.70

1425 días	ϕ	Derecha				
			Vg1	Vg2	icorr	Ecorr
10 mm	10 mm	T3	0.62	51.22	0.12	10.65
		T4	0.87	71.09	0.13	38.50
		T7	0.57	48.82	0.98	-412.45
		T8	1.00	72.77	0.84	-359.50
13 mm	13 mm	T11	1.29	94.17	0.09	37.55
		T12	1.30	102.53	0.08	19.65
		T15	1.01	57.46	0.18	-455.70
		T16	1.45	112.90	0.23	-465.35

CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados en términos del control de cargas sostenidas, los parámetros de corrosión y la evolución de agrietamientos en las trabes estudiadas.

6.1 Monitoreo y control de cargas sostenidas en trabes de CR

En la Figura 5.1 se observó una pérdida de carga del 25 y 45% en un periodo de 470 días para las trabes con AR a tensión de 10 y 13mm, respectivamente. Posteriormente para un periodo de 63 días se observó una pérdida del 5 y 7% para trabes con AR a tensión de 10 y 13 mm, respectivamente. Por último para un periodo de 112 días se observó una pérdida del 3 y 4% para trabes con AR a tensión de 10 y 13 mm, respectivamente. Dichas pérdidas de cargas pueden estar asociadas a la relajación de las barras roscadas utilizadas para la aplicación de las cargas sostenidas, a la pérdida de diámetro del AR longitudinal, la pérdida de adherencia entre el AR y el concreto, entre otras. Para trabes con corrosión se observó que; al momento de rectificar las cargas sostenidas estas presentaban aparentemente menores pérdidas, esto se debió a que se formaban productos de óxido en los elementos de sujeción (placas y tuercas) lo que impedía la correcta rectificación. Una vez limpiado los productos de óxido se determinó que la pérdida de carga sostenida en trabes con corrosión fue similar a trabes sin corrosión. Se observó que las pérdidas de carga sostenida se mantuvieron por debajo del 10% para tiempos menores a 112 días. Por lo tanto se recomienda continuar con los controles de cargas cada 100 días.

6.2 Parametros electroquímicos en trabes de CR.

En la Figura 6.1 se presentan los promedios de potenciales de corrosión – Tiempo medidos al centro del claro de las trabes para trabes con y sin corrosión. El proceso de corrosión acelerada se comenzó al día 1100. Se observó que a partir del pre-agrietamiento de las trabes CR (día 150) y hasta el comienzo del proceso de corrosión acelerada (día 1100) la probabilidad de corrosión fue del 10% (-125 mV) NMX-C-495-

ONNCCE-2015 (2016). A partir del día 1230 se observó en las trabes bajo corrosión acelerada un incremento en el potencial de corrosión (-225 mV). Este desfase de 130 días está relacionado al proceso requerido para despasivar al AR. Esto está asociado al incremento de la humedad en las zonas agrietadas, facilitando la intrusión de cloruros hacia la capa pasiva que protege al AR, la cual es destruida de manera paulatina hasta dejar al AR desprotegido permitiendo que inicie el proceso de corrosión. Para el caso de las trabes de referencia se observó que la probabilidad de corrosión fue disminuyendo (-115 mV). Esto se debe a que las trabes no están siendo afectadas por algún agente agresivo, lo cual tiende a recuperar la capa pasiva en el AR. Para el final del periodo de investigación (día 1450) la probabilidad de corrosión en trabes bajo corrosión acelerada se incrementó al 95% (-525 mV). Por otro lado las trabes de referencia permanecieron con una probabilidad de corrosión del 10% (-105 mV). Para trabes bajo corrosión acelerada no se observaron diferencias entre las probabilidades de corrosión medidas en AR de 10 y 13 mm de diámetro. Esto puede estar asociado al proceso de inducción de corrosión, el cual fue aplicado de manera uniforme en todas las trabes, lo cual implica que debe existir una cantidad similar de humedad sobre la superficie del concreto provocando lecturas similares en el potencial de corrosión. Se observó que para trabes de referencia con AR de 13 mm de diámetro la probabilidad de corrosión fue mayor. Esto está asociado a que en trabes con AR de 13mm existe un mayor volumen inicial de grietas. Dicha diferencia entre volumen de grietas está asociado a la cantidad de AR longitudinal a tensión en las trabes, ya que si se aumenta dicha cantidad de AR y se mantiene un mismo nivel de carga sostenida (60% del esfuerzo de fluencia del AR), se producirá una mayor fuerza de tensión en el AR la cual debe equilibrarse con la resultante de la distribución de esfuerzos a compresión, esto implica que el eje neutro de la sección tienda a subir, lo que generaría que las fibras de concreto inferiores a dicho eje tiendan a alcanzar mas rápido al esfuerzo de tensión necesario para producir el agrietamiento en la sección de la trabe.

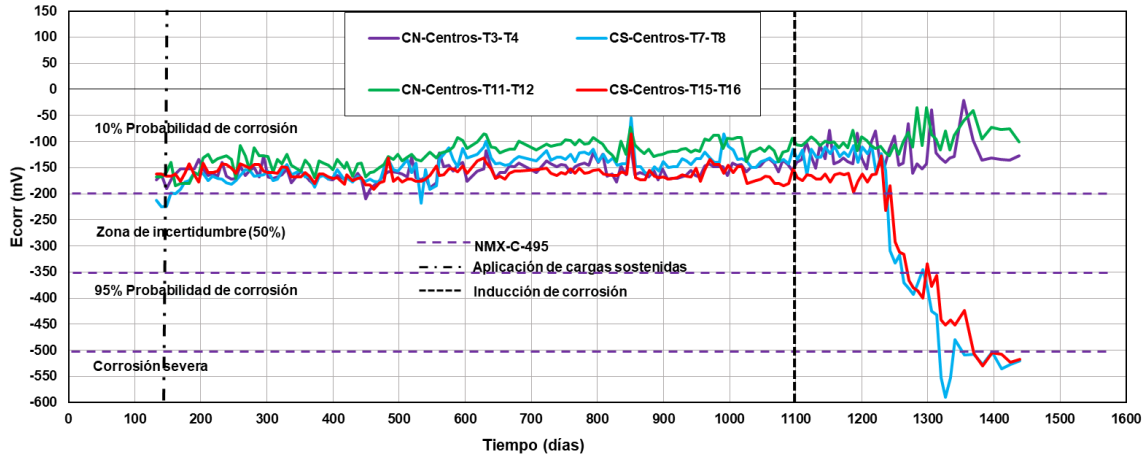


Figura 6.1 Promedios de potenciales de corrosión en centros de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En la Figura 6.2 se observa un comportamiento similar para los promedios de potenciales de corrosión medidos en los extremos. En general se observó que la mayor probabilidad de corrosión se encuentra en los centros de los claros de las traves. Esto está asociado a que en los centros de los claros de las traves se encuentra el mayor volumen de grietas, las cuales facilitan la intrusión de agentes externos. Por lo que la presencia de estas tiene el efecto de incrementar la probabilidad de corrosión en traves de CR.

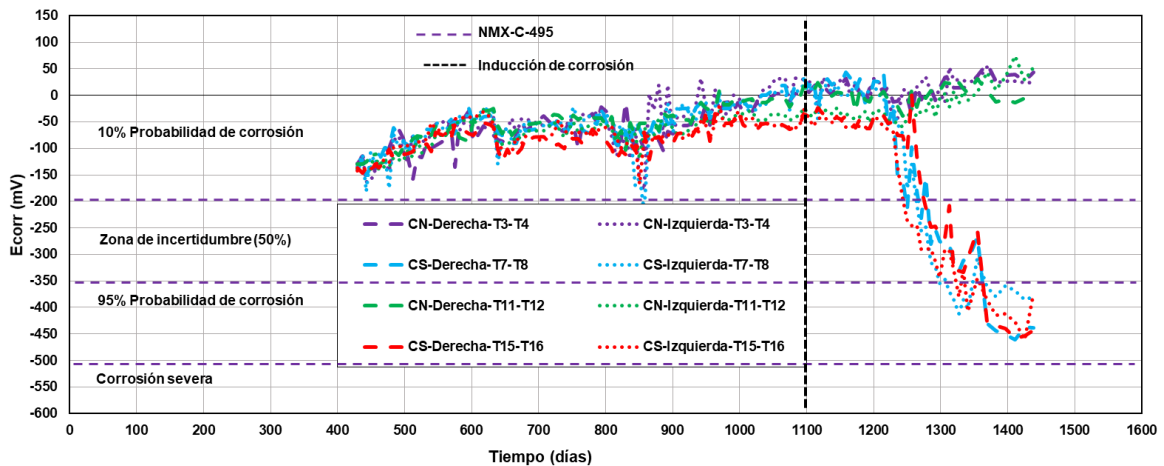


Figura 6.2 Promedios de potenciales de corrosión en extremos de traves de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En la Figura 6.3 se presentan los promedios de velocidades de corrosión – Tiempo medidos al centro del claro de las traves para traves con y sin corrosión. El proceso de corrosión acelerada se comenzó al día 1100. Inicialmente se observó que desde el pre agrietamiento de las traves CR (día 150) y hasta el día 250, la velocidad de corrosión aumento hasta un nivel alto de corrosión ($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) NMX-C-ONNCCE-2014 (2015). Esto está asociado a que la aparición de grietas favorece la despasivación del AR al permitir la interacción con el medio ambiente. Posteriormente se observó que hasta antes del comienzo del proceso de corrosión acelerada (día 1100) la velocidad de corrosión se redujo hasta un nivel bajo ($0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Esto indica que a falta de interacción de algún agente agresivo, el AR tiende a recuperar su capa pasiva reduciendo su riesgo a corroerse. Nuevamente se observó el desfase de 130 días asociado al proceso de despasivación del AR. A partir del día 1230 se observó en las traves bajo corrosión acelerada el incremento en la velocidad de corrosión hasta un nivel alto ($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). El incremento en el nivel de corrosión de las traves puede estar asociado a la intrusión de cloruros en la interface del concreto y en los agrietamientos, lo cual favorece la corrosión del AR. Para el caso de las traves de referencia se observó que la velocidad de corrosión continuó disminuyendo ($0.18 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Esto se debe a que las traves no están siendo afectadas por algún agente agresivo, lo cual sigue favoreciendo a la recuperación de la capa pasiva del AR. Para el final del periodo de investigación (día 1450) para traves bajo corrosión acelerada la velocidad de corrosión se mantuvo en un nivel alto de corrosión ($1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Por otro lado para las traves de referencia permanecieron con una velocidad de corrosión baja ($0.15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

