



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA CORROSIÓN EN
TRABES DE CONCRETO CON BARRAS DE 10mm Y
13mm DE DIAMETRO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. FELIPE LEÓN CHABLÉ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO
2017**

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.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) por haberme permitido estudiar esta maestría, trabajar en sus instalaciones y por todo el apoyo recibido para la realización de este proyecto.

Agradezco al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Mérida, por el apoyo recibido para la terminación de esta tesis.

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

RESUMEN

En esta tesis se estudiaron 8 traveses de concreto reforzado. Las dimensiones de las traveses fueron de 15 x 30 x 350 cm (ancho x altura x longitud). Se realizaron los trabajos preliminares para el estudio de la corrosión en traveses de concreto reforzado sujetas a flexión. Se utilizaron diferentes diámetros en el acero de refuerzo longitudinal a tensión de las traveses (10 mm y 13 mm). El diseño de la mezcla de concreto se realizó utilizando una relación agua/cemento (a/c) de 0.46. Los trabajos preliminares en las traveses consistieron en 3 actividades: 1) el monitoreo de la corrosión, 2) el ensaye de carga preliminar y 3) la aplicación de un sistema de carga sostenida. Se realizó el monitoreo de la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto. El ensaye preliminar se realizó utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 de apoyo y 2 de carga. La aplicación de la carga sostenida se realizó utilizando un sistema que asemeja las condiciones de apoyo y carga del ensaye preliminar. La carga que se aplicó en el ensaye preliminar y el sistema de carga sostenida fue una carga que generó el 60% del momento de fluencia de las traveses. Se concluyó que la pérdida de rigidez tangente promedio posterior al agrietamiento por flexión de las traveses fue del 83 % y del 68% respectivamente. Se observó también que el contenido de cloruros en el concreto endurecido supera los criterios mínimos aún cuando las traveses no fueron agredidas con agentes físicos o ambientales. La resistividad eléctrica del concreto fue afectada por el contenido de cloruros en las traveses debido a los materiales utilizados en su construcción. Se observó que la porosidad del concreto fue de mala calidad en términos de durabilidad. Se observó que aun cuando los valores de la resistividad eléctrica del concreto y la velocidad de corrosión indicaban corrosión en el acero de refuerzo, el potencial de corrosión solo indicó un 10 % de probabilidad de corrosión.

ABSTRACT

In this thesis, 8 reinforced concrete beams were studied. Beams dimensions were 15 x 30 x 350 cm (width x height x length). Preliminary work was carried out for the study of corrosion in reinforced concrete beams subjected to bending. Different diameters were used in the longitudinal tension reinforcement steel (10 mm and 13 mm). The concrete mixture was designed using a water/cement ratio (w/c) of 0.46. The preliminary works on the beams consisted of 3 activities: 1) corrosion monitoring, 2) the preliminary load test and 3) the application of a sustained loading system. The corrosion rate, the corrosion potential and the concrete's electrical resistivity were monitored. The preliminary test was performed using a 4 points loading system, 2 supports and 2 loading points. The application of the sustained load was performed using a system that resembles the conditions of support and loading of the preliminary test. Loads were applied in the preliminary test and the sustained load until arrive at the load that generated 60% yielding moment of the beams. It was concluded that the loss of average tangent stiffness after flexure cracking of the beams was 83% and 68%, respectively. It was observed that the content of chlorides in the hardened concrete exceeds the minimum criteria even when the beams weren't attacked with physical or environmental loads. The concrete's electrical resistivity was affected by the chloride content in the beams due to the materials used in their construction. It was observed that the concrete's porosity was poor quality in terms of durability. It was observed that even when the values of the concrete's electrical resistance and the corrosion rate indicated corrosion in the reinforcing steel, the corrosion potential just indicated a 10% probability of corrosion.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 Planteamiento del problema	7
1.2 Objetivo general.....	9
1.3 Objetivos específicos	9
1.4 Alcance	9
1.5 Organización de la tesis.....	10
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
2.1 Trabes de concreto reforzado con corrosión	11
2.2 Técnicas experimentales para medir la corrosión.....	16
2.2.1 Velocidad de corrosión	16
2.2.2 Potencial de corrosión.....	17
2.2.3 Resistividad eléctrica.....	18
2.2.4 Contenido de cloruros	18
2.3 Porosidad efectiva	19
2.4 Conclusiones de la revisión de la literatura.....	20
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	22
3.1 Diseño de trabes.....	22
3.2 Obtención de propiedades de los materiales	26
3.3 Diseño de la mezcla de concreto	31
3.4 Construcción de trabes	31
3.5 Monitoreo de la corrosión en trabes	34
3.6 Ensaye de muestras de concreto endurecido.....	37
3.6.1 Resistencia a la compresión axial del concreto.....	37
3.6.2 Módulo de elasticidad del concreto	38
3.6.3 Resistencia a la tensión por flexión del concreto	38
3.6.4 Porosidad efectiva y contenido de cloruros	39
3.7 Diseño de los sistemas de carga e instrumentación	41
3.8 Ensaye preliminar	44
3.9 Aplicación de cargas sostenidas.....	44
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
4.1 Propiedades de los materiales.....	46
4.2 Resultados de pruebas de concreto fresco y endurecido	48

4.3 Comportamiento de las trabes a flexión.....	49
4.4 Contenido de cloruros.....	52
4.5 Monitoreo de la corrosión	53
4.5.1 Velocidad de corrosión.....	53
4.5.2 Potencial de corrosión.....	55
4.5.3 Resistividad eléctrica.....	57
CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	60
5.1 Discusión de los resultados del ensaye preliminar de las trabes.....	60
5.2 Discusión de los resultados de durabilidad.....	61
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	66
APÉNDICE A.....	71
APÉNDICE B.....	78
APÉNDICE C	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Condiciones de apoyo y carga de las trabes.....	23
Figura 3.2 Sección longitudinal de las trabes con barras de 3/8" de refuerzo longitudinal a tensión.....	24
Figura 3.3 Sección transversal de las trabes con barras de 3/8" de refuerzo longitudinal a tensión.....	25
Figura 3.4 Sección longitudinal de las trabes con barras de 1/2" de refuerzo longitudinal a tensión.....	25
Figura 3.5 Sección transversal de las trabes con barras de 1/2" de refuerzo longitudinal a tensión.....	25
Figura 3.6 Muestra cribada de agregado fino.....	26
Figura 3.7 Peso volumétrico del agregado fino.	26
Figura 3.8 Densidad específica del agregado fino.....	27
Figura 3.9 Muestra cribada de agregado grueso.....	27
Figura 3.10 Peso volumétrico del agregado grueso.	28
Figura 3.11 Revenimiento del concreto.....	29
Figura 3.12 Peso volumétrico del concreto.	29
Figura 3.13 Cilindros de concreto de 15 cm de diámetro.	30
Figura 3.14 Cilindro de concreto de 7.5 cm de diámetro.....	30
Figura 3.15 Trabe de concreto de 15x15x60 cm.	31
Figura 3.16 Construcción de la cimbra.....	33
Figura 3.17 Aislamiento del acero de refuerzo longitudinal del transversal.....	33
Figura 3.18 Colocado del armado del acero de refuerzo dentro la cimbra.....	33
Figura 3.19 Colocación del concreto de las trabes.....	34
Figura 3.20 Equipo Resipod.....	35
Figura 3.21 Equipo Gecor 6	35
Figura 3.22 Detalle de posicionamiento de las barras de refuerzo en las trabes. .	37
Figura 3.23 Visita del ensaye de resistencia a compresión axial en cilindros de concreto.....	38
Figura 3.24 Vista del ensaye del módulo de elasticidad del concreto.	38
Figura 3.25 Vista del ensaye de resistencia a tensión por flexión del concreto. ...	39

Figura 3.26 Cilindros cortados a 5 cm de altura.	39
Figura 3.27 Evaluación de las muestras con el equipo Conductronic.	40
Figura 3.28 a) Sistema de cargas verticales y b) el sistema de carga sostenida. .	41
Figura 3.29 Sistema de cargas verticales.	42
Figura 3.30 Ubicación de los potenciómetros lineales.	42
Figura 3.31 Sistema de carga sostenida.	43
Figura 3.32 Silleta metálica	43
Figura 3.33 Ensaye preliminar.....	44
Figura 3.34 Postensado de trabes.	45
Figura 4.1 Curva granulométrica del agregado fino.	46
Figura 4.2 Curva granulométrica del agregado grueso.	47
Figura 4.3 Curvas Carga-Desplazamiento de trabes P1-10-1, C1-10-1,	49
Figura 4.4 Curvas Carga-Desplazamiento de trabes P1-13-1, C1-13-1,	50
Figura 4.5 Curvas de la velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).....	55
Figura 4.6 Curvas del potencial de corrosión (mV).	57
Figura 4.7 Curvas de la resistividad eléctrica del concreto ($\text{k}\Omega\text{-cm}$).....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión.	17
Tabla 2.2 Criterio de evaluación del potencial de corrosión.	18
Tabla 2.3 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica	18
Tabla 2.4 Límites de contenido de cloruros para nuevas construcciones.	19
Tabla 2.5 Criterios de evaluación de porosidad efectiva	19
Tabla 3.1 Nomenclatura de las trabes.....	22
Tabla 3.2 Datos para el diseño de la mezcla de concreto.....	31
Tabla 3.3 Nomenclatura de las barras de refuerzo longitudinal a tensión.....	37
Tabla 4.1 Granulometría del agregado fino.....	46
Tabla 4.2 Granulometría del agregado grueso.....	47
Tabla 4.3 Propiedades del concreto fresco.....	48
Tabla 4.4 Propiedades del concreto endurecido.....	48
Tabla 4.5 Rigidez inicial y tangencial de las trabes P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1-10-2.....	50
Tabla 4.6 Rigidez inicial y tangencial de las trabes P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2.....	51
Tabla 4.7 Desplazamientos verticales experimentales y analíticos de las trabes P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1-10-2.....	51
Tabla 4.8 Desplazamientos verticales experimentales y analíticos de las P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2.....	52
Tabla 4.9 Contenido de cloruros de los materiales utilizados en las mezclas de concreto.....	52
Tabla 4.10 Contenido de cloruros promedio en el concreto endurecido.....	53
Tabla 4.11 Velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).....	54
Tabla 4.12 Potencial de corrosión (mV).....	56
Tabla 4.13 Resistividad eléctrica del concreto de las trabes ($\text{k}\Omega\text{-cm}$).....	58

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La corrosión es un problema de gran importancia en la actualidad debido a que es la causa de grandes pérdidas económicas. La corrosión en estructuras de concreto reforzado (CR) representa, en forma integral, el problema de durabilidad que más afecta a las estructuras. El daño por corrosión es el problema que mayor costo representan en el mantenimiento y operación de diversas estructuras de CR (Helene y Pereira, 2003). Se estimó en el año 2013, en Estados Unidos de América, que la corrosión representó un trillón de dólares en pérdidas.

El uso de sistemas estructurales a base de elementos de CR es ampliamente utilizado en el mundo. Estos sistemas tienen grandes beneficios para las construcciones a pequeña y gran escala, ya que son seguros, económicos y durables. Las estructuras generalmente se encuentran sujetas a cargas gravitacionales sostenidas durante su tiempo de servicio. Estas cargas generan el agrietamiento de los elementos estructurales. El agrietamiento permite el acceso de agentes contaminantes que afectan al concreto y al acero de refuerzo. Dicho agrietamiento permite el desarrollo de la corrosión a una mayor velocidad comparado con elementos estructurales libres de cargas. Los daños en el acero de refuerzo de las estructuras debido a la corrosión generan una gran afectación en su funcionalidad. El acero de refuerzo embebido en el concreto cuenta con una protección física (recubrimiento de concreto) y una química (capa de pasivación). Cuando las estructuras se encuentran en ambientes agresivos, la protección del acero de refuerzo se ve afectada considerablemente, principalmente por el ataque de cloruros en zonas costeras y por el dióxido de carbono en zonas rurales. En las zonas costeras, cuando la concentración de iones de cloruro excede su valor crítico, se pierde la capa protectora de pasivación del acero de refuerzo y empieza una corrosión activa. La corrosión consume la capa superficial del acero de refuerzo, y se forma una capa de productos de oxidación que aumenta con el tiempo en el perímetro de la barra de acero. Dicho producto ejerce esfuerzos radiales que producen una presión en contra el concreto (J. MacGregor, 6ed. Reinforced

concreto) provocando agrietamientos y desprendimientos del recubrimiento. Además de los esfuerzos provocados en el concreto por la corrosión, también se encuentran esfuerzos radiales actuando en el concreto generados por la adherencia mecánica entre el concreto y el acero de refuerzo longitudinal. Los esfuerzos radiales generados por el acero de refuerzo ejercen una presión que sumada a la presión causada por la corrosión, causan el agrietamiento o pérdida del recubrimiento del concreto en menor tiempo. Una vez perdida la protección física, el acero de refuerzo de las estructuras entra en contacto directo con el ambiente y acelera el proceso de corrosión. Las grietas y los desprendimientos del recubrimiento debidos a la corrosión, además de ser antiestéticas, pueden disminuir la adherencia mecánica del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural (Torres y Martínez, 2001).

Existen investigaciones sobre el comportamiento de travesaños de CR sujetas a daños por corrosión. En dichas investigaciones se consideraron diferentes variables, por ejemplo, el nivel de corrosión (Rodríguez, et al., 1997, Torres – Acosta, et al., 2006, Oyado, et al., 2009, Juárez, et al., 2011, Naga, et al., 2014), la cantidad del acero de refuerzo longitudinal a tensión (Rodríguez, et al., 1997, Yu, et al., 2015), la cantidad del acero de refuerzo longitudinal a compresión, y el tipo de anclaje del acero de refuerzo a tensión (Rodríguez, et al., 1997), la separación del acero de refuerzo transversal (Rodríguez, et al., 1997, Juárez, et al., 2011) la resistencia a compresión axial del concreto (Wang, et al., 2014), la aplicación de cargas cíclicas reversibles (Wang, et al., 2014), el uso de cargas sostenidas (Malumbela, et al., 2009), la técnica de corrosión acelerada (Malumbela, et al., 2009, Oyado, et al., 2009), el recubrimiento de concreto del acero de refuerzo longitudinal (Yu, et al., 2015), entre otras.

En los trabajos anteriores se encontró que existen pocas investigaciones donde la corrosión acelerada se induce en travesaños sujetas a cargas sostenidas. La corrosión se debe inducir bajo dichas cargas, ya que las travesaños se encuentran en tales condiciones durante su vida útil. Se observó que, en la mayoría de las investigaciones, las longitudes de las travesaños estudiadas son cortas; por tanto, no son representativas de las que se encuentran en las estructuras de CR. Por otro

lado, se encontró que existe un solo estudio donde la variable fue el acero de refuerzo longitudinal a tensión, pero dicho estudio se realizó sin aplicar cargas sostenidas. Finalmente se encontró, que la técnica más utilizada para inducir corrosión acelerada es la de mojado y secado con una solución a base de cloruro de sodio.