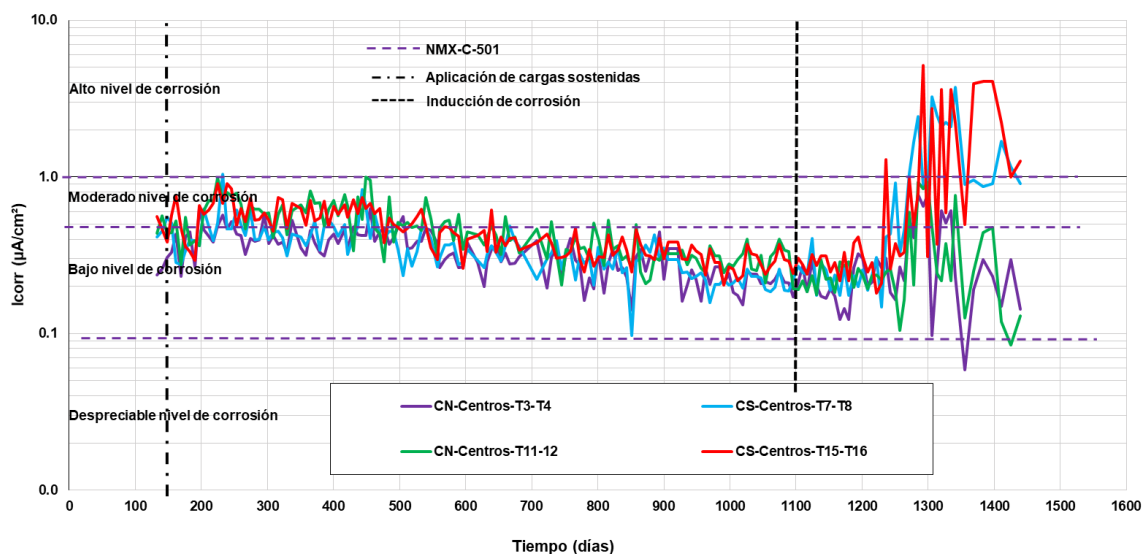


Figura 6.3 Promedios de velocidades de corrosión en centros de travesaños de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En la Figura 6.4 se observa un comportamiento similar para los promedios de velocidades de corrosión medidos en los extremos. En general no se observó diferencia entre los niveles de corrosión reportados con diferentes diámetros de AR longitudinal a tensión, ni entre los centros y extremos. En travesaños bajo corrosión acelerada esto se debe al proceso de inducción de corrosión el cual se aplica de manera uniforme en todas las travesaños estudiadas, lo cual indica que debe existir una concentración de cloruros similar en las travesaños lo cual no permite determinar con exactitud el nivel de corrosión en el AR. En travesaños de referencia esto se debe a que no existe un proceso de inducción de corrosión.

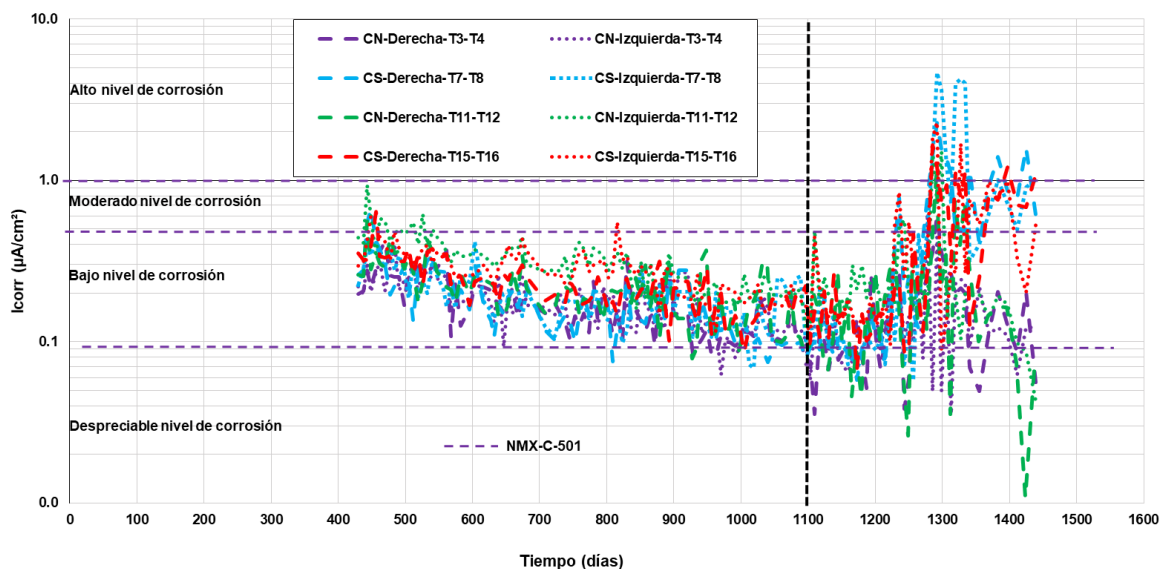


Figura 6.4 Promedios de velocidades de corrosión en extremos de travesaños de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En la Figura 6.5 se presentan los acumulados de velocidad de corrosión ($I_{corr} \cdot \text{días}$) – Tiempo (días) medidos al centro y extremos de las travesaños con y sin corrosión. El acumulado se calculó como el área bajo la curva del promedio de las velocidades medidas más el área bajo la curva anterior. A partir del día 1230 se observó en travesaños bajo corrosión acelerada un cambio en la pendiente de los acumulados. El cambio en dicha pendiente indica que el proceso de corrosión está activo. Posteriormente para los días 1270, 1340 y 1410 se observaron incrementos en la pendiente de acumulados de velocidad de corrosión. Dichos incrementos pueden estar asociados a la evolución de nuevos agrietamientos, los cuales facilitan el ingreso de los agentes agresivos al AR. Para el caso de las travesaños de referencia no se observó cambios significativos en la pendiente de los acumulados de velocidades de corrosión. Esto se debe a que dichas travesaños no están siendo afectadas por algún agente agresivo.

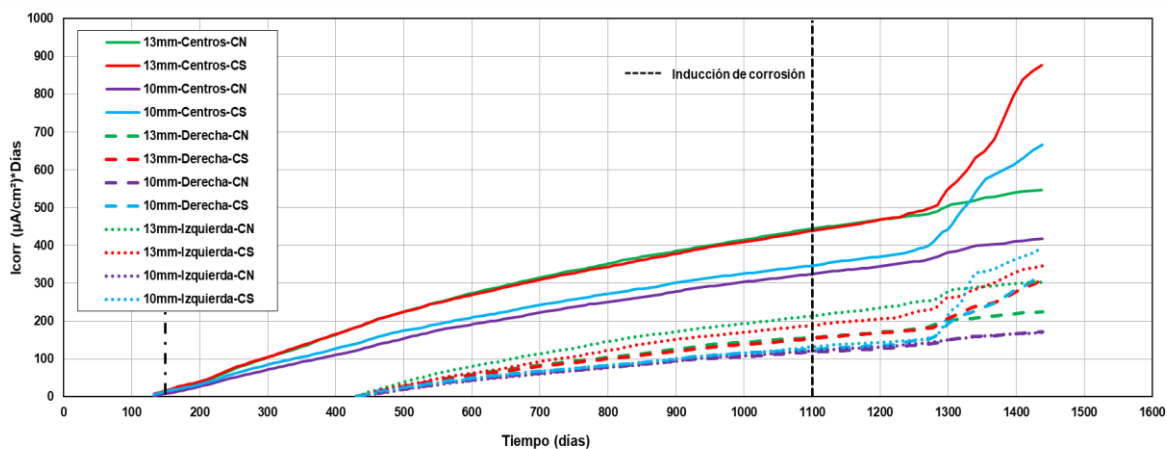


Figura 6.5 Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de travesaños de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En las Figura 6.5 y Figura 6.6 se observa que los mayores acumulados de velocidad de corrosión se presentaron en travesaños con AR de 13 mm de diámetro. Esto se debe a que las travesaños con AR de 13 mm tuvieron mayor cantidad de grietas iniciales, las cuales facilitan la intrusión de agentes agresivos y aceleran el proceso de corrosión. A su vez se puede observar que en todos los casos los mayores acumulados se presentaron en las mediciones a los centros de los claros de las travesaños. Nuevamente esto está asociado a que dichas zonas contienen el mayor volumen de grietas. Para el caso de las mediciones tomadas en los extremos, se observa que las mediciones de la izquierda fueron superiores. Esto puede estar asociado a que para realizar las mediciones se requiere conectar eléctricamente al AR a estudiar, para ello se dejó una sección de 15cm de acero expuesto en el extremo izquierdo, por lo tanto la presencia de esta barra expuesta tiende a incrementar las lecturas de velocidad de corrosión.

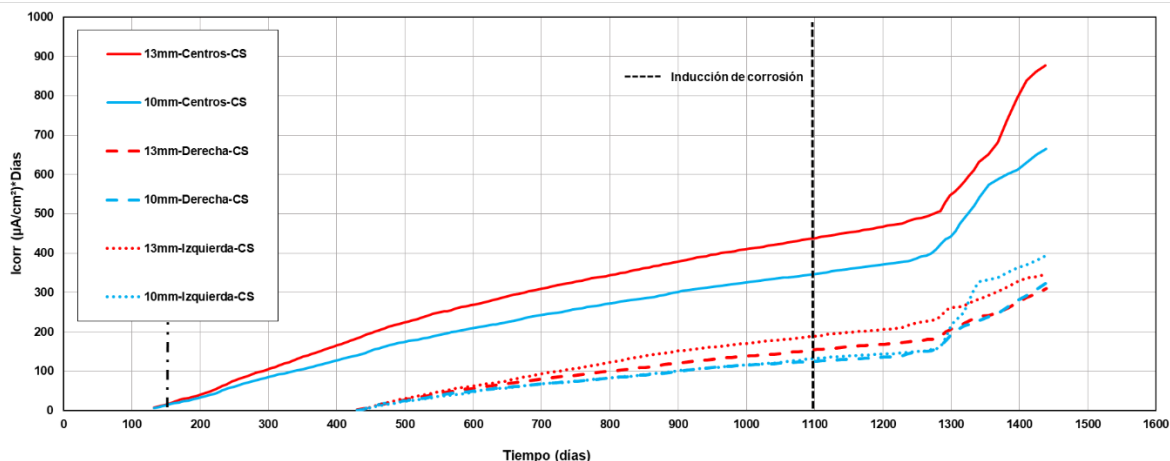


Figura 6.6 Acumulados de velocidades de corrosión en centros y extremos de traveses de CR bajo corrosión acelerada con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En la Figura 6.7 se presentan los acumulados de resistividad eléctrica del concreto – Tiempo (días) medidos al centro y extremos de las traveses con y sin corrosión. A partir del día 1230 se observó en traveses bajo corrosión acelerada un cambio en la pendiente de los acumulados. El cambio en dicha pendiente indica que el proceso de corrosión está activo. Posteriormente para los días 1270, 1340 y 1410 se observaron disminuciones en la pendiente de acumulados de resistividad eléctrica del concreto. Dichas disminuciones pueden estar asociadas a la evolución de nuevos agrietamientos los cuales facilitan el ingreso de los agentes externos al AR y aumentan su riesgo a corroerse. Para el caso de las traveses de referencia no observó cambios en la pendiente de los acumulados de resistividad eléctrica del concreto. Esto se debe a que dichas traveses no están siendo afectadas por algún agente agresivo.

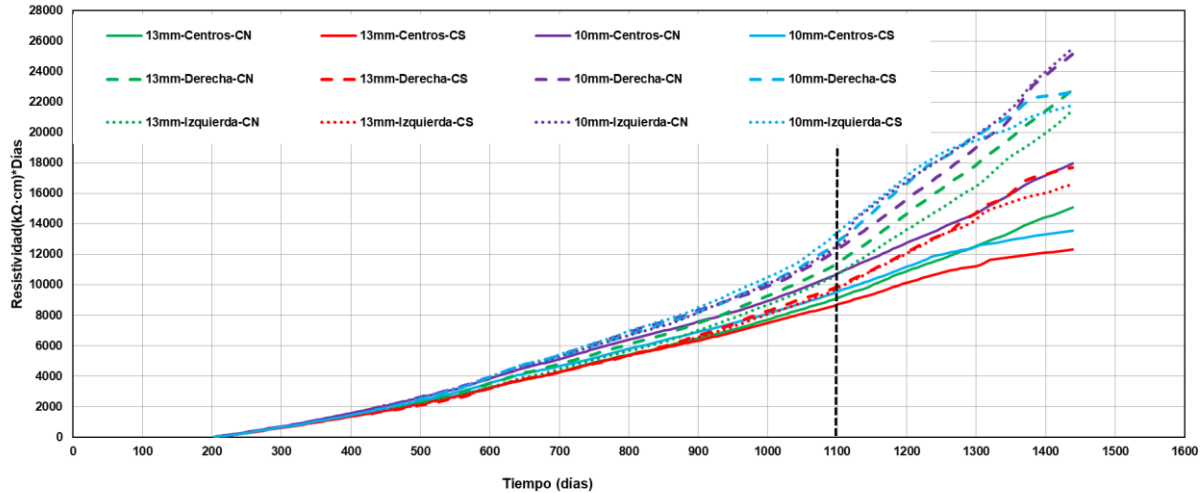


Figura 6.7 Acumulados de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de traveses de CR con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

En las Figura 6.7 y Figura 6.8 se observa que los menores acumulados de resistividad eléctrica del concreto se presentaron en traveses con AR de 13 mm de diámetro. Esto se debe a que las traveses con AR de 13 mm tuvieron mayor cantidad de grietas iniciales, lo cual facilitan la intrusión de agentes agresivos y aumentan el riesgo de corrosión. A su vez se puede observar que en todos los casos los menores acumulados se presentaron en las mediciones a los centros de los claros de las traveses. Nuevamente esto está asociado a que dichas zonas contienen el mayor volumen de grietas. Para el caso de las mediciones tomadas en los extremos, se observa que las mediciones de la izquierda fueron menores. Esto nuevamente puede estar asociado a que para realizar las mediciones se requiere conectar eléctricamente al AR a estudiar para ello se dejó una sección de 15cm de acero expuesto en el extremo izquierdo, por lo tanto la presencia de esta barra expuesta tiende a disminuir las lecturas de resistividad eléctrica del concreto.

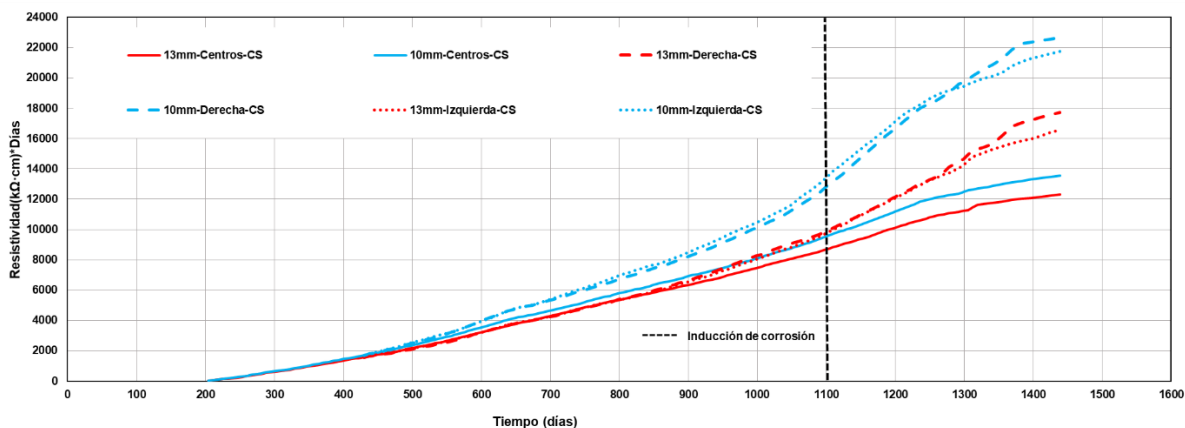


Figura 6.8 Acumulados de resistividad eléctrica del concreto en centros y extremos de travesaños de CR bajo corrosión acelerada con AR de 10 y 13 mm de diámetro.

6.3 Evolución de agrietamientos en travesaños de CR con corrosión

En la Figura 6.9 se observa que para travesaños con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro, la primera aparición de agrietamientos adicionales (día 1350) se dio únicamente en la zona de flexión pura, estas consistieron en grietas horizontales de 0.1 mm de ancho. Dichos agrietamientos coinciden con incrementos en la probabilidad de corrosión (-450 mV), en la velocidad de corrosión ($1.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), en la pendiente de los acumulados de velocidad de corrosión y disminuciones en la pendiente de acumulados de resistividad eléctrica del concreto. Por lo tanto se puede inferir que esto se puede deber al proceso de corrosión acelerada. Posteriormente se observaron nuevos agrietamientos (día 1397) en secciones dentro y fuera de la zona de flexión pura, estos consistieron en aparición de grietas horizontales de 0.1 mm de ancho e incrementos de anchos de grieta transversal de 0.2 mm. Por último, se observaron nuevas grietas horizontales de 0.1 mm de ancho e incrementos de anchos de grieta transversal de 0.28 mm (día 1425). Estos dos últimos coinciden con incrementos en la probabilidad de corrosión (-525 mV), en la velocidad de corrosión ($1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), en la pendiente de los acumulados de velocidad de corrosión y disminuciones en la pendiente de acumulados de resistividad eléctrica del concreto. Esto indica que para travesaños de CR conforme incrementa el tiempo de exposición ante un agente agresivo,

el mismo proceso de corrosión en el AR favorece la aparición de nuevos agrietamientos, acelerando aún más dicho proceso.

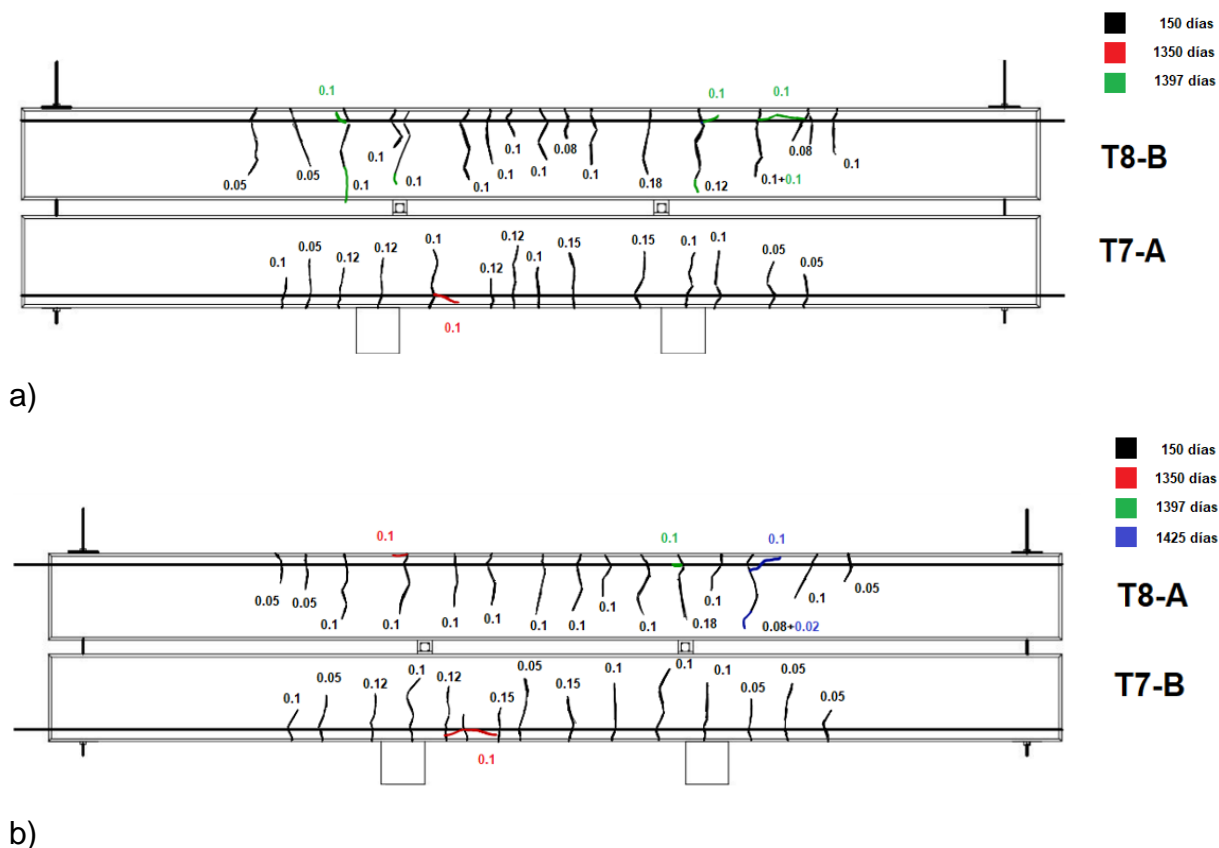


Figura 6.9 Evolución de agrietamientos en traves de CR con AR de 10 mm de diámetro a) Cara frontal , b) Cara posterior.

Para el caso de traves con AR longitudinal a tensión de 13 mm de diámetro (Figura 6.10), solo se tubo un único registro de agrietamientos (día 1397) fuera de la zona de flexión pura, estos consistieron en grietas longitudinales de 0.1 mm de ancho e incrementos de anchos de grieta transversales de hasta 0.15 mm. Nuevamente se apreciaron incrementos en la probabilidad de corrosión (-525 mV), en la velocidad de corrosión ($1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), en la pendiente en los acumulados de velocidad de corrosión y disminuciones en la pendiente de acumuladas de resistividad eléctrica del concreto. Por lo que se puede inferir que el proceso de corrosión fue más lento en traves de CR

con AR de mayor diámetro. Esto se puede deber a que en traves de menor diámetro se tuvieron mayores incrementos en cantidades de grietas horizontales y anchos de grieta transversales, por lo que para traves de CR el proceso de corrosión está directamente asociado al nivel de daño presente en la estructura.