Con base en lo anterior se concluye que aún es necesario realizar más investigaciones sobre traveses de CR, de preferencia estudios con traveses a escala natural y bajo cargas sostenidas. En cuanto a la cantidad de acero de refuerzo longitudinal a tensión se observó que todavía es necesario estudiar su efecto en la resistencia a flexión de las traveses con corrosión. En particular se pueden estudiar diferentes diámetros de barras a diferentes niveles de corrosión.

1.2 Objetivo general

Realizar trabajos preliminares para el estudio de la corrosión en traveses de concreto reforzado sujetas a flexión. Se consideran traveses con acero de refuerzo longitudinal a tensión de diferente diámetro.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades mecánicas y químicas de los materiales utilizados en la elaboración del concreto.
- Determinar las propiedades mecánicas iniciales de las traveses de concreto reforzado sujetas a flexión: rigidez inicial, rigidez posterior al agrietamiento y desplazamientos residuales.
- Monitorear a edades tempranas las propiedades electroquímicas de las traveses de concreto reforzado: velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad eléctrica.

1.4 Alcance

Esta tesis forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es estudiar el comportamiento a flexión de traveses de concreto reforzado con corrosión. En dicho proyecto se consideran 16 traveses a escala natural las cuales serán sujetas a cargas

sostenidas y a un proceso de corrosión acelerada. En esta tesis se realizaron los trabajos preliminares para el estudio de la corrosión de 8 travesaños. Los trabajos preliminares de las otras 8 travesaños se realizaron por Arceo (2017).

1.5 Organización de la tesis

En el Capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema y los objetivos de presente trabajo. En el Capítulo 2 se presenta la revisión de la literatura sobre travesaños de concreto reforzado sujetas a corrosión, se describen las principales técnicas para inducir la corrosión acelerada y los métodos para evaluar la corrosión en CR. En el Capítulo 3 se presenta la metodología que se desarrolló para este tema de investigación. La metodología consta del diseño de las travesaños, obtención de las propiedades de los materiales, la construcción y monitoreo de la corrosión de las travesaños y finalmente el ensayar preliminar y el postensado de dichas travesaños. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la metodología. En el Capítulo 5 se realizan la discusión de los resultados en términos estructurales y de durabilidad. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Se realizó una revisión de la literatura sobre el comportamiento de trabes de CR sujetas a daños por corrosión y las técnicas para medir la corrosión. Los resultados de dicha revisión se presentan en las secciones siguientes.

2.1 Trabes de concreto reforzado con corrosión

Rodríguez, *et al.* (1997) estudiaron trabes de CR sometidas a corrosión acelerada. Se ensayaron 30 trabes con dimensiones de 15 x 20 x 150 cm (base x altura x longitud). Las dimensiones de la trabe control fueron de 15 x 20 x 205 cm. Las variables de estudio fueron el nivel de corrosión, la cantidad de acero de refuerzo longitudinal en tensión y compresión, la separación del acero de refuerzo transversal y el tipo de anclaje del acero de refuerzo en tensión. Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia de fluencia de 5098 kg/cm². La resistencia a compresión axial del concreto fue de 350 kg/cm². Este concreto se contaminó con cloruro de sodio (3% del peso del cemento). Se aplicó una densidad de corriente constante al acero de refuerzo de 100 μ A/cm² durante periodos de 100, 120, 160 y 180 días. Las trabes fueron ensayadas utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y 2 cargas concentradas. Se aplicó inicialmente una carga de servicio y después de minutos se descargaron las trabes. Posteriormente, se ensayaron las trabes hasta alcanzar la falla. En ambos casos se aplicaron cargas monotónicas incrementales. Se concluyó que al aumentar el nivel de corrosión en el acero de refuerzo, la resistencia a flexión y cortante disminuyó; por otro lado, los desplazamientos y los anchos de grietas aumentaron. Para un mismo nivel de corrosión en las trabes, se observó lo siguiente: 1) al aumentar la cantidad de acero de refuerzo longitudinal, se presentó una menor pérdida de masa promedio, 2) la corrosión por picadura en el acero de refuerzo longitudinal causó una mayor pérdida de resistencia a flexión en las trabes comparada con la pérdida generada por la corrosión general, 3) al aumentar la separación del acero de refuerzo transversal, se presentó una menor corrosión por picadura, 4) el acero de refuerzo transversal presentó una pérdida promedio de masa similar, independientemente de su separación, 5) la resistencia a flexión de

las traves fueron similares, independientemente del tipo de anclaje utilizado y 6) los desplazamientos de las traves fueron similares aun cuando se utilizó un diferente tipo de anclaje.

Torres - Acosta, *et al.* (2006) estudiaron traves de CR sometidas a corrosión acelerada. Se ensayaron 12 traves con dimensiones de 10 x 15 x 150 cm (base x altura x longitud). La variable de estudio fue el nivel de corrosión. El acero de refuerzo de las traves consistió de una sola barra a tensión de 9.8 mm de diámetro con una resistencia nominal de fluencia de 4200 kg/cm². La resistencia a compresión axial del concreto fue de 275 kg/cm². Este concreto se contaminó con cloruro de sodio (3% del peso del cemento). Se aplicó una densidad de corriente constante al acero de refuerzo de 80 μ A/cm² durante periodos de 40, 80 y 200 días. Las traves fueron ensayadas hasta alcanzar la falla utilizando un sistema de carga de 3 puntos, 2 apoyos y una carga concentrada. Se concluyó que el acero de refuerzo de las traves presentó un daño severo por corrosión, independientemente del periodo de aplicación de la corriente (nivel de corrosión alcanzado). El máximo ancho de grieta y el porcentaje promedio de la pérdida de radio por la corrosión del acero de refuerzo tienen una tendencia casi lineal.

Malumbela, *et al.* (2010) estudiaron traves de CR sometidas a corrosión acelerada y carga sostenida. Se ensayaron 9 traves con dimensiones de 15.3 x 25.4 x 300 cm (base x altura x longitud). Las variables de estudio fueron el nivel de carga sostenida y la técnica para inducir la corrosión. Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia de fluencia de 5000 kg/cm². La resistencia a compresión axial del concreto fue de 350 kg/cm². Se aplicaron cargas sostenidas correspondientes a 1, 8 y 12% de la capacidad a flexión de las traves. Para generar la corrosión en el acero de refuerzo a tensión se utilizó una técnica de ciclos de mojado y secado. Los ciclos de mojado y secado fueron: 1) 4 días de mojado y 4 días de secado, y 2) 4 días de mojado y 2 días de secado. Se aplicó una corriente constante al acero de refuerzo de 150 mA durante un periodo correspondiente a un total de 40 días de mojado. Se ensayaron las traves hasta alcanzar la falla utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y 2 cargas concentradas. Se concluyó que la aplicación de carga sostenida que no fue mayor a la carga de agrietamiento de las traves, no

generó una mayor pérdida de masa en el acero de refuerzo longitudinal a tensión comparado con el acero de las traveses sin cargas sostenidas. Las traveses que fueron sometidas a una corrosión con 4 días de secado presentaron mayores daños por corrosión comparado con las sujetas a 2 días de secado.

Oyado, *et al.* (2009) estudiaron traveses de CR sometidas a corrosión acelerada y carga sostenida. Se ensayaron 13 traveses con dimensiones de 10 x 20 x 210 cm (base x altura x longitud). Se consideraron 3 traveses con 12 años de edad expuestas a la intemperie tomadas de otra investigación. Las variables de estudio fueron el nivel de corrosión y la técnica de corrosión. Las técnicas de corrosión que se utilizaron fueron por corriente impresa (EL) y por exposición a la intemperie (EX). Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia de fluencia de 3700 kg/cm². La resistencia promedio a compresión axial del concreto fue de 350 kg/cm². El concreto de las traveses con corrosión EL se contaminó con cloruro de sodio (10% del peso del cemento) y no se sometieron a cargas sostenidas. Se aplicó una densidad de corriente constante al acero de refuerzo durante periodos de 20, 33, 54 días. Las traveses con corrosión EX fueron sometidas a una carga sostenida de servicio mientras fueron rociadas con cloruro de sodio durante un tiempo de 17 meses. El sistema de carga sostenida consistió de 2 apoyos y 2 cargas concentradas. Finalmente, las traveses fueron ensayadas hasta alcanzar la falla utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y 2 cargas concentradas. Se concluyó que con la técnica de corrosión EL no existe un control aceptable sobre el grado de corrosión que sufre el acero de refuerzo. La corrosión severa del acero de refuerzo reduce la ductilidad de las traveses. La pérdida de resistencia a flexión de las traveses por la técnica de corrosión EX es similar que la obtenida con la técnica de corrosión EL a niveles bajos de corrosión. Por otro lado, la técnica de corrosión EL generó mayor pérdida de la resistencia de las traveses a niveles de corrosión severa comparado con la técnica de corrosión EX.

Juárez, *et al.* (2011) estudiaron traveses de CR sometidas a corrosión acelerada. Se ensayaron 16 traveses con dimensiones de 20 x 35 x 200 cm (base x altura x longitud). Las variables de estudio fueron la separación del acero de refuerzo transversal y el nivel de corrosión. Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia

de fluencia de 4200 kg/cm^2 . La resistencia a compresión axial del concreto fue de 210 kg/cm^2 . Se utilizaron 2 técnicas de corrosión: el primero consistió en ciclos de mojado y secado, donde el mojado se realizó utilizando una solución con cloruro de sodio (3.5% del peso del agua), el segundo técnica se realizó después de la despasivación del acero de refuerzo transversal y consistió en aplicar una densidad de corriente constante al refuerzo de $100 \mu\text{A/cm}^2$ durante periodos de 80 y 120 días. Las trabes fueron ensayadas utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y 2 cargas concentradas. Se aplicaron cargas monotónicas incrementales. Se concluyó que a niveles de corrosión incipientes no se observó una pérdida de la resistencia última a cortante. Las trabes sujetas a corrosión moderada y severa presentaron una reducción de su resistencia a cortante de un 30% con respecto a la obtenida en las trabes control. Se observó, que cuando se tiene una mayor separación de estribos se reduce el daño por la corrosión.

Naga, *et al.* (2014) estudiaron trabes de CR sometidas a corrosión acelerada. Se ensayaron 17 columnas con dimensiones de $30 \times 40 \times 215 \text{ cm}$ (base x altura x longitud). La variable de estudio el nivel de corrosión. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 200 kg/cm^2 . Se aplicó una corriente constante al acero de refuerzo de 10 A. La aplicación de la corriente fue durante periodos de 6, 11 y 20 días. Las trabes fueron sometidas a cargas monotónicas incrementales utilizando un sistema de carga en cantiléver, un apoyo y una carga concentrada. Se observó que la capacidad de carga de las trabes control fue mayor que la capacidad de las trabes con corrosión, por otro lado, las deflexiones en las trabes control fueron menores. Se concluyó que con el aumento del nivel de corrosión se pierde ductilidad en las trabes. Se concluyó que, al aumentar el nivel de corrosión en el acero de refuerzo, la resistencia a flexión disminuyó; por otro lado, los desplazamientos y los anchos de grietas aumentaron. Se presentaron mayor número de grietas en las trabes control en comparación con las trabes con corrosión.

Meda, *et al.* (2014) estudiaron columnas de CR sometidas a corrosión acelerada. Se ensayaron 2 columnas con dimensiones de $30 \times 30 \times 180 \text{ cm}$. La variable de estudio fue el daño por corrosión. La investigación consto de 2 etapas. En la

primera etapa se realizó la calibración de la Ley de Faraday utilizando el primer par de columnas. La segunda etapa consistió en la evaluación del daño por la corrosión en las columnas. El nivel de corrosión fue del 20% de pérdida de masa en el acero de refuerzo. Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia de fluencia de 5200 kg/cm². La resistencia a compresión axial del concreto fue de 200 kg/cm². Se aplicó una corriente constante al acero de refuerzo a tensión de 0.5 A. El tiempo de la aplicación de la corriente fue de 47 días. Las columnas se ensayaron hasta la falla utilizando un sistema de carga en cantiléver, un apoyo y una carga concentrada. Las columnas fueron sometidas a una carga axial del 40.8 Ton y cargas cíclicas reversibles de 4.5 Ton en promedio. Se observó que el nivel de corrosión alcanzado fue cercano al utilizado en el cálculo con la Ley Farádica. Se concluyó que para la columna con corrosión se obtuvo una reducción de la resistencia máxima del 26%, un 30% en la carga última y un 50% en el desplazamiento último.

Wang, *et al.* (2015) estudiaron travesaños de CR sometidas a corrosión acelerada. Se ensayaron 12 travesaños con dimensiones de 12 x 20 x 170 cm (base x altura x longitud). Las variables de estudio fueron la resistencia a compresión axial del concreto (200, 250, 300 y 350 kg/cm²) y la aplicación de cargas cíclicas reversibles (50,000 ciclos). Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia de fluencia de 3700 kg/cm². Se aplicó una densidad de corriente constante al acero de refuerzo a tensión de 187 μ A/cm². El tiempo de la aplicación de la corriente se obtuvo de acuerdo con la Ley de Faraday para un nivel de corrosión seleccionado. Las travesaños fueron sometidas a cargas cíclicas reversibles de servicio utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y 2 cargas concentradas. Las cargas cíclicas reversibles de servicio fueron en el rango elástico de las travesaños. Posteriormente, se ensayaron las travesaños hasta alcanzar la falla aplicando una carga monótona incremental. Se concluyó que las grietas por flexión fueron en aumento durante la aplicación de cargas cíclicas reversibles. A menor resistencia a compresión axial del concreto, menor fue el número de grietas en las travesaños. Los desplazamientos de las travesaños durante las cargas cíclicas reversibles fueron menores cuando la resistencia a compresión axial del concreto fue mayor. La pérdida de resistencia a

flexión de las traves no fue significativa, independientemente de la resistencia a compresión axial del concreto.

Yu, *et al.* (2015) estudiaron traves de CR sometidas a corrosión acelerada y carga sostenida. Se ensayaron 4 traves con dimensiones de 15 x 28 x 300 cm (base x altura x longitud). Las traves se dividieron en 2 grupos, un par correspondió a traves construidas desde 1984 (O) y otro par de traves fueron construidas en el 2010 (N). La variable de estudio fue el diámetro de las barras de refuerzo longitudinal. La técnica de corrosión fue realizando la exposición de las traves en un ambiente agresivo por medio de una cámara salina. Se utilizó acero de refuerzo con una resistencia de fluencia de 5098 kg/cm². La resistencia promedio a compresión axial del concreto fue de 500 kg/cm². Las traves fueron sometidas a un sistema de carga sostenida consistió de 2 apoyos y una carga concentrada. Las traves fueron ensayadas hasta alcanzar la falla utilizando un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y una carga concentrada. Finalmente se extrajeron las barras de acero corroídas para obtener sus propiedades mecánicas. Se concluyó que el daño por corrosión en las traves generó el cambio de la falla esperada. La diferencia de condiciones de exposición de las traves influye en la vida de servicio de estas mismas. La pérdida de ductilidad en las traves O fue menor a pesar de que estuvieron por mayor tiempo expuestas a un ambiente corrosivo comparadas con las traves N.

2.2 Técnicas experimentales para medir la corrosión

Las técnicas experimentales más utilizadas para medir la corrosión en estructuras de CR son las pruebas electroquímicas, de las cuales las más utilizadas son la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión, la resistividad eléctrica, el contenido de cloruros en el concreto. Para conocer la calidad del concreto en términos de durabilidad se utiliza de la porosidad efectiva.

2.2.1 Velocidad de corrosión

Se le llama velocidad de corrosión (*icorr*) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo, aunque la forma más usual es definida a partir de medidas de

tipo electroquímico ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Para poder determinar la i_{corr} se utiliza una técnica electroquímica utilizando un potencióstato/galvanostato (Gecor). Para poder obtenerla, los equipos electrónicos realizan un barrido de potencial en un rango muy cercano al potencial de corrosión ($\pm 25\text{-}30\text{ mV}$). La densidad de corriente que se obtiene es conocida como corriente de corrosión que es una medida de la velocidad del proceso de corrosión.

Los criterios para poder evaluar la i_{corr} se presentan en la Tabla 2.1 de acuerdo con El Manual de la Red DURAR:

Tabla 2.1 Criterio de evaluación de la velocidad de corrosión.

Velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Moderado
0.5 a 1	Elevada
> 1	Muy elevada

2.2.2 Potencial de corrosión

Cualquier material metálico sumergido en un medio corrosivo tiene un potencial característico en ausencia de polarizaciones externas y este potencial se conoce como potencial de reposo en circuito abierto o potencial de corrosión (E_{corr}).

El valor del E_{corr} es la diferencia de potencial entre el material que se estudia (barra de acero embebida en el mortero) y otro material que se utiliza como referencia (Cobre). El E_{corr} se puede medir por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido (ASTM C 876).

Los criterios para poder evaluar el E_{corr} se presentan en la Tabla 2.2 de acuerdo con El Manual de la Red DURAR:

Tabla 2.2 Criterio de evaluación del potencial de corrosión.

Potencial de corrosión Cu/CuSO ₄ (mV)	Probabilidad de corrosión
< -350	Mayor al 90%
-200 a -350	Aproximadamente 50%
> -200	Menor del 10%

2.2.3 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica (ρ) es una propiedad característica de cada material que indica la facilidad o dificultad que tiene la corriente eléctrica para transitar por el material. Las lecturas del monitoreo de la ρ son muy sensibles al grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado a la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

Los criterios para poder evaluar la ρ se presentan en la Tabla 2.3 de acuerdo a la norma NMX – C - 514:

Tabla 2.3 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica

Resistividad del concreto (k Ω -cm)	Pronóstico de corrosión
100 a 200	Muy bajo
50 a 100	Bajo
10 a 50	Moderado
<10	Alto

2.2.4 Contenido de cloruros

Los iones de cloruro están presentes en la masa del concreto de 3 maneras: enlazados, adsorbidos y disueltos en el agua de los poros (libres). Los iones cloruro que pueden dañar al acero de refuerzo son los que se encuentran libres. Los iones cloruro que son adsorbidos pueden afectar de igual manera al acero de refuerzo si estos se vuelven a integrar a los iones libres.

Cuando el agua y los agregados utilizados en la elaboración de la mezcla de concreto contiene iones de cloruro, cierta cantidad reacciona con los compuestos hidratados del concreto y forman sales Friedel, otra parte es adsorbida en las paredes de los poros y solo una parte es disuelta en el agua de los poros (libre). De acuerdo a las normas ASTM C 1152 y ASTM C 1218, los límites de contenidos de cloruros libres permitidos en el concreto endurecido se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Límites de contenido de cloruros para nuevas construcciones.

Categoría	Límite de cloruros (% por peso de cemento)	
	Método de prueba	
	ACI 318/318R-05	ASTM C 1218
Concreto reforzado en condiciones húmedas	0.15	0.08
Concreto reforzado en condiciones secas	1.00	0.15

2.3 Porosidad efectiva

La porosidad efectiva del concreto (ξ_e) depende del tipo de cemento y de las dosificaciones de fabricación tales como la relación agua-cemento, la calidad de los agregados pétreos, la compactación del concreto y el uso de aditivos. Es fundamental para determinar el mecanismo de acceso de los cloruros el tamaño de los poros, así como la cantidad de agua que contengan.

Los criterios para poder evaluar la ξ_e se presentan en la Tabla 2.5 de acuerdo con El Manual de la Red DURAR:

Tabla 2.5 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.	$> 15\%$

2.4 Conclusiones de la revisión de la literatura

Con base en los trabajos de investigación presentados en la revisión de la literatura se concluyen los siguientes puntos:

1. Las variables de estudio consideradas en las trabes de CR son: el nivel de corrosión, el tipo de carga aplicada, la técnica de corrosión acelerada, la cantidad del acero de refuerzo longitudinal a tensión y compresión, la separación del acero de refuerzo transversal, el recubrimiento del acero de refuerzo longitudinal, el tipo de anclaje del acero de refuerzo a tensión y la resistencia a compresión axial del concreto.
2. En trabes donde se estudió el efecto del nivel de corrosión, se observó que al aumentar el nivel de corrosión en el acero de refuerzo, la resistencia a flexión de las trabes disminuye.
3. Las trabes se ensayaron utilizando cargas concentradas monotónicas incrementales o cargas cíclicas reversibles, siendo la primera la más utilizada. En los ensayos con carga cíclica reversible se observó, como era de esperar, que el desplazamiento de las trabes aumenta con la repetición de cada ciclo.
4. Existen pocos trabajos donde la corrosión acelerada se induce bajo cargas sostenidas. Para estos casos, se observó que dichas cargas no generaron un cambio en el nivel de corrosión alcanzado entre las trabes con carga sostenida y las trabes sin carga sostenida, sin embargo, esto se debe a que los niveles de carga sostenida en las trabes estuvieron por debajo de la carga que genera el agrietamiento por flexión de las trabes. Por tanto, se recomienda que la corrosión acelerada se realice en trabes con carga sostenida que representen a las cargas que se presentan en estructural en servicio. Dichas cargas son superiores a las cargas que generan el agrietamiento por flexión de las trabes.
5. Las técnicas de corrosión acelerada utilizados son: la contaminación del concreto con cloruro de sodio combinada con la aplicación de corriente en el acero de refuerzo, y el uso de ciclos de mojado y secado con una solución a base de cloruro de sodio. La técnica que mejor representa el daño que sufren las estructuras en servicio es la técnica de uso de ciclos de mojado y secado con una solución a base de cloruro de sodio.

6. Existe solo una investigación donde la variable de estudio fue la cantidad de acero de refuerzo longitudinal a tensión (Rodríguez, et al., 1997). En este trabajo la corrosión acelerada se aplicó en trabes sin cargas sostenidas. A su vez, las cuantías de acero de refuerzo a tensión estuvieron cercanas a la máxima, por tanto, se limitó la capacidad de deformación y ductilidad de las trabes. Para este caso, se encontró que, al aumentar la cantidad de acero de refuerzo a tensión, se presentó un menor daño por corrosión a la resistencia a flexión de las trabes. Otra variable estudiada por el mismo autor fue la separación del acero de refuerzo transversal (barras lisas). Se observó que este refuerzo es más propenso a una corrosión severa, además de que presenta un mayor nivel de corrosión al reducir su separación. En cuanto al uso de diferente tipo de anclaje del acero de refuerzo longitudinal a tensión, dicho autor no observó un cambio en la resistencia a flexión de las trabes.
7. La mayoría de las trabes estudiadas tuvieron longitudes comprendidas entre 1.5 y 2.1 m. Solo en un trabajo se consideraron trabes con una longitud de 3.0 m. En dicho trabajo, la corrosión acelerada se indujo bajo cargas sostenidas con un valor máximo correspondiente al 12% de la resistencia a flexión. Este valor no representa las cargas gravitacionales de servicio promedio (60% del momento de fluencia) que se esperan durante la vida útil de una trabe de CR.
8. La mayoría de los trabajos se han enfocado en general a estudiar la pérdida de resistencia a flexión de las trabes bajo un nivel de corrosión. Sin embargo, falta establecer una metodología de preparación para trabes de CR que serán sometidas a corrosión y bajo cargas sostenidas. De igual forma falta estudiar el comportamiento de la corrosión en edades tempranas de trabes de CR a escala natural. Se necesita tener en cuenta la resistencia, la rigidez y la ductilidad de las trabes al momento de proponer las dimensiones y el acero de refuerzo.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación se realizaron las siguientes actividades:

1. Diseño de trabes.
2. Obtención de propiedades de los materiales.
3. Diseño de la mezcla del concreto.
4. Construcción de trabes.
5. Monitoreo de la corrosión en trabes.
6. Ensaye de muestras de concreto endurecido
7. Diseño de los sistemas de carga e instrumentación.
8. Ensaye preliminar.
9. Aplicación de cargas sostenidas.

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

3.1 Diseño de trabes

Se consideraron 8 trabes de CR, 4 trabes patrón y 4 trabes con corrosión (Tabla 3.1). Se seleccionó el diámetro de las barras del acero de refuerzo longitudinal a tensión de las trabes, 10 mm y 13 mm. Se consideraron dimensiones de trabes de 15 x 30 x 350 cm (ancho x altura x largo).

Tabla 3.1 Nomenclatura de las trabes

Tipo	Diámetro de barra de AR longitudinal			
	10 mm (3/8")		13 mm(1/2")	
Patrón	P1-10-1	P1-10-2	P1-13-1	P1-13-2
Con corrosión	C1-10-1	C1-10-2	C1-13-1	C1-13-2

En la Figura 3.1 se presentan las condiciones de apoyo y carga de las trabes.

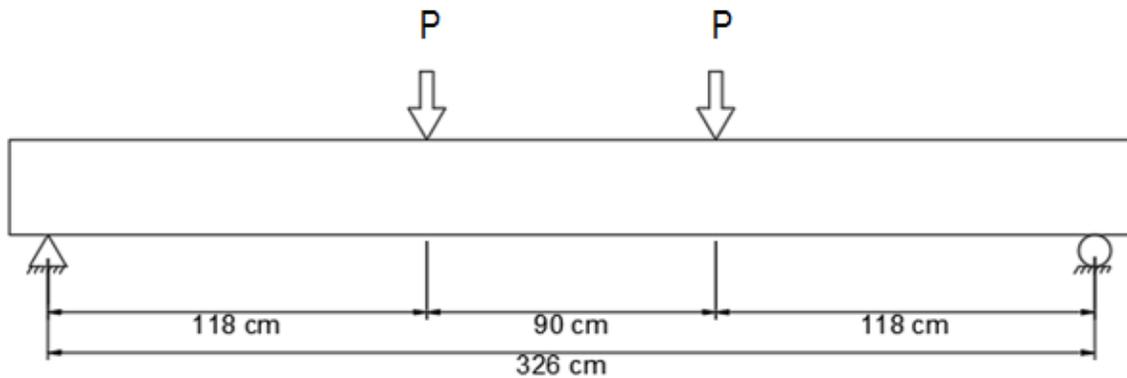


Figura 3.1 Condiciones de apoyo y carga de las trabes.

Se realizó el diseño estructural por flexión y cortante de las trabes. Se consideró una resistencia a compresión axial de diseño del concreto de 280 kg/cm^2 , dicha resistencia corresponde a un concreto Clase I con base en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC - 2004). El acero de refuerzo por flexión consistió en 2 barras corrugadas con un esfuerzo real de fluencia de 4544 kg/cm^2 . El acero de refuerzo transversal consistió en barras lisas con un esfuerzo nominal de fluencia de 2320 kg/cm^2 . El diseño por flexión se realizó utilizando las hipótesis fundamentales de la flexión. Para el acero de refuerzo por flexión se utilizó el modelo constitutivo propuesto por Rodríguez y Botero (1996). Para el concreto en compresión se utilizó el modelo propuesto por Kent y Park (1971). Se realizó un proceso iterativo donde se seleccionó una curvatura y se buscó el eje neutro que generó el equilibrio de la sección transversal de las trabes (Apéndice A). El diseño por cortante se realizó con base en los requisitos de las NTCC - 2004. Se seleccionó la cantidad del acero de refuerzo por flexión y transversal necesaria para inducir la falla por flexión, es decir, evitar la falla por cortante. La falla esperada en las trabes fue por aplastamiento del concreto. Las cantidades del acero de refuerzo por flexión y transversal de las trabes se presentan en la Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5. Las cantidades del acero de refuerzo por flexión en las trabes corresponden a cuantías del 24% y 43% de la máxima especificada en las NTCC - 2004 para trabes de CR. El momento de fluencia de las trabes con acero

de refuerzo por flexión de 10 mm y 13 mm fueron 156,492 kg-cm y 255,970 kg-cm, respectivamente. Con los aceros de refuerzo longitudinal a tensión y las dimensiones de la sección transversal de las traves que se seleccionaron se obtuvo una ductilidad de curvatura de 6.3 y 10.9, respectivamente.

Se calculó la deformación vertical al centro del claro de las traves con base en la Ecuación 3.1.

$$\Delta_{max} = \frac{P*a}{24*E*I} (3 * l^2 - 4 * a^2) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

P Carca puntual P .

a Distancia entre un apoyo y la carga P más cercana.

l Longitud entre puntos de apoyo de las traves.

E Módulo de elasticidad el concreto.

I Inercia transformada agrietada de la sección transversal de las traves.

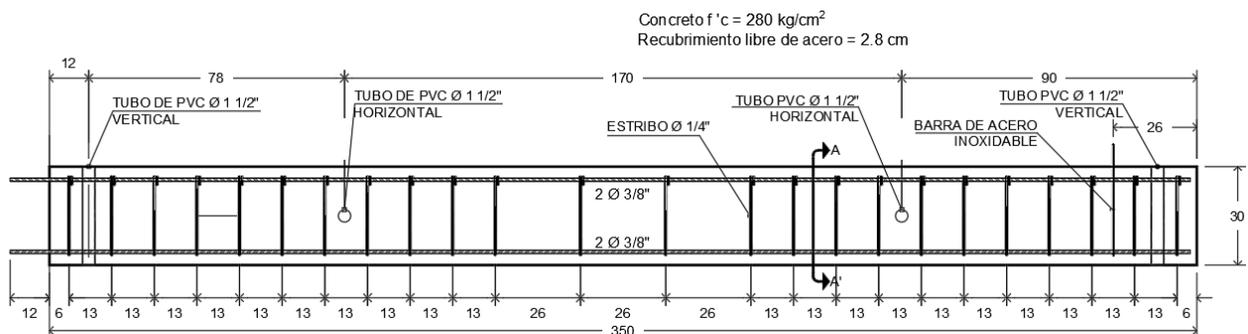


Figura 3.2 Sección longitudinal de las traves con barras de 3/8" de refuerzo longitudinal a tensión.