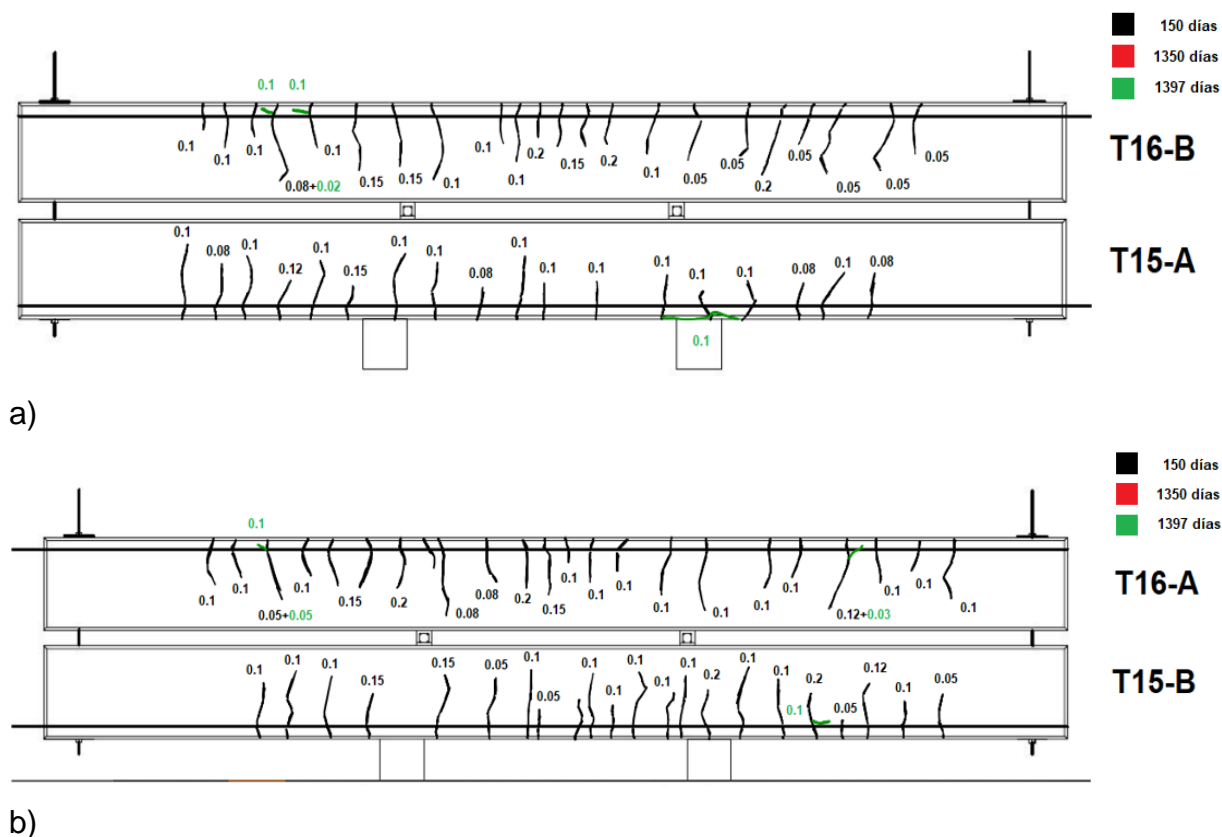


Figura 6.10 Evolución de agrietamientos en traves de CR con AR de 13 mm de diámetro a) Cara frontal , b) Cara posterior.

En general se observa que conforme aumentan las cantidades de grietas en traves de CR se acelera la evolución de los parámetros electroquímicos. El parámetro que está directamente asociado a la evolución del agrietamiento es el acumulado de velocidad de corrosión, ya que a medida que se presenta un cambio en la pendiente de acumulados se presentan nuevos agrietamientos. Con la información presentada se puede determinar que a menor diámetro de AR longitudinal a tensión, el proceso de evolución de grietas tiende a acelerarse. Esto se podría explicar con la teoría de

flexión, ya que si existe una reducción en la cantidad de AR (corrosión) y se mantiene el mismo nivel de carga sostenida en las traveses, esto provocaría que se alcance más rápido una mayor deformación unitaria en el AR, lo que implica una redistribución de esfuerzos en la sección transversal de la trabe generando incrementos en la longitud y ancho de grietas. Si se combina el comportamiento anterior con los esfuerzos cortantes, provocaría que se alcance más rápido un mayor nivel de deformación, lo que explicaría porque se tiende a agrietar más rápido en las secciones fuera de la zona de flexión pura. Para traveses con AR de 10 y 13 mm de diámetro, la aparición de grietas horizontales de 0.1 mm de ancho e incrementos de anchos de grieta transversal de hasta 0.28 mm estuvieron asociados a probabilidades de corrosión del 95% (-525 mV) y velocidades altas de corrosión ($1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Para traveses sin corrosión a pesar que se presentaron incrementos en los anchos de grietas (día 1425), los parámetros electroquímicos fueron disminuyendo. Esto puede estar asociado a la interacción de las traveses con el medio ambiente, ya que se puede dar el transporte de partículas en el aire que sellan de manera paulatina a las grietas permitiendo la recuperación de la capa pasiva del AR y con ello el proceso de corrosión se interrumpe.

En las Figura 6.11 y Figura 6.12 se presentan los promedios de potenciales de corrosión – Volumen de agrietamiento medidos al centro del claro de las traveses sin y con corrosión. Las traveses sin y con corrosión fueron representadas con marcadores circulares y triangulares, respectivamente. Se presentan dos tiempos de medición (150 y 1425 días) las cuales fueron representadas por marcadores sin y con relleno, respectivamente. En general se observa que para traveses sin corrosión no presentaron diferencias entre los volúmenes de agrietamiento iniciales y finales. Esto está asociado a que dichas traveses no están siendo afectadas por un proceso de corrosión. A su vez los potenciales de corrosión disminuyeron ligeramente. Nuevamente esto puede estar asociado a que dichas traveses no están siendo afectadas por algún agente agresivo, lo cual tiende a recuperar la capa pasiva en el AR, reduciendo su probabilidad

a corroerse. En traves bajo corrosión acelerada se observa que si solo se toma el efecto del volumen de agrietamiento Vg_1 , a medida que existe un incremento en la cantidad y anchos de grieta la probabilidad de corrosión aumenta. Esto puede estar asociado a que el incremento en el agrietamiento, favorece la intrusión de la humedad en la grieta y lo cual facilita la intrusión de agentes agresivos al AR. Se observa que los rangos de la probabilidad de corrosión fueron similar en traves con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm. Aparentemente el mayor volumen de agrietamiento se presentó en traves con AR de 13 mm de diámetro, pero en realidad este se presentó en traves con AR de 10 mm. Esto se puede apreciar al agregar el efecto de la longitud de grieta en Vg_2 . Lo cual indica que el incremento en los anchos, cantidad y longitud de los agrietamientos favorece el incremento en los parámetros electroquímicos hasta obtener resultados similares a las traves AR de 13 mm de diámetro, por lo tanto se puede inferir que el agrietamiento tiene un efecto importante en el proceso de corrosión.

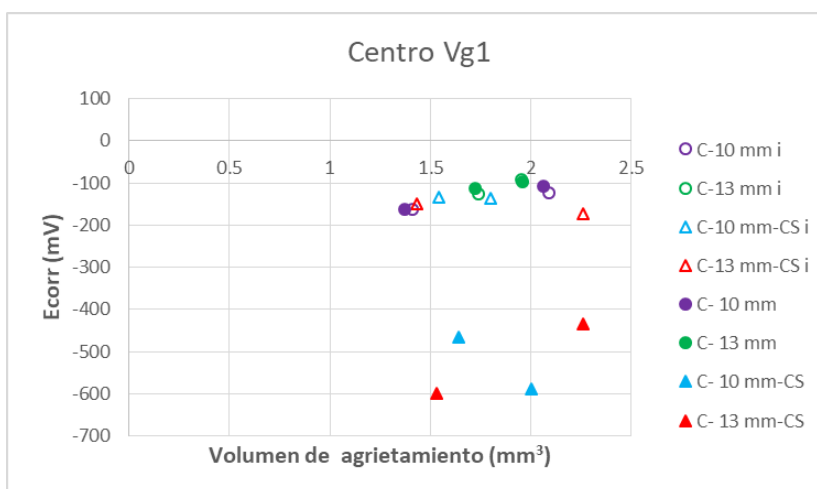


Figura 6.11 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg_1) en el potencial de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

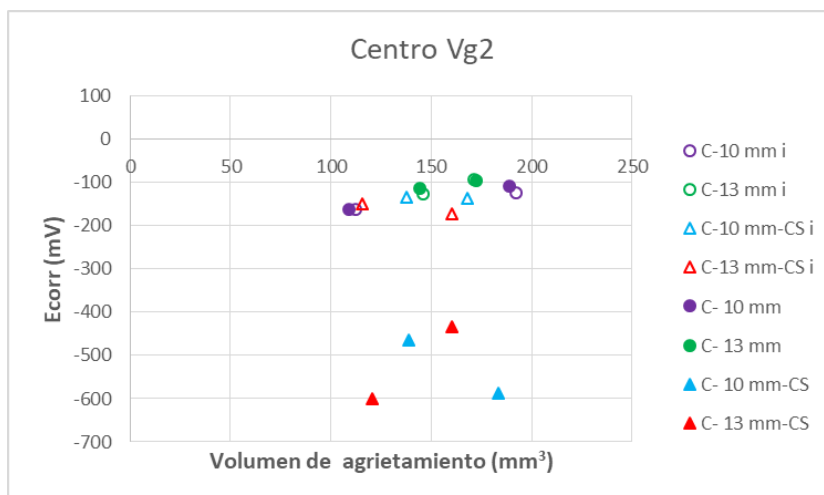


Figura 6.12 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

De la Figura 6.13 a la Figura 6.16 se observa un comportamiento similar para los promedios de potenciales de corrosión medidos en los extremos. En general se observó que la mayor probabilidad de corrosión se encuentra en los extremos izquierdos. Esto nuevamente puede estar asociado a la sección expuesta de AR utilizada para realizar las mediciones, la cual puede producir el medio necesario para acelerar el proceso de corrosión en el AR protegido por el concreto.

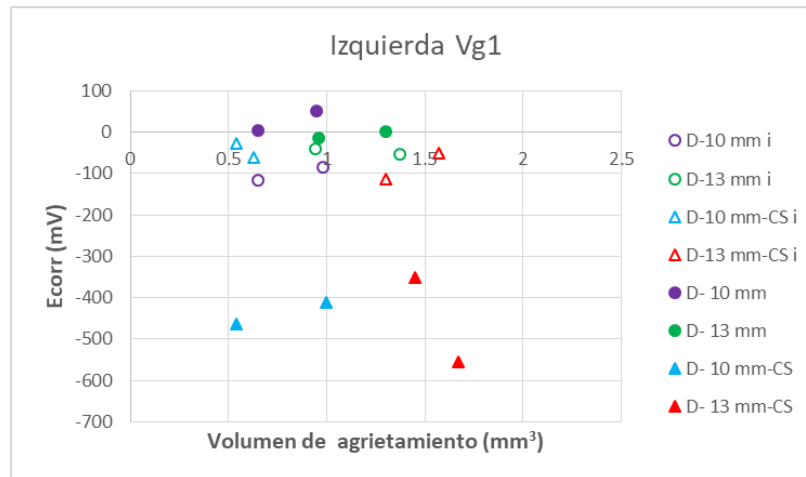


Figura 6.13 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en el potencial de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

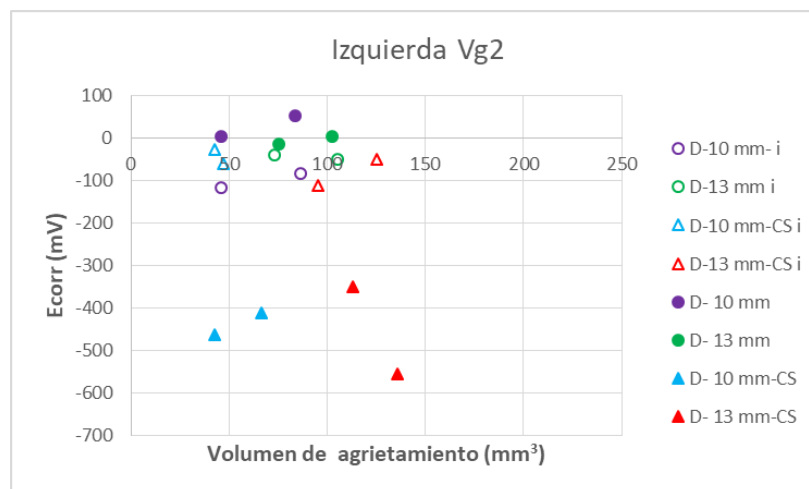


Figura 6.14 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

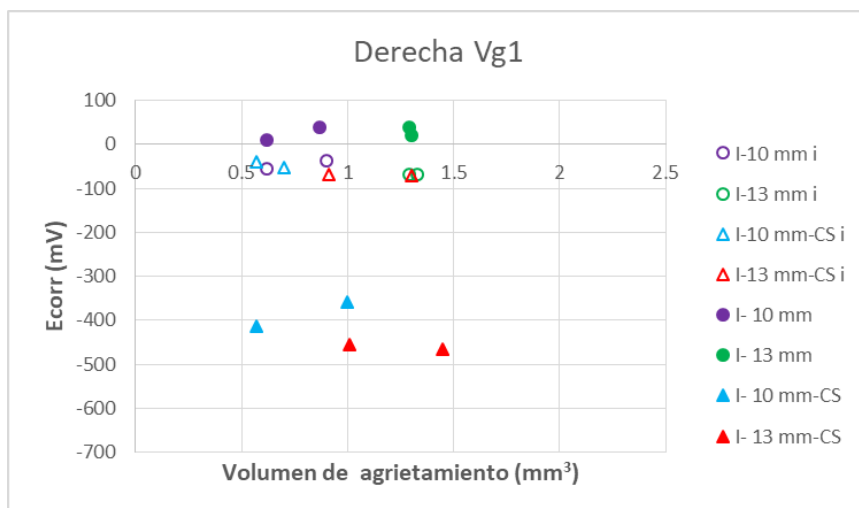


Figura 6.15 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en el potencial de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

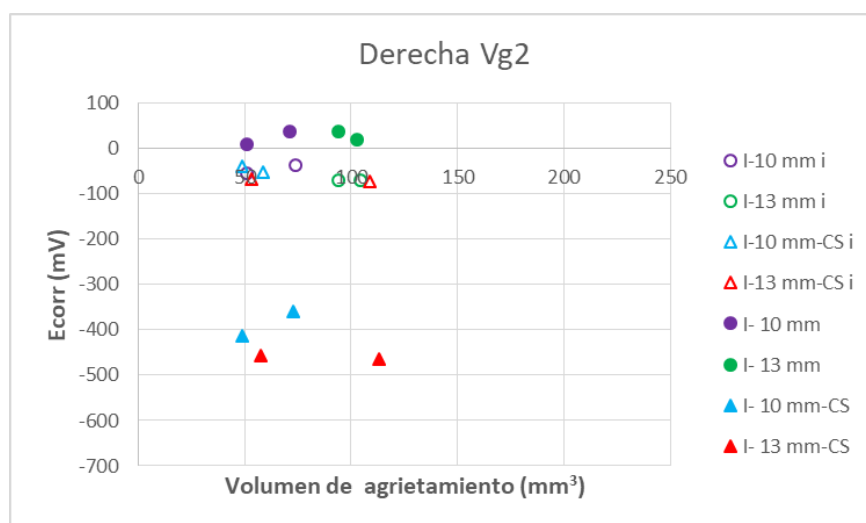


Figura 6.16 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en el potencial de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

En las Figura 6.17 y Figura 6.18 se presentan los promedios de velocidad de corrosión – Volumen de agrietamiento medidos al centro del claro de las traveses sin y con corrosión. Las traveses sin y con corrosión fueron representadas con marcadores circulares y triangulares, respectivamente. Se presentan dos tiempos de medición (150 y 1425 días) las cuales fueron representadas por marcadores sin y con relleno, respectivamente. En general se observa que para traveses sin corrosión no presentaron diferencias entre los volúmenes de agrietamiento iniciales y finales. Esto está

asociado a que dichas traves no están siendo afectadas por un proceso de corrosión. A su vez las velocidades de corrosión disminuyeron ligeramente. Lo cual reafirma que a falta de interacción de algún agente agresivo, el AR tiende a recuperar su capa pasiva reduciendo su riesgo a corroerse. En traves bajo corrosión acelerada se observa que si solo se toma el efecto del volumen de agrietamiento Vg_1 , a medida que existe un incremento en la cantidad y anchos de grieta la velocidad de corrosión aumenta. Esto nuevamente puede estar asociado a que el incremento en el agrietamiento, favorece la intrusión de la humedad en la grieta y lo cual facilita la intrusión de agentes agresivos al AR. Se observa que los la velocidad de corrosión fue mayor en traves con AR de 10 mm de diámetro. Esto nuevamente se puede apreciar al agregar el efecto de la longitud de grieta en Vg_2 . Lo cual indica que el incremento en los anchos, cantidad y longitud de los agrietamientos favorece el incremento en los parámetros electroquímicos hasta obtener resultados similares a las traves AR de 13 mm de diámetro, por lo tanto se puede inferir que el agrietamiento tiene un efecto importante en el proceso de corrosión.

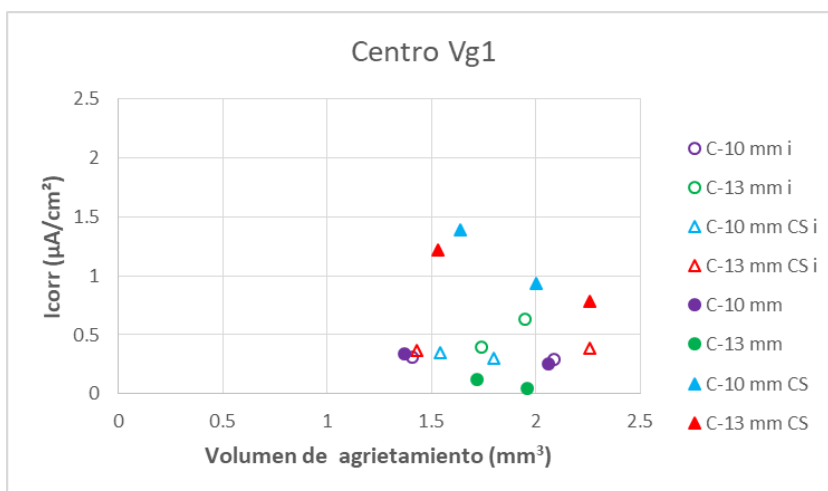


Figura 6.17 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg_1) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

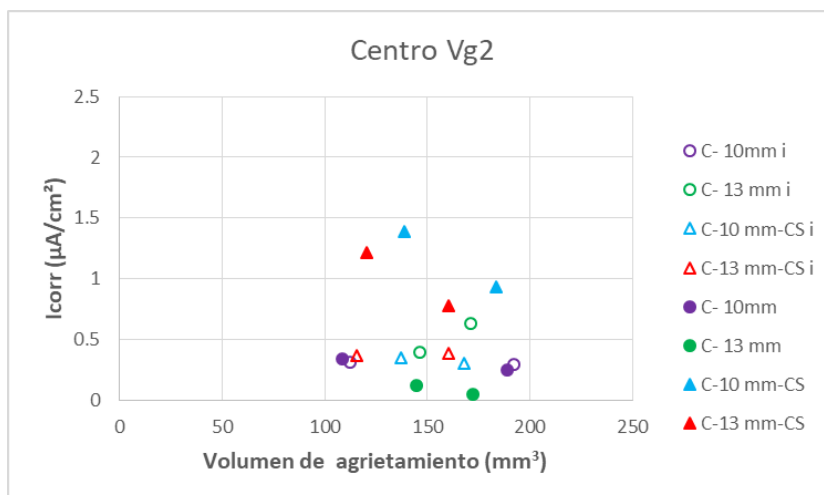


Figura 6.18 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en traves de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

De la Figura 6.19 a la Figura 6.22 se observa un comportamiento similar para los promedios de velocidad de corrosión medidos en los extremos. En general se observó que la mayor velocidad de corrosión se encuentra en los extremos izquierdos. Esto nuevamente puede estar asociado a la sección expuesta de AR utilizada para realizar las mediciones, la cual nuevamente puede producir el medio necesario para acelerar el proceso de corrosión en el AR protegido por el concreto. Por lo tanto en traves de CR el proceso de corrosión puede estar asociado al nivel de daño en la estructura, principalmente del agrietamiento y de las secciones expuestas de AR.

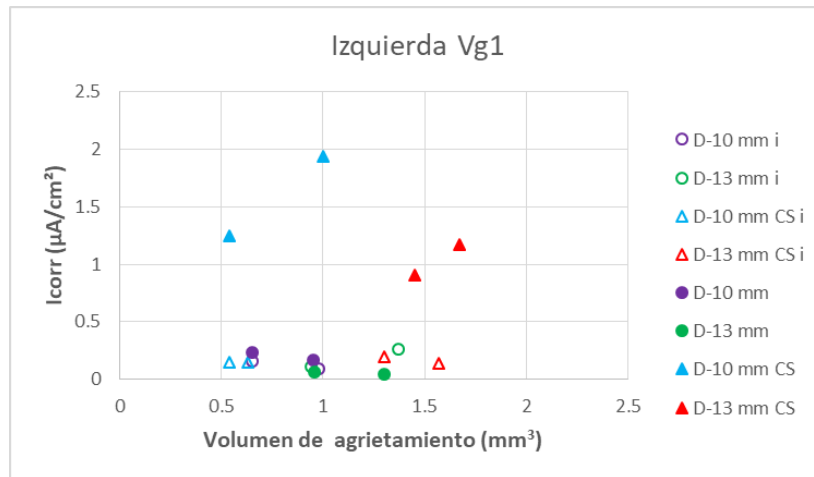


Figura 6.19 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en la velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