3.2 Obtención de propiedades de los materiales

Se realizaron pruebas al agregado grueso (grava) y al agregado fino (arena) para conocer sus propiedades y realizar el diseño de la mezcla de concreto.

Para el agregado fino se obtuvieron las siguientes propiedades:

- Análisis granulométrico (NMX-C-077-1997).
- Densidad específica y absorción (NMX-C-164-2002).

En la Figura 3.6 se presentan las cantidades de agregados finos retenidos en cada criba, en la Figura 3.7 se presenta el llenado del recipiente para obtener el peso volumétrico del agregado fino y en la Figura 3.8 se presenta la obtención de la densidad específica del agregado fino.



Figura 3.6 Muestra cribada de agregado fino.



Figura 3.7 Peso volumétrico del agregado fino.



Figura 3.8 Densidad específica del agregado fino.

Para el agregado grueso se obtuvieron las siguientes propiedades:

- Análisis granulométrico (NMX-C-077-1997).
- Peso volumétrico seco suelto y seco compacto (NMX-C-165-2004).
- Densidad específica y absorción (NMX-C-164-2002).
- Resistencia a la degradación por abrasión (NMX-C-196-1984).

En la Figura 3.9 se presentan las cantidades de agregado grueso retenido en cada criba y en la Figura 3.10 se presenta el llenado del recipiente para obtener los pesos volumétricos del agregado grueso.



Figura 3.9 Muestra cribada de agregado grueso.

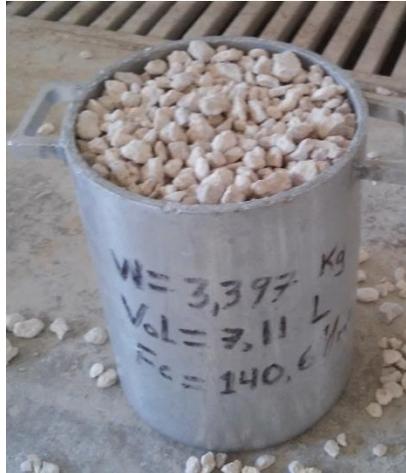


Figura 3.10 Peso volumétrico del agregado grueso.

Se realizaron 4 mezclas de concreto por cada par de trabes. Se obtuvieron muestras del agregado grueso, agregado fino y agua utilizados por cada par de trabes construidas para evaluar el contenido de cloruros:

- Agregado grueso (NMX-AA-073-SCFI-2001).
- Agregado fino (NMX-AA-073-SCFI-2001).
- Agua (ASTM-C-1218).

Se realizaron pruebas a la mezcla de concreto en estado fresco:

- Revenimiento (NMX-C-156-1997).
- Peso volumétrico (NMX-C-105-1987).

En la Figura 3.11 se presenta la prueba de revenimiento del concreto y en la Figura 3.12 se presenta el llenado del recipiente para obtener el peso volumétrico del concreto fresco.



Figura 3.11 Revenimiento del concreto.



Figura 3.12 Peso volumétrico del concreto.

Se realizaron 20 muestras cilíndricas de 15 x 30 cm. (Diámetro x altura), 32 muestras cilíndricas de 7.5 x 15 cm. (diámetro x altura), y 4 muestras en forma de trabes de 15 x 15 x 60 cm. (base x altura x longitud) para realizar las siguientes pruebas en concreto endurecido:

- Resistencia a la compresión axial del concreto (NMX-C-219-2005).
- Módulo de elasticidad de concreto (NMX-C-128-1997).
- Resistencia a la tensión por flexión del concreto (NMX-C-191-2008).
- Porosidad efectiva del concreto (ASTM C-642).
- Contenido de cloruros (ASTM-C-1152).

En la Figura 3.13 se presenta la elaboración de los cilindros de concreto de 15 cm de diámetro. En la Figura 3.14 se presenta la elaboración de los cilindros de concreto de 7.5 cm de diámetro y en la Figura 3.15 se presenta la elaboración de las trabes de concreto de 15 x 15 x 60 cm.



Figura 3.13 Cilindros de concreto de 15 cm de diámetro.



Figura 3.14 Cilindro de concreto de 7.5 cm de diámetro.



Figura 3.15 Trabe de concreto de 15x15x60 cm.

3.3 Diseño de la mezcla de concreto

Se realizó el diseño de la mezcla de concreto con base en el manual de Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal del Instituto Americano del Concreto (ACI 211.1). Se consideró una resistencia a la compresión axial del concreto de 280 kg/cm² (Tabla 3.2, Apéndice B).

Tabla 3.2 Datos para el diseño de la mezcla de concreto.

Resistencia a la compresión	280	kg/cm²
Revenimiento	10	cm
Tamaño Max. Agregado	20	mm
Densidad del Cemento	3.13	kg/lt
Inclusión de Aire	Con Aire	
Nivel de Exposición	Moderada	
Valor de Control de Calidad	15	
Relación A/C	0.46	
Resistencia Diseño (kg/cm ²)	300	kg/cm²

3.4 Construcción de traveses

La construcción de las traveses se realizó por un trabajador experimentado, y consistió en los siguientes pasos:

1. Se realizó la construcción y nivelación de una tarima de madera como superficie de apoyo.
2. Se realizó el habilitado de la cimbra de madera para las trabes (Figura 3.16).
3. Se realizó el habilitado del acero de refuerzo longitudinal y transversal. El acero de refuerzo longitudinal a compresión y el acero refuerzo transversal se pintaron utilizando un esmalte alquidático. Se utilizaron sujetadores de plástico para unir el acero refuerzo longitudinal al refuerzo transversal. Se colocó cinta aislante en cada zona de contacto entre el refuerzo longitudinal, el acero de refuerzo transversal y los sujetadores de plástico (Figura 3.17). Se colocó una barra de acero inoxidable en las trabes (Figura 3.2 y Figura 3.4). Dicha barra servirá como alternativa para inducir la corrosión por medio de la técnica de corriente impresa.
4. Se realizó la colocación del acero de refuerzo longitudinal y transversal dentro de las cimbras correspondientes (Figura 3.18).
5. Se colocaron tubos de PVC a los tercios de las trabes (Figura 3.3 y Figura 3.5). Dichos tubos se colocaron para la manipulación de las trabes.
6. Preparación y colocación de la mezcla de concreto. La preparación de la mezcla se realizó con una revolvedora con una capacidad de 150 litros. El concreto fue colocado y vibrado. La colocación del concreto en cada par de trabes fue en 4 capas debido a la capacidad de la revolvedora. El vibrado se realizó con una barra de punta redonda ya que se tuvo problemas con el vibrador eléctrico (Figura 3.19).

Se desmoldaron las trabes 16 horas después de su construcción. Se inició el curado de las trabes después de ser desmoldadas (NMX-C-160-1987). El curado consistió en mojar las trabes con agua de la red potable del laboratorio. El mojado consistió en ciclos de rociado de agua cada 2 horas durante el transcurso del día. El rociado se realizó durante un tiempo de 5 minutos por ciclo para cada trabe.



Figura 3.16 Construcción de la cimbra.



Figura 3.17 Aislamiento del acero de refuerzo longitudinal del transversal.



Figura 3.18 Colocado del armado del acero de refuerzo dentro la cimbra.



Figura 3.19 Colocación del concreto de las trabes.

3.5 Monitoreo de la corrosión en trabes

El monitoreo de la corrosión se dividió en 2 periodos. El primer periodo fue considerado desde la construcción de las trabes como el día 1 hasta el día 105. El segundo periodo fue a partir del día 133 al día 197 respecto a la construcción de las trabes. En el primer periodo se realizó el monitoreo de la resistividad eléctrica del concreto con el equipo Resipod. En el segundo periodo se realizó el monitoreo de la resistencia eléctrica del concreto, la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión con el equipo Gecor 6.

Los pasos a seguir para el monitoreo de la resistividad con el equipo Resipod (Figura 3.20) fueron los siguientes:

1. Se realizó el marcado de los sitios donde se colocarían las 4 puntas del sensor del equipo Resipod. Las marcas se realizaron en 3 lugares diferentes (centro y a los tercios) por cada cara lateral de las trabes. Las marcas fueron realizadas en lugares donde no se encontraba ningún acero de refuerzo que interfiera con el monitoreo.
2. Se realizó el mojado de las trabes con agua durante 45 minutos. El mojado consistió en realizar ciclos de mojado cada 5 minutos. Cada ciclo de mojado duraba 1 minuto. El agua que se utilizó fue tomada de la red potable del laboratorio.
3. Se realizó la toma de lecturas con el equipo Resipod en cada punto marcado.



Figura 3.20 Equipo Resipod

Los pasos a seguir para el monitoreo con el equipo Gecor 6 (Figura 3.21) son los siguientes:

1. Se realizó el mojado de las traves con agua durante 45 minutos. El mojado consistió en realizar ciclos de mojado cada 5 minutos. Cada ciclo de mojado duraba 1 minuto. El agua que se utilizó fue tomada de la red potable del laboratorio.
2. Se realizó la toma de lecturas con el equipo Gecor 6 en el centro del claro de las traves utilizando el sensor de disco. Cuando las traves ya se encontraban agrietadas, se evitó que el sensor se coloque sobre una grieta para obtener lecturas fiables.



Figura 3.21 Equipo Gecor 6

Se realizó la conversión de la resistencia eléctrica obtenida del equipo Gecor 6 a resistividad eléctrica con la Ecuación 3.2:

$$\text{Resistividad eléctrica} = 2 * R * D \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

R es la resistencia eléctrica obtenida con el Gecor 6.

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

Se utilizaron paños esponja de la marca “Scotch Brite®” para tomar las lecturas con los equipos Resipod y Gecor 6. El paño esponja fue colocado entre el sensor de los equipos y el área donde se realizó la lectura.

Se realizó el monitoreo de la resistividad eléctrica durante un periodo de 150 días respecto a la construcción de las trabes sin aplicarle alguna carga física o ambiental. Este periodo de tiempo se esperó con la finalidad de poder alcanzar la pasivación del acero de refuerzo longitudinal, sin embargo, se observó que la resistividad eléctrica se estableció en un valor promedio de 6 kΩ-cm. Dicho valor fue menor al valor seleccionado de 10 kΩ-cm que corresponde a la pasivación del acero de refuerzo longitudinal. Se decidió proceder con el ensaye preliminar de las trabes al observar que no se logró la pasivación del acero de refuerzo.

En la Tabla 3.3 se presenta la nomenclatura de las barras de refuerzo longitudinal a tensión de las trabes para el monitoreo de la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión. En la Figura 3.22 se presenta el detalle del posicionamiento de las barras de refuerzo.

Tabla 3.3 Nomenclatura de las barras de refuerzo longitudinal a tensión.

Trabe	Barra	Trabe	Barra
P1-10-1	B-1 (I)	P1-13-1	B-9 (I)
	B-2 (D)		B-10 (D)
C1-10-1	B-3 (I)	C1-13-1	B-11 (I)
	B-4 (D)		B-12 (D)
P1-10-2	B-5 (I)	P1-13-2	B-13 (I)
	B-6 (D)		B-14 (D)
C1-10-2	B-7 (I)	C1-13-2	B-15 (I)
	B-8 (D)		B-16 (D)

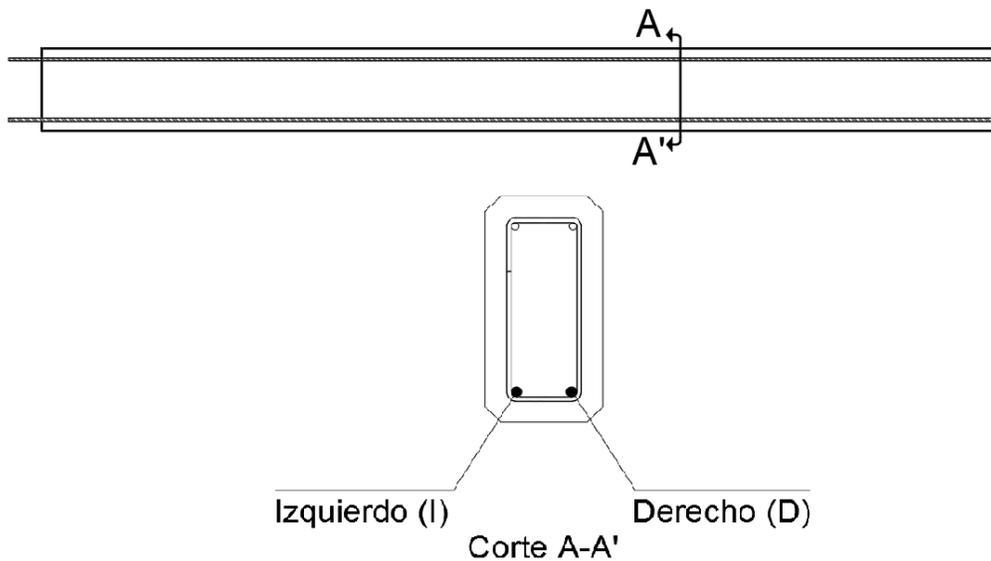


Figura 3.22 Detalle de posicionamiento de las barras de refuerzo en las trabes.

3.6 Ensaye de muestras de concreto endurecido

Para la obtención de las propiedades del concreto endurecido se realizaron los ensayos correspondientes que se presentan a continuación.

3.6.1 Resistencia a la compresión axial del concreto.

Para obtener la resistencia a la compresión axial (f'_c) del concreto se ensayaron 20 cilindros de 15 x 30 cm (diámetro x altura) en la maquina universal marca SATEC (60,000 kg). Se ensayaron 8 cilindros para obtener la resistencia del concreto y poder realizar las pruebas de módulo de elasticidad del concreto. En la Figura 3.23 se presenta una vista del ensaye de dichos cilindros.



Figura 3.23 Vista del ensaye de resistencia a compresión axial en cilindros de concreto.

3.6.2 Módulo de elasticidad del concreto

Para obtener el módulo de elasticidad (E) del concreto se ensayaron 12 cilindros de 15 cm de 15 x 30 cm (diámetro x altura) en la maquina universal marca SATEC (60,000 kg). Se ensayaron los cilindros hasta la falla una vez que se registraron los valores necesarios para el cálculo del módulo de elasticidad. En la Figura 3.24 se presenta una vista del ensaye de dichos cilindros.



Figura 3.24 Vista del ensaye del módulo de elasticidad del concreto.

3.6.3 Resistencia a la tensión por flexión del concreto

Para obtener la resistencia a la tensión por flexión del concreto (ft) se ensayaron 4 trabes de 15 x15 x 60 cm (ancho x altura x largo) en la maquina universal marca

SATEC (60,000 kg). En la Figura 3.25 se presenta una vista del ensaye de dichas trabes.



Figura 3.25 Vista del ensaye de resistencia a tensión por flexión del concreto.

3.6.4 Porosidad efectiva y contenido de cloruros

Para obtener la porosidad efectiva del concreto (ξ_e) se utilizaron 32 cilindros de 7.5 x 15 cm (diámetro x altura). Los cilindros fueron cortados a una altura de 5 cm para realizar el ensaye (Figura 3.26).



Figura 3.26 Cilindros cortados a 5 cm de altura.

El contenido de cloruros en el concreto se realizó de acuerdo a la norma ASTM – C - 1152. Los cilindros utilizados para la obtención de la porosidad efectiva fueron perforados con un rotomartillo utilizando una broca de 25 mm para extraer polvos los cuales sirvieron para analizar el contenido de cloruros. Para las perforaciones se realizaron los siguientes pasos para cada cilindro:

1. Se realizó la limpieza de la broca del rotomartillo.
2. Se realizó un agujero a 0.5 cm de profundidad.
3. Se realizó la limpieza de la broca del rotomartillo y del agujero en el cilindro.
4. Se colocó un papel para retener polvos.
5. Se perforó hasta 4 cm de profundidad cuidando que el polvo generado se quede sobre papel.
6. Se utilizó un mortero y un pilón para triturar el polvo.
7. Se utilizó la malla #50 para cernir el polvo.
8. El polvo que paso la malla fue embolsado y etiquetado.

Los polvos fueron analizados por medio del método del ion selectivo (ASTM – C - 1152). La evaluación de las soluciones obtenidas con los polvos se realizó con el equipo Conductronic (Figura 3.27).



Figura 3.27 Evaluación de las muestras con el equipo Conductronic.

3.7 Diseño de los sistemas de carga e instrumentación

Se utilizaron 2 sistemas de carga: un sistema de cargas verticales y otro de cargas sostenidas. El sistema de cargas verticales se utilizó para el ensaye preliminar de las traveses (Figura 3.28a), y el sistema de cargas sostenidas para el potensado de las traveses (Figura 3.28b).

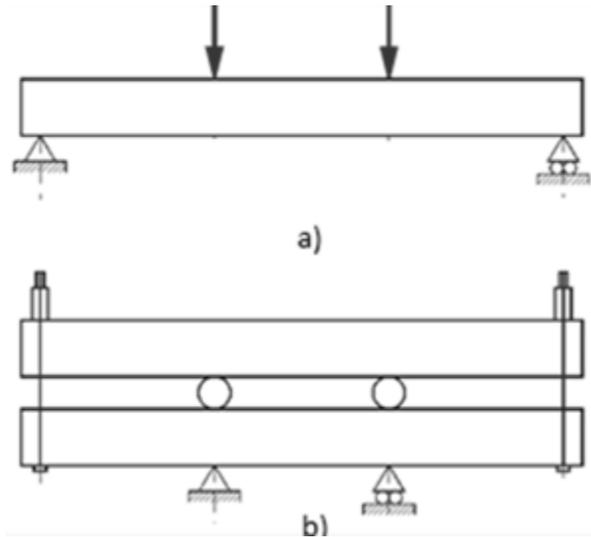


Figura 3.28 a) Sistema de cargas verticales y b) el sistema de carga sostenida.

El sistema de cargas verticales (Figura 3.29) consistió de un marco de acero de reacción, una viga de acero de repartición de carga y 2 bloques de concreto utilizados como apoyos. Se utilizaron 4 apoyos metálicos que consistieron de placas y barras redondas de acero que permitían la rotación de estos mismos. Para la aplicación de las cargas verticales se utilizó un actuador hidráulico de marca Enerpac (13,000 kg). Las cargas se midieron utilizando una celda de carga de marca Sensotec (CC-1, 5,000 kg). Dichas cargas se verificaron utilizando un transductor de presión marca Sensotec (700 kg/cm²).

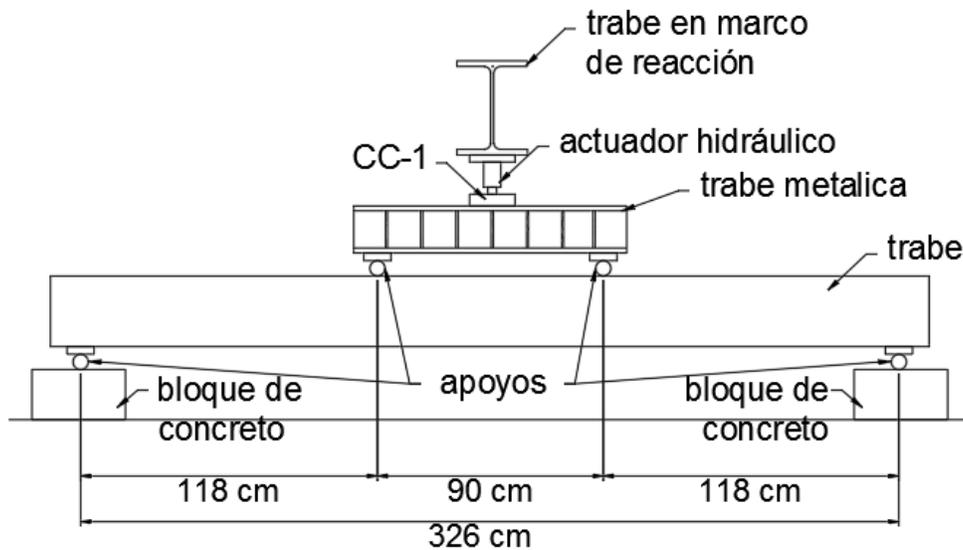


Figura 3.29 Sistema de cargas verticales.

Durante las pruebas, se midieron los desplazamientos en 2 puntos utilizando potenciómetros lineales de vástago (Figura 3.30):

- Potenciómetro lineal marca ETI de 50 mm (PL-1).
- Potenciómetro lineal marca ETI de 50 mm (PL-2).

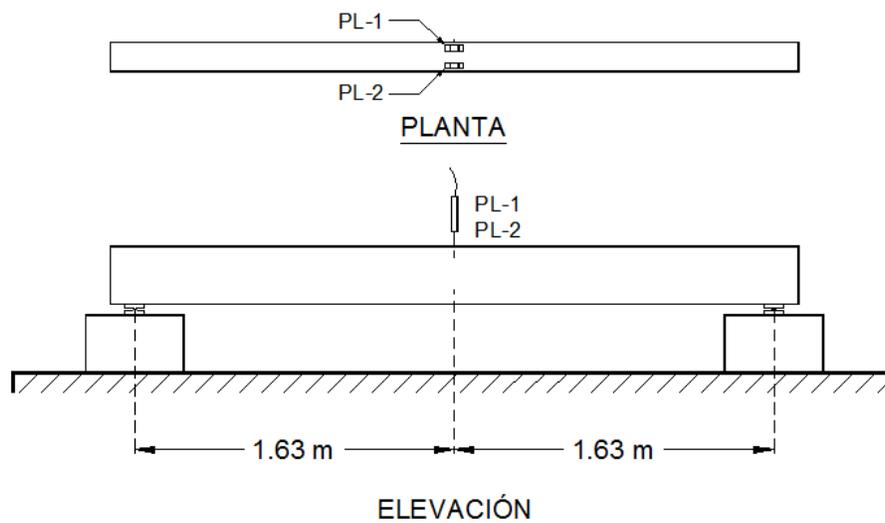


Figura 3.30 Ubicación de los potenciómetros lineales.

Para el sistema de cargas sostenidas (Figura 3.31) las traveses fueron colocadas en pares, una sobre otra. La trabe inferior es la que se someterá a corrosión (TC) y la trabe superior es la trabe patrón (TP). El sistema de cargas sostenidas consistió en

2 barras roscadas (13 mm), 4 tuercas (13 mm), 4 placas perforadas (10 x 10 0.95 cm), 2 apoyos de acero y 2 apoyos de concreto. Dicho sistema de carga simula un sistema de carga de 4 puntos, 2 apoyos y 2 cargas. Los apoyos metálicos utilizados consistieron de placas y barras redondas de acero que permitían la rotación de estos mismos. Las traveses fueron postensadas utilizando 2 silletas de acero y 2 actuadores hidráulicos marca Enerpac (10,000 kg). Las silletas se presentan en la Figura 3.32, las cuales consistieron, de una placa metálica (15x15x1.27 cm) y barras lisas metálicas (1.27x25 cm, diámetro x largo). Las cargas se monitorearon utilizando 2 celdas de carga marca Sensotec (CC-1 y CC-2, 5,000 kg). Para la verificación de dichas cargas se empleó un transductor de presión marca Sensotec (700 kg/cm²).

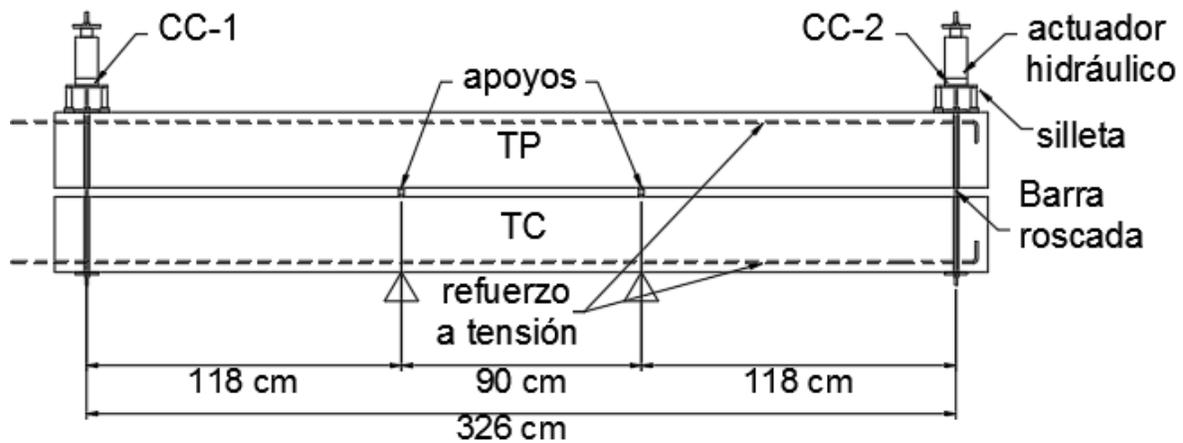


Figura 3.31 Sistema de carga sostenida.



Figura 3.32 Silleta metálica

Para el registro de las cargas y desplazamientos se utilizó un sistema de adquisición de datos de marca National Instruments, consistente en:

- Chasis SCXI-1000.
- Módulo 1520.
- Bloque Terminal SCXI-1314.
- Tarjeta DAQCard-6024E.
- Computadora portátil.

3.8 Ensaye preliminar

Previo a la aplicación de la carga sostenida, las traveses se ensayaron preliminarmente. El ensayo preliminar en las traveses se realizó 150 días después de su construcción. Dicho ensayo se realizó con el sistema de cargas verticales de 4 puntos (Figura 3.33). El ensayo fue bajo cargas incrementales monotónicas hasta alcanzar una carga que generó el 60% del momento de fluencia de las traveses. Durante el ensayo se registraron las cargas y los desplazamientos. Finalmente, se descargaron las traveses y se registraron los desplazamientos residuales.



Figura 3.33 Ensaye preliminar.

3.9 Aplicación de cargas sostenidas

Las traveses fueron postensadas en pares posteriormente al ensayo preliminar con el sistema de carga sostenida. El ensayo de postensado se realizó 190 días después de la construcción de las traveses (Figura 3.34). El ensayo fue bajo cargas

incrementales monotónicas hasta aplicar una carga que generó el 60% del momento de fluencia de las traveses.



Figura 3.34 Postensado de traveses.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Los resultados de las pruebas de materiales y los ensayos de las trabes se presentan a continuación.

4.1 Propiedades de los materiales

En la Tabla 4.1 y Figura 4.1 se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado fino.

Tabla 4.1 Granulometría del agregado fino.

Malla No.	Porcentaje que pasa		
	Obtenido(%)	Especificado en la NMX-C-077	
		L. Inferior (%)	L. Superior (%)
3/8	100	100	100
4	98	95	100
8	79	80	100
16	61	50	85
30	42	25	60
50	23	10	30
100	6	2	10
Módulo de Finura	3.1	2.62	3.85

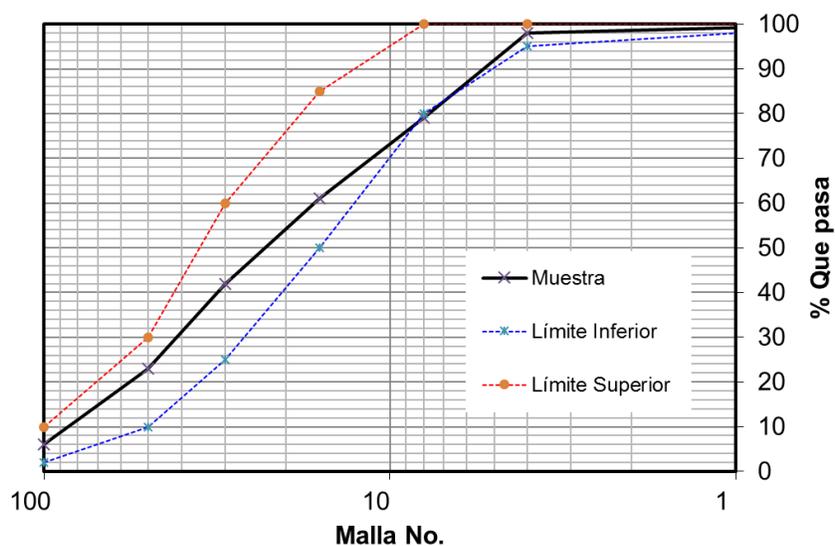


Figura 4.1 Curva granulométrica del agregado fino.

El Peso Volumétrico Seco Suelto del agregado fino fue de 1235.2 kg/cm³, su densidad específica de 2.28 y su porcentaje de absorción de 5.23%.

En la Tabla 4.2 y Figura 4.2 se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado grueso.

Tabla 4.2 Granulometría del agregado grueso.

Malla No.	Porcentaje que pasa		
	Obtenido (%)	Especificado en la NMX-C-077	
		L. Inferior (%)	L. Superior (%)
1"	100	100	100
3/4"	100	90	100
1/2"	70	20	55
3/8"	33	0	15
4	3	0	5
8	0	0	0

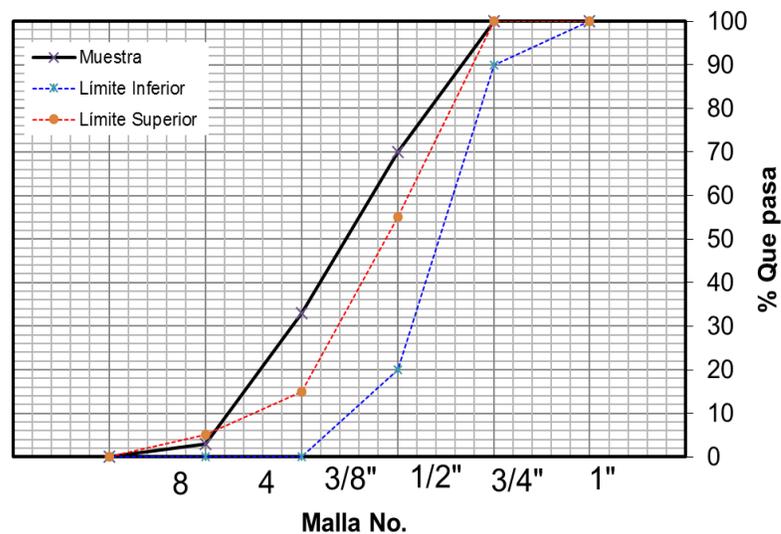


Figura 4.2 Curva granulométrica del agregado grueso.