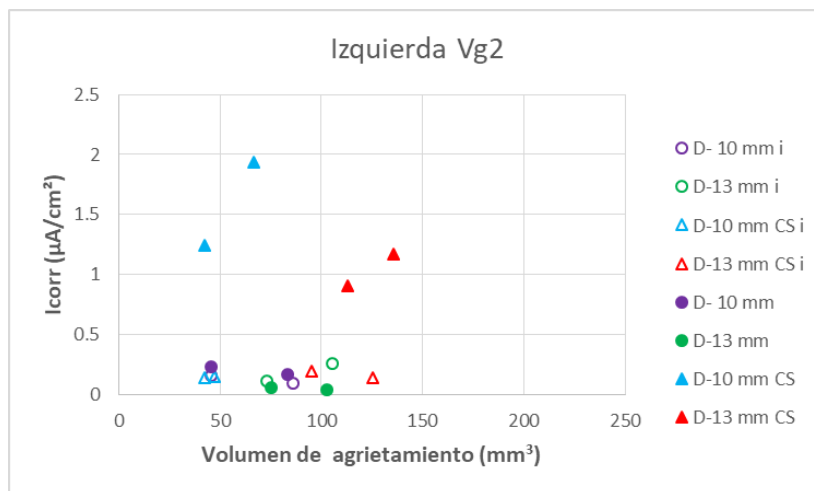


Figura 6.20 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

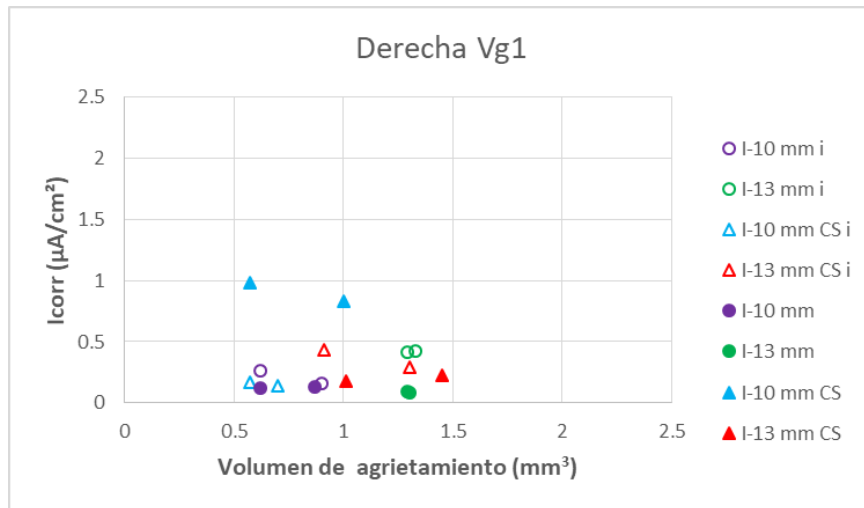


Figura 6.21 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg1) en la velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

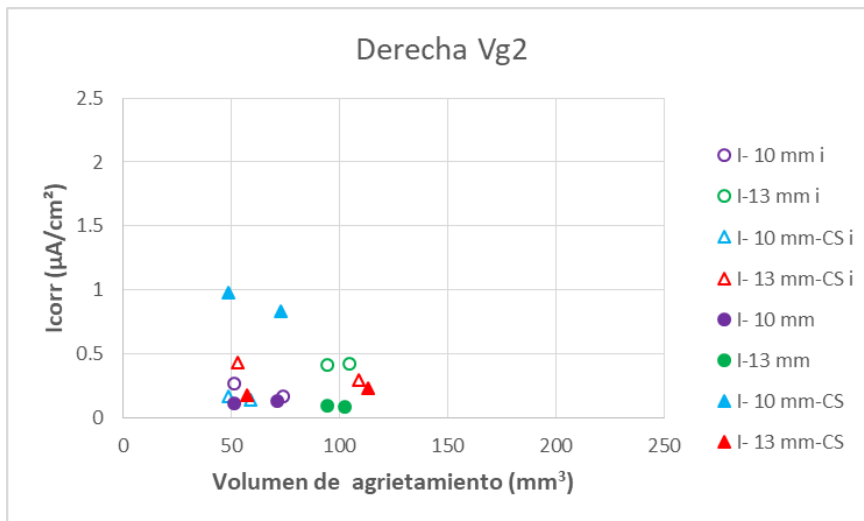


Figura 6.22 Efecto del volumen de agrietamiento (Vg2) en la velocidad de corrosión en traveses de CR con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm de diámetro.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

En esta investigación se evaluó la evolución de la corrosión en traveses de CR sometidas a cargas sostenidas. Se consideraron 4 traveses con AR longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y 4 con 13 mm de diámetro, respectivamente. Se seleccionaron cuatro traveses dos con AR longitudinal a tensión de 10 mm y 13 mm, respectivamente para ser sometidas a un proceso de corrosión acelerada. Todas las traveses fueron sometidas a cargas sostenidas que generaran el 60% del esfuerzo de fluencia en el AR. Se midieron parámetros electroquímicos y físicos asociados a 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 mayores acumulados de velocidad de corrosión se presentaron en traveses con AR de mayor diámetro. Esto se debe a que dichas traveses presentaron un mayor volumen inicial de grietas, por lo que su tiempo de exposición fue mayor. Por lo tanto el incremento en la cantidad de AR está asociado a la reducción de la durabilidad de la estructura.
- Los valores de resistividad eléctrica del concreto fueron menores para traveses con AR longitudinal a tensión de mayor diámetro. Esto se debe a que existe una mayor cantidad de grietas en traveses con AR longitudinal de mayor diámetro, lo que crea un conducto ideal para el transporte de agentes agresivos y por lo tanto mayor riesgo de corroerse.
- Del monitoreo de anchos y cantidades de grietas se observó que a menor diámetro de AR longitudinal a tensión, el proceso de evolución de grietas tiende a acelerarse. Si se produce una reducción en la cantidad de AR (corrosión) y se mantiene el mismo nivel de carga sostenida en las traveses, esto provocaría que se alcance más rápido una mayor deformación unitaria en el AR, lo que implica una redistribución de esfuerzos en la sección transversal de la trabe generando incrementos en la longitud y ancho de grietas. Por lo que dichas

trabes pueden alcanzar en menos tiempo un nivel de daño que favorece la evolución de la corrosión.

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

- La mayor probabilidad de corrosión se encuentra en los centros de los claros de las trabes. Esto está asociado a que en los centros de los claros de las trabes se encuentra el mayor volumen de grietas, lo que favorece la intrusión de la humedad en la grieta y facilita la intrusión de agentes agresivos al AR, aumentando su probabilidad de corroerse.
- Los acumulados de velocidad de corrosión fueron superiores en los centros de los claros de las trabes. Nuevamente esto se debe a que las grietas son un conducto ideal que facilita la intrusión de agentes agresivos que aceleran el proceso de corrosión.
- Se observa que los acumulados de velocidad de corrosión están asociados a la evolución del agrietamiento. Esto se debe que al existir un incremento en las cantidades de grieta, se crean nuevos medios para la intrusión de agentes agresivos, lo cual produce cambios en la pendiente de acumulados de velocidad de corrosión.
- Los acumulados de resistividad eléctrica fueron menores en los centros que en los extremos de las trabes. Esto está asociado a que en los centros de las trabes se cuenta con una mayor zona agrietada, lo cual indica que dicho agrietamiento funciona como un conducto ideal para el transporte de agentes agresivos y tiene un efecto en incrementar el riesgo de corrosión.
- La evolución de la corrosión está asociado al incremento de las cantidades, anchos, longitudes de agrietamientos y secciones expuestas de AR. Lo cual infiere que dicho proceso esta directamente asociado al nivel de daño en la estructura.

Para estudiar los efectos de la corrosión en trabes de CR se debe utilizar elementos a escala natural, aplicando cargas sostenidas que simulen las condiciones de uso de la estructura, utilizando técnicas que generen características similares a la corrosión natural y considerando el efecto del nivel de daño en el cambio del comportamiento estructural.

REFERENCIAS

1. Apostolopoulos, C., & Papadakis, V. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22, 2316-2324.
2. ASTM - C1152 / C1152M. (2012). Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. USA: ASTM.
3. ASTM - C1218 / C1218M. (2002). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. USA: ASTM.
4. ASTM - C876. (2002). Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. USA: ASTM.
5. 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.
6. Ceballos, M. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. Centro de Innovación Tecnológica para la Construcción, pp. 24-25.
7. Chávez Ulloa, E. (2010). Análisis del proceso de corrosión del concreto reforzado elaborado con agregados calizos expuesto en un medio natural y cámara de carbonatación acelerada. Tesis de Doctorado. Campeche, Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigación en Corrosión.
8. CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (1998). DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura, 2da edición.
9. Du, Y., Clark, L., & Chan, A. (2005). Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, 55, 135-147.
10. Gao, Z., Liang, R., & Patnaik, A. (2016). Effects of sustained loading and preexisting cracks on corrosion behavior of reinforced concrete slabs. *Construction and Building Materials*, 124, 776-785.
11. Hailong, Y; Chuanqing, F; Nanguo, J; Xianyu, J. (2018). Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques. *Construction and Building Materials*, 162, pp. 286-297.
12. Jimenez, V; Montes, P. (2017). Influence of concrete cracking on the corrosion of steel reinforcement. *Concrete under Severe Conditions-Castro Borges et al. (eds) Taylor*, pp. 383-389.

13. 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.
14. Lu, C., Yuan, S., Pu, C., & Lui, R. (2016). Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloritde attack. *Construction and building materials*, 123, 649-660.
15. Moussard, M; Garibaldi, M; Curbach, M. (2018). The Invention of Reinforced Concrete (1848-1906) High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, pp. 2785-2794.
16. NACE. (2016). International Measures for the Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology. NACE International.
17. 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 ión selectivo. NMX-C-523-ONNCCE-2015, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
18. 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.
19. 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 - 2016, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
20. 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 - 2016, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
21. Ponce Galera, M. (2018). Efecto del agrietamiento y de las condiciones climáticas en la evolución de los parámetros de corrosión en traves de concreto reforzado sujetas a flexión. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
22. Rejón, S. (2000). Efectividad de imprimaciones al refuerzo del concreto bajo diferentes condiciones superficiales. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.

23. 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.
24. 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.
25. Suvash, P; Gideon, P. (2017). Corrosion Deterioration of Steel in Cracked SHCC. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 557-572.
26. Uddin, F; Ahmad, S. (2018). Effect of cracking on corrosion of steel in concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*.
27. Visairo Méndez, R. (2016). Efecto de la carga de servicio y contaminación por cloruros en el comportamiento mecánico y electroquímico de traveses de concreto reforzado sujetas a flexión. Tesis de maestría. Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
28. 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.
29. Yuan, Y; Ji, Y; Surendra, P. (2007). Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, Title no. 104-S34, pp. 344-347.

APENDICE A

De la Figura A.1 a A.4 se presentan las gráficas de potencial de corrosión (E_{corr}) – Tiempo medidos a los extremos derecho e izquierdo de las trabes con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Las trabes de referencia se representan con la nomenclatura T3, T4, T11 y T12 y las trabes contaminadas con cloruros con T7, T8, T15 y T16. Se presentan los potenciales obtenidos, calculados como el promedio de las dos caras laterales de cada trabe. Las líneas moradas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de corrosión de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016. Las líneas negras representan al inicio de inducción de corrosión en las trabes de CR.