El Peso Volumétrico Seco Suelto y Seco Compacto del agregado grueso fueron de 1084.2 kg/cm³ y 1114.2 kg/cm³ respectivamente, su densidad específica de 2.22 y su porcentaje de absorción de 8%. En la prueba de desgaste por abrasión del agregado grueso se obtuvo un 38% de pérdida.

4.2 Resultados de pruebas de concreto fresco y endurecido

En la Tabla 4.3 se presentan las propiedades del concreto en estado fresco.

Tabla 4.3 Propiedades del concreto fresco.

Trabes	Revenimiento (cm)	P.V. (kg/m ³)
P1-10-1	7.5	2093
C1-10-1		
P1-10-2	7.5	2081
C1-10-2		
P1-13-1	7.25	2075
C1-13-1		
P1-13-2	7.0	2067
C1-13-2		
Promedio	7.3	2079
CV	2.8	0.46

En la Tabla 4.4 se presentan las propiedades del concreto endurecido. La resistencia a compresión axial del concreto promedio fue cercana a la resistencia de diseño para la mezcla de concreto de 280 kg/cm².

Tabla 4.4 Propiedades del concreto endurecido.

Trabes	f'c (kg/cm ²)	ft (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
P1-10-1	267	34	184,656
C1-10-1			
P1-10-2	285	34	183,971
C1-10-2			
P1-13-1	279	35	184,290
C1-13-1			
P1-13-2	272	35	185,336
C1-13-2			
Promedio	275	35	184,563
CV	2.48	0.23	0.27

4.3 Comportamiento de las traveses a flexión

En la Figura 4.3 se presentan las curvas carga – desplazamiento vertical de las traveses P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1-10-2. Las cargas corresponden a las cargas totales aplicadas sobre las traveses y los desplazamientos fueron obtenidos de la parte central de éstas. La máxima carga promedio aplicada en las traveses fue de 1515 kg y un desplazamiento máximo promedio de 0.62 cm.

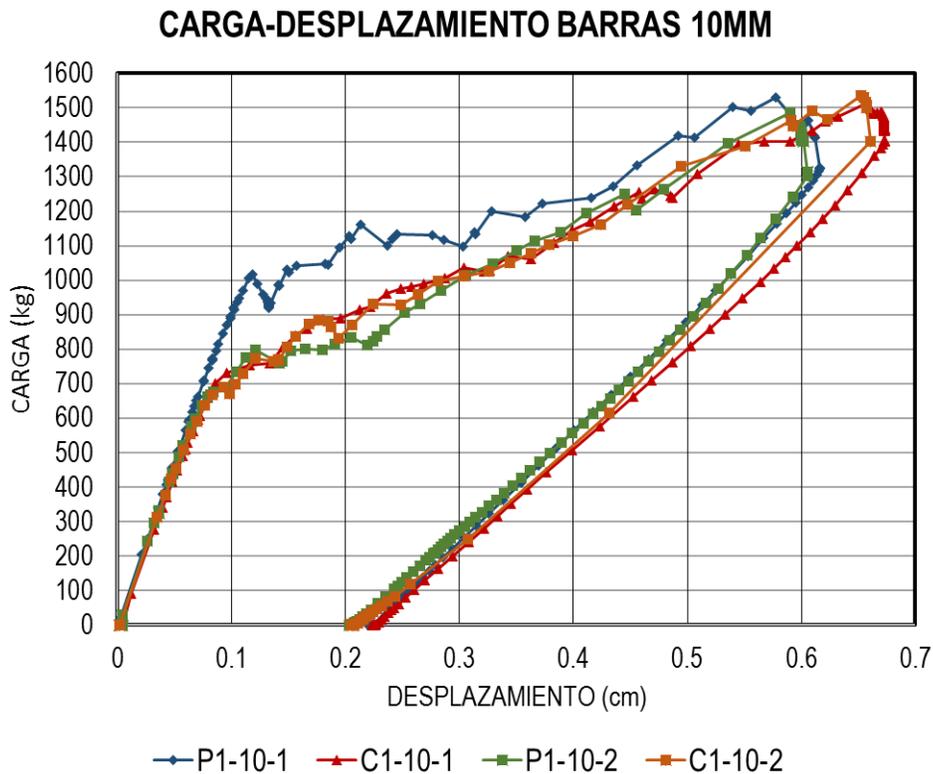


Figura 4.3 Curvas Carga-Desplazamiento de traveses P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1-10-2.

En la Tabla 4.5 se presenta la rigidez inicial (K_0), la rigidez tangencial (K_{agr}) y la relación de K_{agr} entre K_0 de las traveses P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1 – 10 – 2.

Tabla 4.5 Rigidez inicial y tangencial de las traves P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1-10-2.

Traves	Ko experimental (Kg/cm)	Kagr experimental (Kg/cm)	Kagr/Ko (%)
P1-10-1	8143.04	1238.86	15
C1-10-1	8462.00	1361.28	16
P1-10-2	8458.16	1591.65	18
C1-10-2	8347.43	1458.34	17
Promedio	8352.66	1412.53	17
CV	1.55	9.16	8.11

En la Figura 4.4 se presentan las curvas carga – desplazamiento vertical de las traves P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2. Las cargas corresponden a las cargas totales aplicadas sobre las traves y los desplazamientos fueron obtenidos de la parte central de las traves. La máxima carga promedio aplicada en las traves fue de 2839 kg y un desplaza máximo promedio de 0.89 cm.

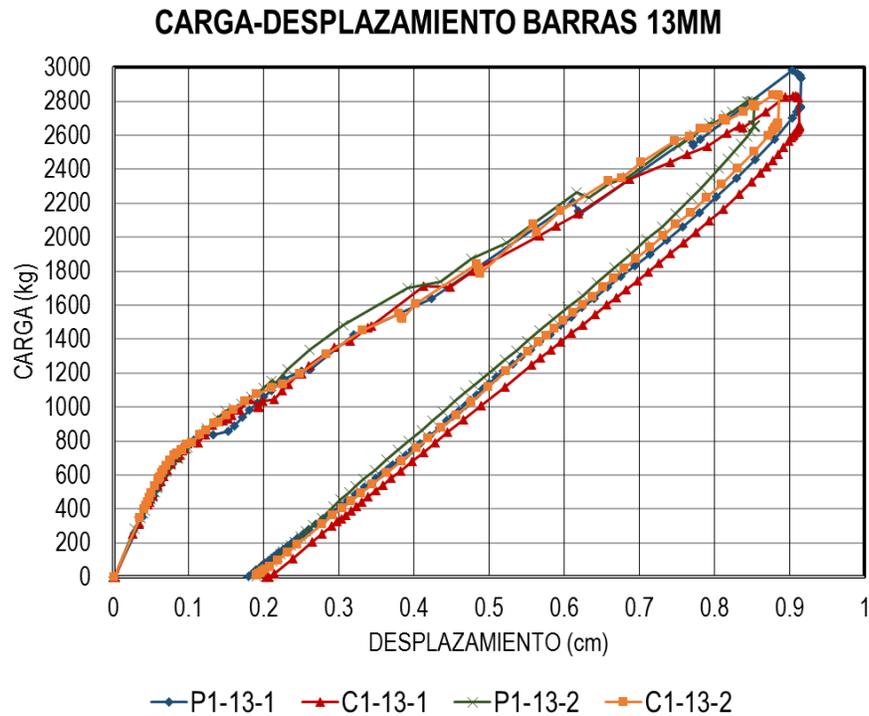


Figura 4.4 Curvas Carga-Desplazamiento de traves P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2.

En la Tabla 4.6 se presenta la rigidez inicial experimental (K_o), la rigidez tangencial experimental (K_{agr}) y la relación de K_{agr} entre K_o de las traveses P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2.

Tabla 4.6 Rigidez inicial y tangencial de las traveses P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2.

Traveses	K_o (Kg/cm)	K_{agr} (Kg/cm)	K_{agr}/K_o (%)
P1-13-1	7855.87	2681.06	34
C1-13-1	8201.90	2535.11	30
P1-13-2	8163.93	2637.57	32
C1-13-2	8479.82	2636.85	31
Promedio	8175.38	2622.65	32
CV	2.70	2.04	4.00

Se presenta en la Tabla 4.7 y la Tabla 4.8 los desplazamientos verticales experimentales (Δ_{emax}) y analíticos (Δ_{amax}) al centro del claro de las traveses.

Tabla 4.7 Desplazamientos verticales experimentales y analíticos de las traveses P1-10-1, C1-10-1, P1-10-2 y C1-10-2.

Traveses	Δ_{emax} (cm)	Δ_{amax} (cm)
P1-10-1	0.57	0.69
C1-10-1	0.65	0.69
P1-10-2	0.59	0.69
C1-10-2	0.65	0.70
Promedio	0.61	0.69
CV	5.80	0.62

Tabla 4.8 Desplazamientos verticales experimentales y analíticos de las P1-13-1, C1-13-1, P1-13-2 y C1-13-2.

Trabes	Δ_{max} (cm)	Δ_{amax} (cm)
P1-13-1	0.91	0.83
C1-13-1	0.91	0.79
P1-13-2	0.85	0.78
C1-13-2	0.88	0.80
Promedio	0.88	0.8
CV	2.80	2.33

4.4 Contenido de cloruros

En la Tabla 4.9 se presenta el contenido de cloruros promedio en el agregado grueso, agregado fino y el agua utilizados para preparar la mezcla de concreto de las trabes. En la Tabla 4.10 se presenta el porcentaje de partes por millón del contenido de cloruros promedio del concreto endurecido, el porcentaje del contenido de cloruros promedio por peso del concreto endurecido y la porosidad efectiva del concreto. En el Apéndice C se presentan los valores sin promediar del contenido de cloruros de agregado grueso, el agregado fino, el agua y el concreto endurecido; además, los valores sin promediar de la porosidad efectiva del concreto endurecido.

Tabla 4.9 Contenido de cloruros de los materiales utilizados en las mezclas de concreto.

Trabes	Cl en agregado grueso (ppm)	Cl en agregado fino (ppm)	Cl en agua (ppm)	Total (ppm)
P1-10-1	32.08	27.93	161.79	221
C1-10-1				
P1-10-2	32.71	29.06	178.21	239
C1-10-2				
P1-13-1	31.45	26.92	164.41	222
C1-13-1				
P1-13-2	57.76	30.25	162.20	250
C1-13-2				
Promedio	38.50	28.54	166.66	233
CV	28.91	4.35	4.04	5.12

Tabla 4.10 Contenido de cloruros promedio en el concreto endurecido.

Trabes	%Cl- ppmconcreto	% por peso de cemento	ξ_e (%)
P1-10-1	0.03	0.14	13
C1-10-1			
P1-10-2	0.03	0.15	13
C1-10-2			
P1-13-1	0.04	0.19	12
C1-13-1			
P1-13-2	0.03	0.15	11
C1-13-2			
Promedio	0.03	0.16	12.25
CV	13.32	12.20	4.50

4.5 Monitoreo de la corrosión

Se utilizó el equipo Gecor 6 para realizar el monitoreo de la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y la resistividad eléctrica en las trabes. Por otra parte, también se utilizó el equipo Resipod para realizar el monitoreo de la resistividad eléctrica en las trabes.

4.5.1 Velocidad de corrosión

En la Tabla 4.11 se presentan las velocidades de corrosión de las trabes monitoreadas con el equipo Gecor 6 en un periodo de 64 días. Como se observa en la Tabla 4.11 se tuvieron lecturas que de acuerdo con el Manual de la Red DURAR se tiene un nivel de corrosión moderado. En la Figura 4.5 se presentan las curvas de velocidad de corrosión – tiempo.

Tabla 4.11 Velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Días Barra	133	141	148	155	162
B-1	0.176	0.225	0.25	0.190	0.173
B-2	0.537	0.185	0.191	0.361	0.274
B-3	0.703	0.306	0.180	0.222	0.738
B-4	0.128	0.148	0.558	0.328	0.591
B-5	0.115	0.344	0.300	0.213	0.373
B-6	0.280	0.225	0.437	0.528	0.540
B-7	0.147	0.144	0.222	0.198	0.411
B-8	0.408	0.314	0.266	0.386	0.408
B-9	0.412	0.831	0.405	0.117	0.207
B-10	0.446	0.235	0.071	0.202	0.285
B-11	0.556	0.560	0.164	0.433	0.585
B-12	0.339	0.247	0.306	0.195	0.626
B-13	0.424	0.845	0.383	0.334	0.401
B-14	0.533	0.372	0.537	0.278	0.491
B-15	0.283	0.775	0.494	0.548	0.573
B-16	0.51	0.264	0.326	0.614	0.636

Días Barra	169	176	183	190	197
B-1	0.215	0.315	0.199	0.125	0.791
B-2	0.281	0.276	0.189	0.191	0.833
B-3	0.314	0.268	0.534	0.381	0.548
B-4	0.244	0.427	0.310	0.530	0.383
B-5	0.255	0.457	0.402	0.167	0.721
B-6	0.169	0.367	0.243	0.405	0.688
B-7	0.208	0.360	0.623	0.224	0.356
B-8	0.297	0.466	0.524	0.268	0.788
B-9	0.423	0.336	0.358	0.353	0.236
B-10	0.176	0.225	0.182	0.181	0.623
B-11	0.278	0.496	0.112	0.216	0.425
B-12	0.326	0.234	0.134	0.209	0.412
B-13	0.233	0.652	0.355	0.449	0.523
B-14	0.286	0.497	0.101	0.231	0.458
B-15	0.246	0.741	0.571	0.322	0.216

B-16	0.340	0.325	0.436	0.567	0.258
------	-------	-------	-------	-------	-------

VELOCIDAD DE CORROSIÓN (i_{corr}) VS TIEMPO

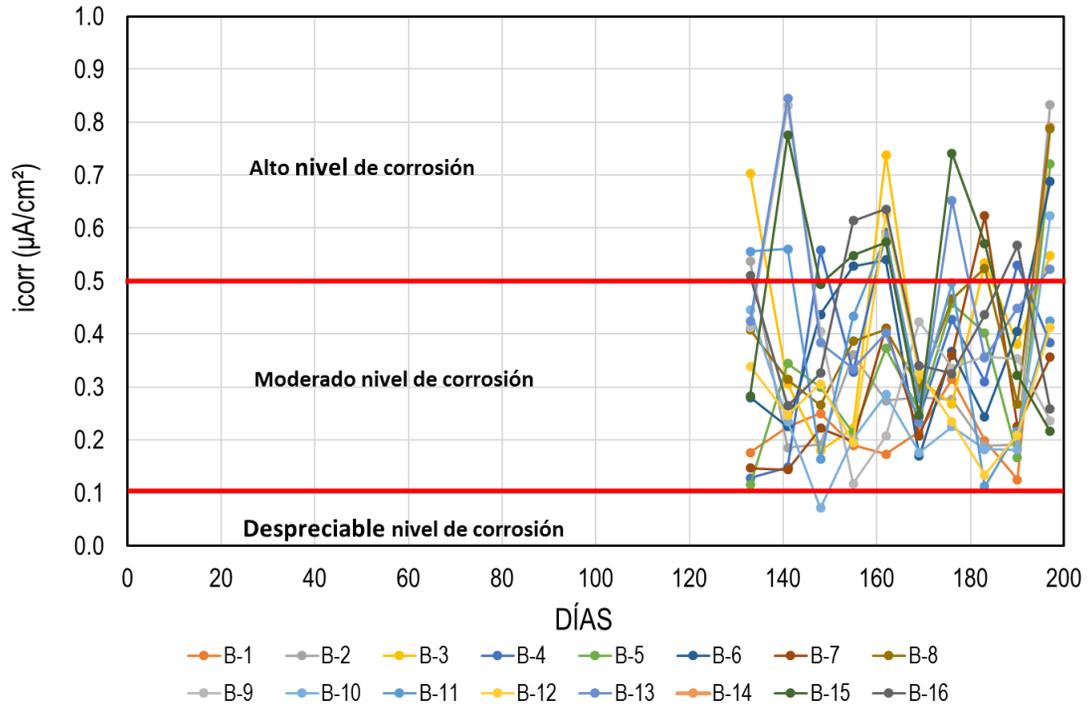


Figura 4.5 Curvas de la velocidad de corrosión ($\mu A/cm^2$).

4.5.2 Potencial de corrosión

En la Tabla 4.12 se presentan las lecturas del potencial de corrosión de las trabes con el equipo Gecor 6 en un periodo de 64 días. Como se observa en la Tabla 4.12 se tuvieron lecturas que de acuerdo con el Manual de la Red DURAR se tiene un 10% de probabilidad de que la corrosión se encuentre activa. En la Figura 4.6 se presentan las curvas del potencial de corrosión – tiempo.

Tabla 4.12 Potencial de corrosión (mV).

Días	133	141	148	155	162
Barra					
B-1	-187.4	-202.5	-192.4	-186.9	-188.1
B-2	-163.5	-205.6	-185.7	-141.1	-154.9
B-3	-156.2	-156.1	-157.4	-116.3	-132.4
B-4	-174.4	-188.3	-186.8	-148.2	-155.2
B-5	-170.5	-166.5	-195.0	-151.3	-151.2
B-6	-163.5	-173.5	-159.2	-166.0	-127.6
B-7	-155.8	-135.7	-195.9	-185.3	-174.6
B-8	-204.2	-176.4	-212.1	-193.2	-193.4
B-9	-165.2	-161.2	-163.2	-80.9	-152.1
B-10	-206.0	-148.3	-177.8	-190.4	-175.4
B-11	-185.9	-193.2	-169.2	-142.4	-175.0
B-12	-223.7	-148.2	-187.9	-178.8	-171.3
B-13	-165.8	-181.2	-139.2	-127.9	-173.7
B-14	-168.6	-148.2	-147.3	-149.4	-180.2
B-15	-174.6	-181.2	-185.7	-146.6	-198.6
B-16	-164.2	-161.2	-157.5	-137.9	-185.5

Días	169	176	183	190	197
Barra					
B-1	-162.5	-162.5	-162.5	-162.5	-146.5
B-2	-188.1	-188.1	-188.1	-188.1	-153.4
B-3	-154.9	-154.9	-154.9	-154.9	-137.1
B-4	-132.4	-132.4	-132.4	-132.4	-135.2
B-5	-155.2	-155.2	-155.2	-155.2	-129.9
B-6	-151.2	-151.2	-151.2	-151.2	-134.9
B-7	-127.6	-127.6	-127.6	-127.6	-117.5
B-8	-174.6	-174.6	-174.6	-174.6	-153.3
B-9	-193.4	-193.4	-193.4	-175.1	-177.0
B-10	-152.1	-152.1	-152.1	-168.5	-136.6
B-11	-175.4	-175.4	-175.4	-163.8	-136.7
B-12	-175.0	-175.0	-175.0	-153.2	-144.4
B-13	-171.3	-171.3	-171.3	-183.4	-166.1
B-14	-173.7	-173.7	-173.7	-167.3	-188.9
B-15	-180.2	-180.2	-180.2	-149.7	-148.0
B-16	-198.6	-198.6	-198.6	-136.0	-149.4

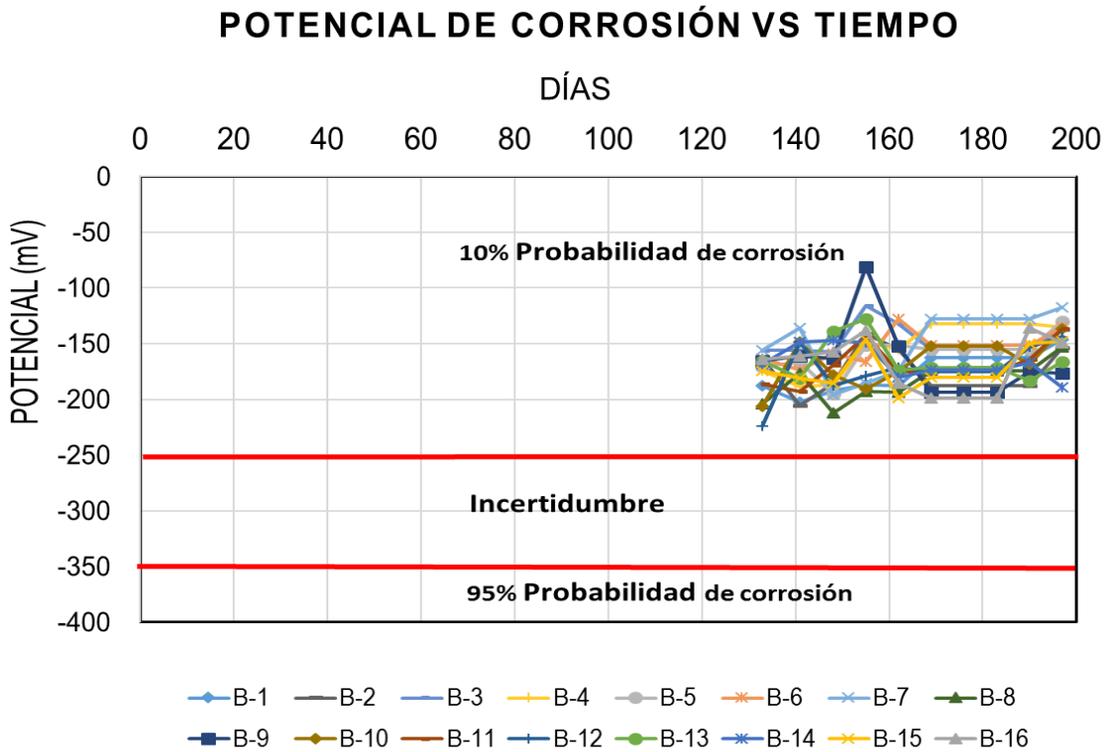


Figura 4.6 Curvas del potencial de corrosión (mV).

4.5.3 Resistividad eléctrica.

En la Tabla 4.13 se presentan las lecturas de la resistividad eléctrica promedio de las traveses con el equipo Gecor 6 y el Resipod en un periodo de 197 días. Como se observa en la Tabla 4.13 se tuvieron lecturas que de acuerdo con el Manual de la Red DURAR se tiene alto riesgo de corrosión. En la Figura 4.7 se presentan las curvas de la resistividad eléctrica – tiempo.

Tabla 4.13 Resistividad eléctrica del concreto de las traveses ($k\Omega\text{-cm}$).

Días	7	14	21	28	35	42	49	56
Barra								
P1-10-1	0.32	2.20	3.20	4.52	6.07	7.00	9.80	14.10
C1-10-1	0.30	2.08	3.13	4.57	6.08	8.97	9.80	13.00
P1-10-2	0.28	2.20	3.00	4.03	5.82	7.60	9.50	11.50
C1-10-2	0.32	2.08	3.30	4.67	4.50	8.00	12.00	11.20
P1-13-1	0.30	2.20	2.20	5.60	5.50	7.50	9.20	9.80
C1-13-1	0.28	2.08	2.85	6.13	5.93	7.20	9.50	10.00
P1-13-2	0.20	2.20	3.07	6.28	6.23	6.50	8.10	7.50
C1-13-2	0.33	2.08	3.50	4.37	6.12	9.03	10.65	7.80

Días	67	70	77	84	91	98	105	133
Barra								
P1-10-1	9.00	7.50	6.07	5.50	6.58	6.97	6.50	4.62
C1-10-1	9.20	7.00	6.08	5.93	6.50	8.17	7.02	5.88
P1-10-2	9.20	7.60	5.82	5.40	5.07	5.07	4.70	4.095
C1-10-2	9.00	7.90	6.10	5.73	5.92	5.92	4.50	3.99
P1-13-1	9.50	6.50	5.50	6.05	4.63	5.22	5.10	4.935
C1-13-1	10.50	8.00	5.93	6.02	5.60	5.53	5.35	5.25
P1-13-2	7.20	7.50	6.23	6.12	5.95	5.90	5.82	5.775
C1-13-2	7.50	8.00	6.12	5.53	5.97	5.65	5.51	5.355

Días	141	148	155	162	169	176	183	190	197
Barra									
P1-10-1	4.515	4.935	4.83	5.25	5.25	5.565	6.09	4.83	6.3
C1-10-1	4.83	4.62	4.515	4.83	6.93	6.195	7.455	5.67	8.61
P1-10-2	4.83	5.145	4.305	5.145	5.775	5.145	6.72	6.405	8.19
C1-10-2	4.515	4.515	4.305	4.83	6.51	5.88	5.985	5.565	6.09
P1-13-1	4.095	4.095	3.99	5.04	5.565	5.565	6.93	5.775	5.88
C1-13-1	4.62	5.27	4.83	4.095	5.775	6.405	6.195	4.515	5.25
P1-13-2	4.41	5.04	5.145	5.355	5.985	6.3	5.775	4.095	5.565
C1-13-2	4.305	4.83	4.515	4.515	5.67	6.09	5.04	5.145	4.935

RESISTIVIDAD VS TIEMPO

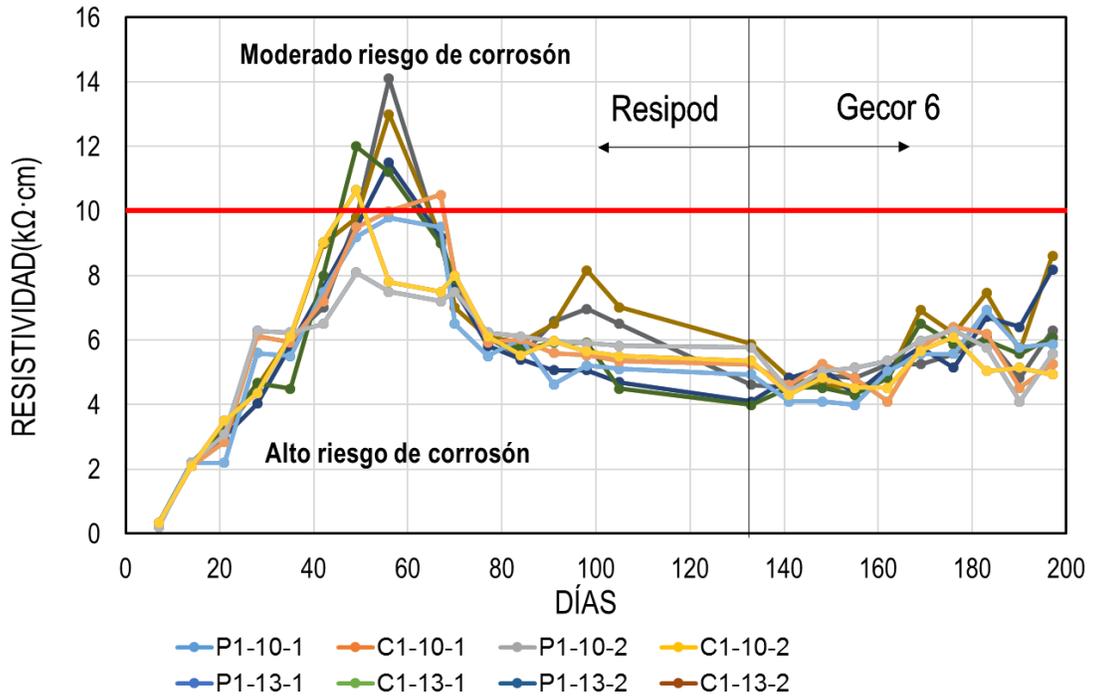


Figura 4.7 Curvas de la resistividad eléctrica del concreto (kΩ·cm).

CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presenta la discusión de los resultados en términos estructurales y de durabilidad. En términos estructurales se discute sobre el comportamiento de las trabes sujetas a flexión en términos de desplazamientos y rigidez. En términos de durabilidad se discuten sobre el nivel de corrosión de las trabes en términos de velocidades de corrosión, potenciales de corrosión, resistividad eléctrica del concreto y el contenido de cloruros.

5.1 Discusión de los resultados del ensaye preliminar de las trabes

Se realizó el ensaye de 8 trabes, de las cuales 4 trabes tenían 2 barras acero de refuerzo longitudinal a tensión de 10 mm de diámetro y las otras 4, 2 barras de 13 mm de diámetro. Se aplicó a las trabes una carga que les generó el 60% del momento de fluencia. Para el caso de las trabes con barras de 10 mm se registró un máximo desplazamiento promedio de 0.62 cm, el cual fue muy similar al desplazamiento analítico de 0.69 cm. El desplazamiento residual promedio de las trabes fue de 0.21 cm. Por otro lado, para las trabes con acero de refuerzo longitudinal a tensión con 13 mm se registró un máximo desplazamiento promedio de 0.88 cm, el cual fue muy similar al desplazamiento analítico de 0.78 cm. El desplazamiento residual promedio de las trabes fue de 0.19 cm. Para el cálculo del máximo desplazamiento analítico se utilizó la inercia transformada agrietada de las trabes.

Se realizó el cálculo de la rigidez inicial (K_0) y la rigidez tangencial (K_{agr}) de las trabes (Tabla 4.5 y Tabla 4.6). La rigidez inicial se definió como la rigidez secante al punto de agrietamiento. La rigidez tangencial se definió como la pendiente de la línea de tendencia de los puntos obtenidos después del agrietamiento de las trabes. Las trabes con barras de 10 mm tuvieron una pérdida de rigidez en promedio de 83% después que dichas trabes se agrietaran. Por otro lado, las trabes con barras de 13 mm tuvieron una pérdida de rigidez en promedio de 68% después que dichas trabes se agrietaran.