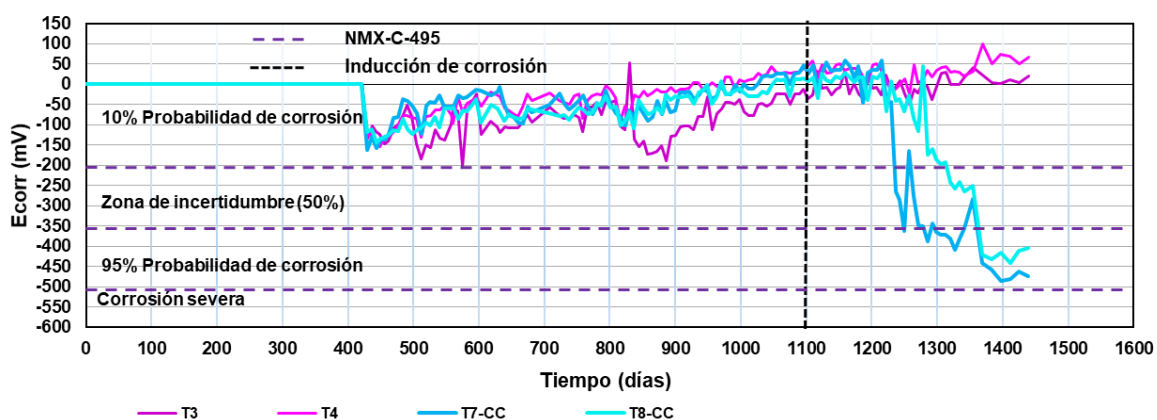


Figura A. 1 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo derecho para trabes con AR de 10 mm de diámetro.

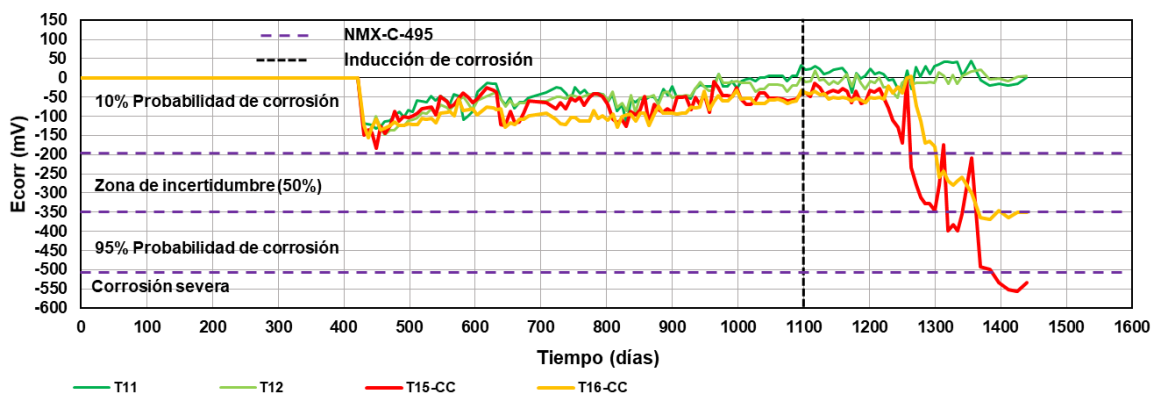


Figura A. 2 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo derecho para trabes con AR de 13 mm de diámetro.

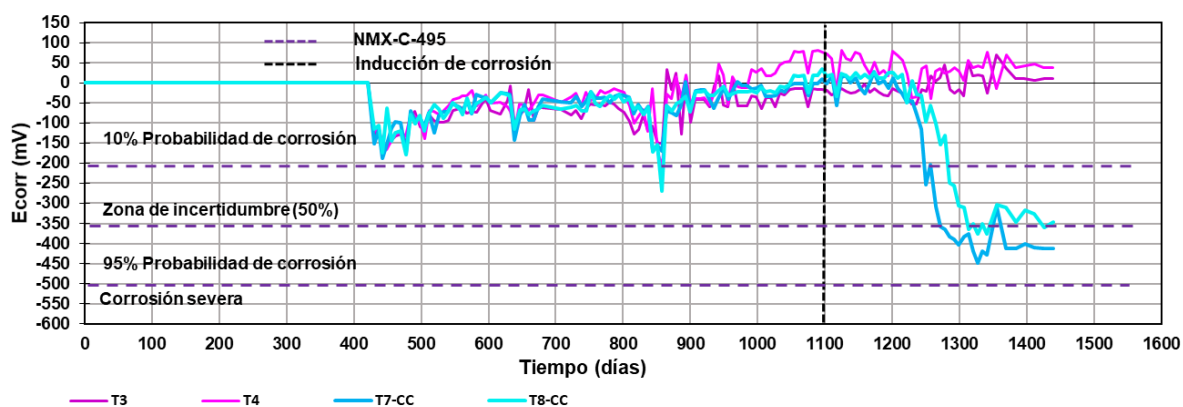


Figura A. 3 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traveses con AR de 10 mm de diámetro.

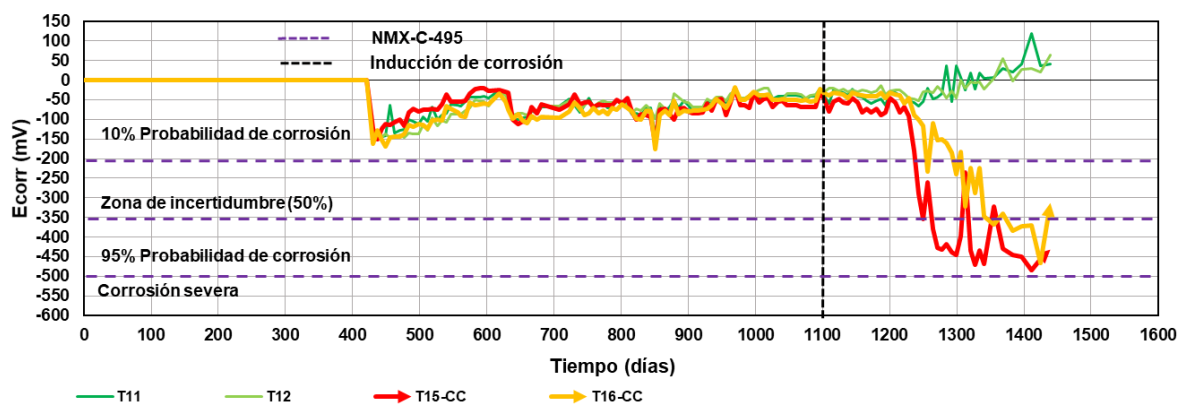


Figura A. 4 Potencial de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traveses con AR de 13 mm de diámetro.

De la Figura A.5 a A.8 se presentan las gráficas de velocidad de corrosión (i_{corr}) – Tiempo medidos a los extremos derecho e izquierdo de las traveses con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Las traveses de referencia se representan con la nomenclatura T3, T4, T11 y T12 y las traveses contaminadas con cloruros con T7, T8, T15 y T16. Se presentan los potenciales obtenidos, calculados como el promedio de las dos caras laterales de cada traves. Las líneas moradas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de

corrosión de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016. Las líneas negras representan al inicio de inducción de corrosión en las traves de CR.

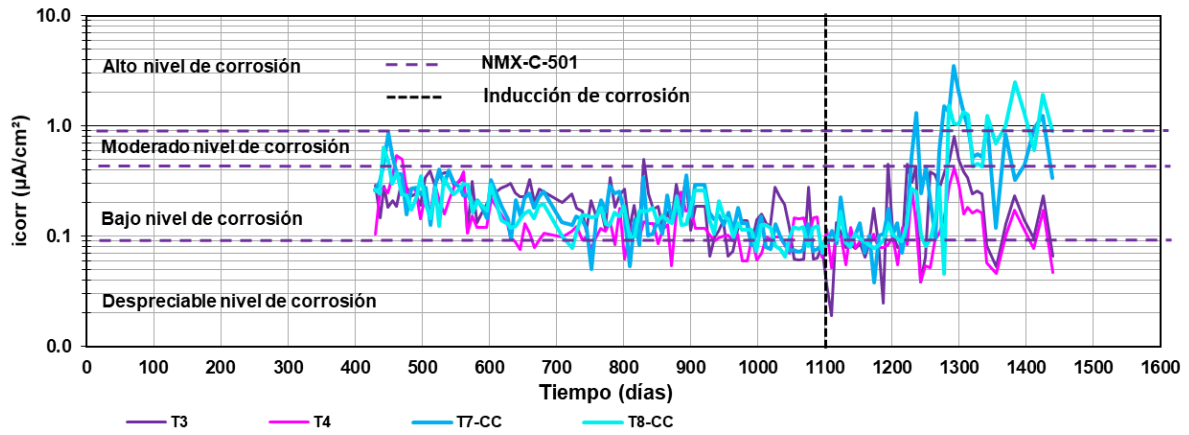


Figura A. 5 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 10 mm de diámetro.

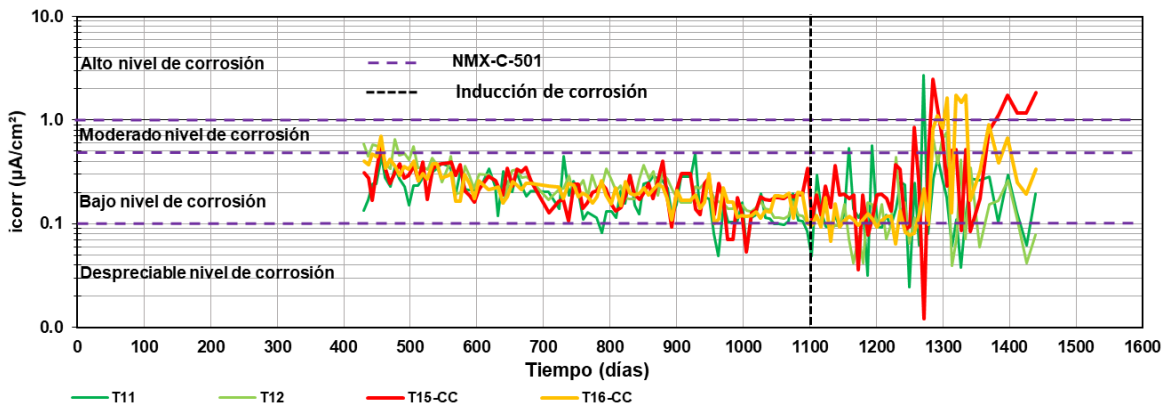


Figura A. 6 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo derecho para traves con AR de 13 mm de diámetro.

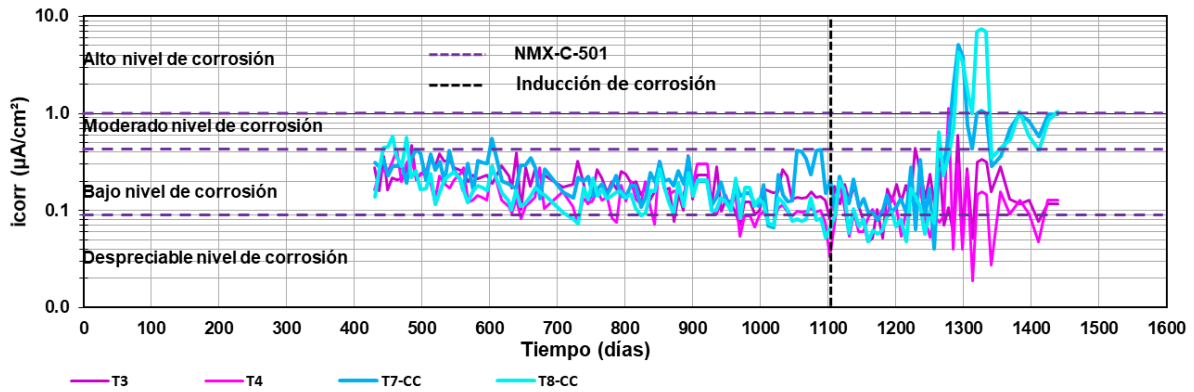


Figura A. 7 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traveses con AR de 10 mm de diámetro.

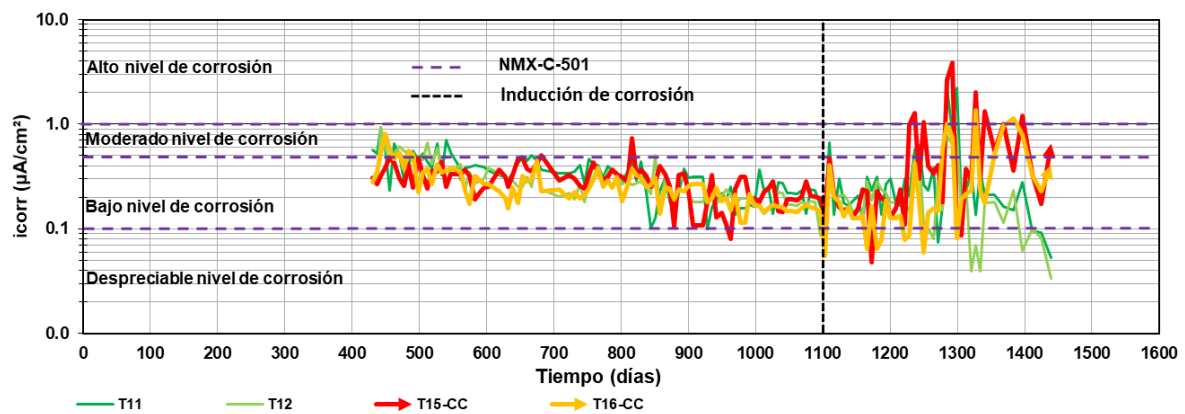


Figura A. 8 Velocidad de corrosión - Tiempo al extremo izquierdo para traveses con AR de 13 mm de diámetro.

De la Figura A.9 a A.12 se presentan las gráficas de resistividad eléctrica del concreto – Tiempo medidos a los extremos derecho e izquierdo de las traveses con AR de 10 mm y 13 mm de diámetro, respectivamente. Las traveses de referencia se representan con la nomenclatura T3, T4, T11 y T12 y las traveses contaminadas con cloruros con T7, T8, T15 y T16. Se presentan los potenciales obtenidos, calculados como el promedio de las dos caras laterales de cada trabe. Las líneas moradas punteadas indican los límites de probabilidad de que exista corrosión en el AR asociada al potencial de

corrosión de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE-2016. Las líneas negras representan al inicio de inducción de corrosión en las traves de CR.

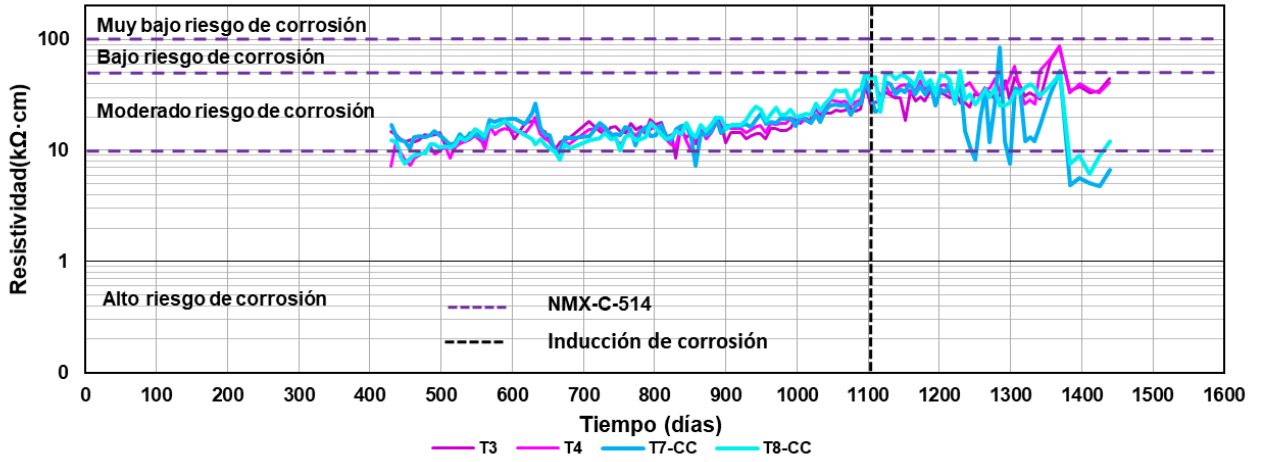


Figura A. 9 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo derecho para traveses con AR de 10 mm de diámetro.

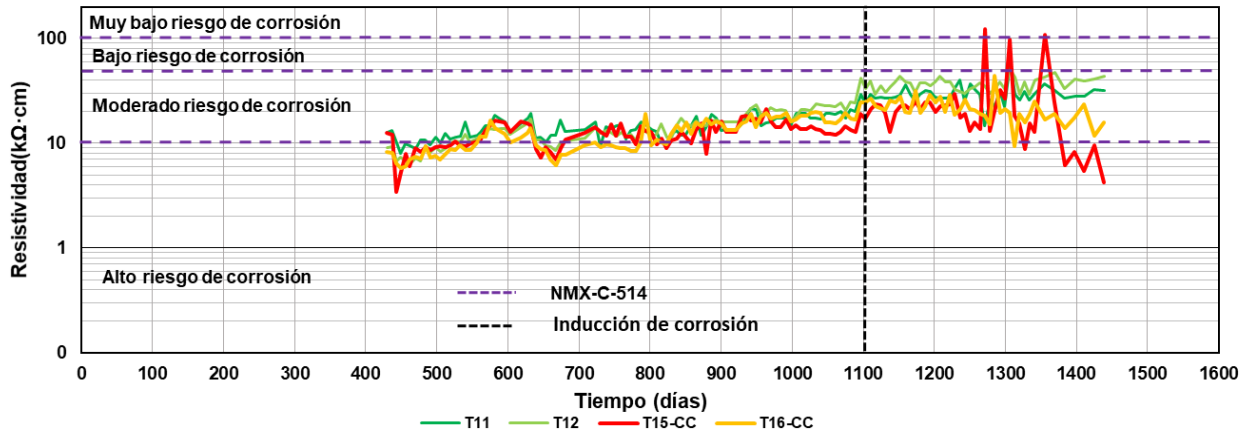


Figura A. 10 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo derecho para traveses con AR de 13 mm de diámetro.

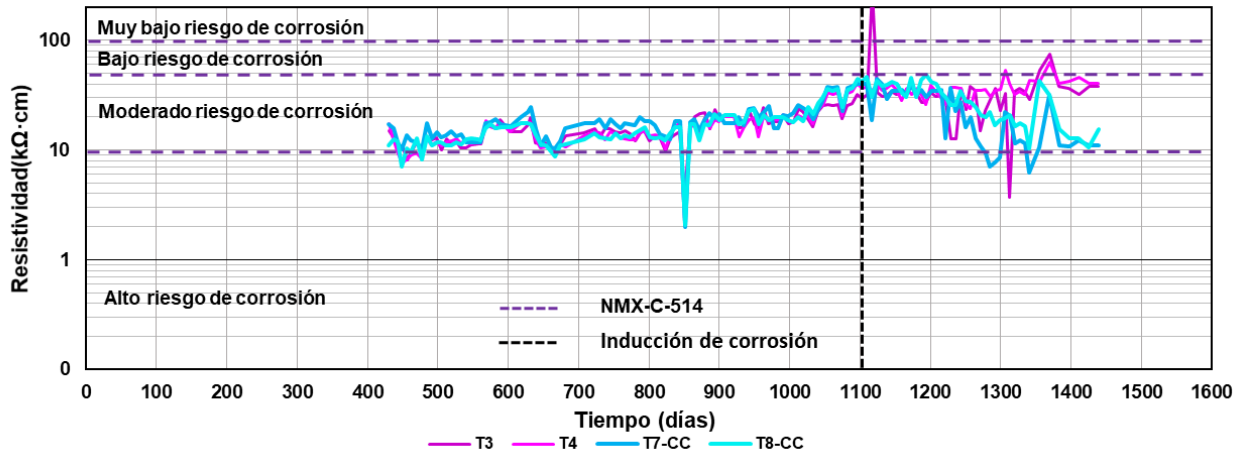


Figura A. 11 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 10 mm de diámetro.

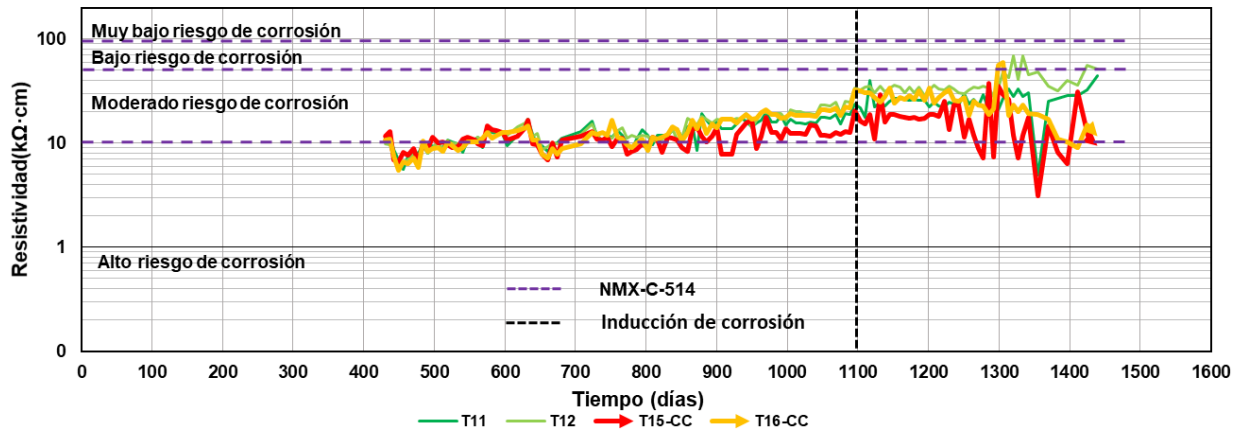


Figura A. 12 Resistividad eléctrica del concreto - Tiempo al extremo izquierdo para traves con AR de 13 mm de diámetro.