5.2 Discusión de los resultados de durabilidad

En términos de durabilidad, se espera que para una estructura de concreto reforzado recién construida y que no han sido expuestas a algún agente agresivo, muestren una característica de pasivación en su acero de refuerzo. Los factores que influyen para poder deducir si el acero de refuerzo de las trabes esta pasivado son la resistividad eléctrica, el potencial de corrosión, la velocidad de corrosión, la calidad de los materiales de la mezcla de concreto, el contenido de cloruros, entre otros. Sin embargo, cuando las trabes son sujetas a cargas de servicios pueden ocurrir fenómenos con los cuales no se tiene conocimiento y esto puede incluir tener pares galvánicos en las trabes u obtener valores engañosos en el monitoreo de la corrosión (Kahhaleh, *et al.* 1998).

Para esta investigación, las trabes construidas sin cargas físicas o ambientales. Durante el tiempo entre la construcción de las trabes y la aplicación de la carga sostenida, se realizó el registro y el análisis de parámetros electroquímicos y el contenido de cloruros de las trabes. Dicho periodo se esperó con la finalidad de conocer el comportamiento de los parámetros en esta etapa inicial en trabes de escala natural.

El contenido de cloruros promedio en el concreto endurecido fue de 0.18%, dicho valor supera los criterios mínimos de contenido de cloruros, lo cual nos indica que la corrosión en las trabes se empezó a desarrollar desde la construcción de las trabes o poco tiempo después. Los resultados que se obtuvieron indican que el contenido de cloruro procedente del concreto esta cercanos al umbral de corrosión. Tener un contenido de cloruros cercano o mayor de dicho umbral representa la posible existencia de una corrosión activa y que se ha perdido la capa de pasivación del acero de refuerzo. La resistividad eléctrica resulto afectada por el contenido de cloruros, situación similar a la encontrada para sulfatos por M. Saleem, *et al.* 1996, ya que durante su monitoreo se midieron valores cercanos a 6 k Ω - cm que no lograron seguir subiendo. Se le atribuye a la propiedad higroscópica de los cloruros la razón por la que las trabes no pudieron secarse y no permitió que la capa de pasivación se forme, además de que mantuvo los valores de resistividad eléctrica

menores a 10 k Ω -cm y facilitó el movimiento de los iones de cloruros que ya contenían las trabes (P. Castro, *et al.* 2013). Como se puede observar en la Figura 4.5, el tiempo de monitoreo entre el día 1 y el día 56 la resistividad llegó hasta un valor máximo de 14 k Ω -cm. Dicho tiempo correspondió a la temporada de primavera donde el microambiente caliente del laboratorio permitió el secado de las trabes y por ende el aumento de la resistividad de las trabes. Posterior a este tiempo se presentó un descenso de la resistividad hasta un valor promedio de 6 k Ω -cm donde se ha mantenido hasta el momento. Se observó también una tendencia de la resistividad a aumentar y disminuir debido a los cambios de humedad y la temperatura del microambiente del laboratorio por el cambio de estaciones del año que han pasado. La porosidad efectiva obtenida, aunque correspondía a la del diseño de la mezcla, en términos de durabilidad es una mala calidad de concreto al estar en un valor del 12.64%. La velocidad de corrosión resultó estar en la zona de transición de nivel moderado de corrosión, el cual corresponde a un nivel donde la capa de pasivación ya se perdió, pero la corrosión se está dando a una velocidad lenta. Lo que llama mucho la atención es que ante las condiciones consistentes entre las técnicas de monitoreo de corrosión, los valores del potencial de corrosión se encuentran en la zona del 90% de probabilidad de no corrosión, lo cual no es común observar para los valores de velocidad de corrosión y resistividad de corrosión registrados simultáneamente (C. Alonso, *et al.* 2000, Karla Hornbostel, *et al.* 2013). Sin embargo, haciendo una interpretación estricta del significado de los criterios del potencial de corrosión, parece obvio que el 90% de la probabilidad de no corrosión no es el que se aplica sino el 10% de probabilidad de que si exista corrosión. Lo que no se pudo encontrar hasta el momento del cierre de la tesis, es la razón de cuáles son las circunstancias para poder considerar que se aplica el criterio de 10% de probabilidad de corrosión y no el 90% de probabilidad de no corrosión.

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se realizaron los trabajos preliminares para el estudio de la corrosión en trabes de CR que serán sometidas a cargas sostenidas. Se seleccionó el diámetro de las barras del acero de refuerzo longitudinal a tensión de las trabes, 10 mm y 13 mm. Se realizó el estudio de 8 trabes de CR e escala natural. Se realizó el monitoreo de la corrosión en las trabes desde la finalización de su construcción hasta el postensado de las mismas. Se analizó la porosidad efectiva y el contenido de cloruros del concreto de las trabes. Con base a lo antes mencionado se presentan las conclusiones a continuación:

1. Las trabes con barras de refuerzo longitudinal a tensión de 10 mm tuvieron una pérdida de rigidez en promedio de 83% después que dichas trabes se agrietaran mientras que las trabes con barras de 13 mm tuvieron una pérdida de rigidez en promedio de 68%.
2. Las trabes con barra de refuerzo longitudinal a tensión de 10 mm tuvieron un desplazamiento residual de 0.21 cm mientras que las trabes con barras de 13 mm tuvieron un desplazamiento residual de 0.19 cm.
3. Se observó que a mayor área de refuerzo longitudinal a tensión menor será la reducción de la rigidez, por otro lado, a menor área de refuerzo mayor serán los desplazamientos residuales.
4. El contenido de cloruros promedio del material usado para la preparación de cada mezcla de concreto (agregado grueso, agregado fino y agua) fue de 233 ppm.
5. La porosidad efectiva promedio de 12.5% del concreto indicó que el concreto de las trabes pertenece a un concreto de calidad moderada.
6. El contenido de cloruros libres, de **, en el concreto de las trabes superó los valores que sugiere la norma ASTM C 1218. Por lo tanto, existe una alta probabilidad de que el fenómeno de corrosión este sucediendo desde la construcción de las trabes.
7. El monitoreo de la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistividad eléctrica a edades tempranas de las trabes se mantienen cercanos

a un valor determinado independientemente del diámetro de las barras refuerzo. La velocidad de corrosión se estableció cerca de $0.36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, el potencial de corrosión se estabiliza cerca de 165 mV y la resistividad eléctrica en $5.7 \text{ k}\Omega\text{-cm}$.

8. La velocidad de corrosión y la resistividad eléctrica en las trabes indicaron que el acero de refuerzo se encontraba en un nivel de corrosión elevado y un alto riesgo de corrosión respectivamente.
9. Los potenciales de corrosión en las trabes se mantuvieron prácticamente constantes desde el inicio de su monitoreo. Dichos valores obtenidos se mantuvieron en una probabilidad el 10% de corrosión activa.

RECOMENDACIONES

Se hacen las siguientes recomendaciones para la continuación del proyecto al que pertenece esta tesis o para proyectos similares:

1. Verificar periódicamente que la carga sostenida de las traveses sea la misma que se aplicó en esta tesis (60% del momento de fluencia). El tiempo recomendado es de un mes.
2. Utilizar un método de corrosión acelerada en las traveses por medio de la aplicación de una solución salina (3.5% NaCl del peso del agua) con ciclos de 24 horas de mojado y 24 horas de secado.
3. Definir un método simple y repetitivo para la aplicación de la solución salina en las traveses. En el proceso de mojado se recomienda utilizar franelas y nylon para mantener la humedad. El método debería ser establecida con el apoyo de expertos en la materia de corrosión en elementos de CR. Además, se debe llevar un registro de la humedad y la temperatura ambiente del laboratorio, así como, la humedad de las traveses durante los ciclos de mojados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cordero, M., 2005. *Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a la corrosión por cloruros.*, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería de la Construcción.
2. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. & Tanesi, J., 2004. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Primera ed. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
3. M. Kashani, M., J. Crewe, A. & A. Alexander, N., 2012. Stress-strain response of corroded reinforcing bars under monotonic and cyclic loading. *LISBOA WCEE*, Volumen 15.
4. Malumbela, G., Moyo, P. & Alexander, M., 2009. Structural behaviour of beams under simultaneous load and steel corrosion. *Construction and building materials.*, 23(11), pp. 3346-3351.
5. Oyado, M., Kanakubo, T., Sato, T. & Yamamoto, Y., 2010. Bending performance of reinforced concrete member deteriorated by corrosion.. *Structure an infrastructure engineering: Maintenance, life-cycle design and performance*, 30 Marzo, Issue 1072954, pp. 37-41.
6. Pech-Canul, M. A. & Castro, P., 2002. Corrosion measurements of steel reinforced in concrete exposed to a tropical marine atmosphere.. *Cement and Concrete Research*, Volumen XXXII, pp. 491-498.
7. Rodríguez, J., Ortega, L. M. & Casal, J., 1997. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement.. *Construction and building materials.*, 12(4), pp. 239-248.
8. Shafiq, N., 2004. Effects in concrete and calculation of cover depth required against the corrosion of embedded steel reinforcement. *Structural Concrete*, 5(1), pp. 6-7.
9. Torres Acosta, A. e. a., Martínez Madrid, M. & Muñoz Noval, A., 2003. Capacidad remanente en vigas de hormigón que presentan corrosión localizada en el acero de refuerzo.. *Mater Construcc*, Volumen 53, pp. 271-172.

10. Xia, Z. y Xi-kang, Y., 2014. Research on mechanical properties of reinforced concrete (RC) beams for the corrosion by sea water.. *Applied mechanics and materials*, Volumen 507, pp. 317-321.
11. Helene P. y Pereira F. 2003, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección. REHABILITAR, CYTED.
12. Khaled Z. Kahhaleh, Enrique Vaca-Cortés, James O. Jirsa, Harovel G. Wheat y Ramón L. Carrasquillo, 1998. Corrosion Performance of Epoxy - Coated Reinforcement - Beam Tests. Research Report No. 1265-4. Texas Department of Transportation.
13. M. Saleem, M. Shameem, S.E. Hussain y M. Maslehuddin, 1996. Effect of Moisture, Chloride and Sulphate Contamination on the Electrical Resistivity of Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No.3, pp 209-214.
14. P. Castro-Borges, L. Veleza, M. Balancán-Zapata, J. M. Mendoza-Rangel y L.A. Juárez-Ruiz, 2013. Effect of Environmental Changes on Chemical and Electrochemical Parameters in Reinforced Concrete. The Case of a Tropical Marine Atmosphere. *International Journal of Electrochemical Science*, 8, pp 6204-6211.
15. C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote y P. Castro, 2000. Chloride Threshold Values to Depassivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Mortar. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp 1047-1055
16. Karla Hornbostel, Claus K. Larsen y Mette R. Geiker, 2013. Relationship - Between Concrete Resistivity and Corrosion rate – A literature review. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 39, pp 60–72
17. Helene P. y Pereira F. 2003, Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección. REHABILITAR, CYTED.
- 18.
19. DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (1998), CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 2a. Edición.

20. ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.
21. ASTM - American Society for Testing Materials, " Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM C 1218.
22. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, 2004.
23. Rodríguez M.y Botero J. (1996). Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México. "Publicación Series Instituto de Ingeniería-UNAM", 575.
24. Park, R y T Paulay (1992), "Capítulo 5: Estructuras de concreto", Diseño de estructuras resistentes a sismos, Emilio Rosenblueth, editor, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., segunda reimpresión.
25. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). "Industria de la construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico - Método de prueba", NMX-C-077-ONNCCE- 1997, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
26. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). " Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso", NMX-C-164-ONNCCE- 2002, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
27. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). " Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino", NMX-C-165-ONNCCE- 2004, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
28. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). " Industria de la construcción - Agregados - Resistencia a la degradación por abrasión e impacto de agregado

- grueso usando la maquina de los angeles”, NMX-C-196-ONNCCE- 1984, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
29. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). “Industria de la construcción - Concreto - Determinación del revenimiento en el concreto fresco”, NMX-C-156-1997-ONNCCE- 1984, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
30. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). “Industria de la construcción - Concreto hidráulico ligero para uso estructural - Determinación de la masa volumétrica”, NMX-C-105-1987-ONNCCE- 1984, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
31. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). “Industria de la construcción - Concreto - Resistencia a la compresión a edades tempranas y predicción de la misma a edades posteriores”, NMX-C-219-2005-ONNCCE- 1984, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
32. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). “Industria de la construcción - concreto -determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro”, NMX-C-191-2008-ONNCCE- 1984, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
33. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). “Industria de la construcción-concreto sometido a compresión-determinación del módulo de elasticidad estático y relación de poisson”, NMX-C-128-1997-ONNCCE- 1984, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
34. SCFI - Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (2001). " Industria de la construccion - Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”, NMX-AA-073-SCFI- 2001, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.

35. SCFI - Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (2001). " Industria de la construccion - Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas", NMX-AA-073-SCFI- 2001, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
36. ASTM - American Society for Testing Materials, " Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM C 1152.
37. ASTM - American Society for Testing Materials, " Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", ASTM C 642 -13.

APÉNDICE A

En esta sección se presentan las propiedades y dimensiones de las traveses que se consideraron para realizar el diseño por flexión. Se describe brevemente el proceso de cálculo realizado y se reportan los resultados.

Para el diseño por flexión de las traveses se utilizaron las 3 hipótesis fundamentales de flexión (cinemática, equilibrio y constitutiva).

Las dimensiones de las traveses son las siguientes:

1. 15x30x326cm (ancho x altura x largo).
2. Recubrimiento a centro de barra de 4 cm.
3. Peralte efectivo de 26 cm.
4. Distancia entre una carga y el apoyo más cercano de 118 cm.

Para el acero de refuerzo longitudinal a tensión se utilizaron diámetros de barra de 10 mm y 13 mm. El área de dicho refuerzo (2 barras) fue de 1.42 cm² y 2.54 cm² respectivamente. Para el acero de refuerzo longitudinal a compresión se utilizaron diámetros de barra de 10 mm. El área de dicho refuerzo (2 barras) fue de 1.42 cm². El esfuerzo de fluencia para el acero de refuerzo longitudinal es de 4,544 kg/cm² y su módulo de elasticidad de 2,100,000 kg/cm². Para el refuerzo transversal se utilizaron barras lisas de 6.3 mm. El área de dicho refuerzo es de 0.31 cm². El esfuerzo de fluencia para el refuerzo transversal es de 2530 kg/cm². Las propiedades del concreto fueron tomadas de la Tabla 4.5.

El diseño de las traveses se realizó a partir de un proceso iterativo donde primero se seleccionaba una curvatura y se buscaba el eje neutro que de equilibrio. Se utilizó la ecuación A.1 y A.2 para determinar las deformaciones unitarias en el acero de refuerzo a tensión y en la fibra superior del concreto a compresión.

$$\varepsilon_s = \phi * (d - c) \quad \text{Ecuación A.1}$$

$$\varepsilon_c = \phi * c \quad \text{Ecuación A.2}$$

Donde:

ε_s Deformación unitaria del acero.

ϕ Curvatura de la sección.

d peralte efectivo (altura menos recubrimiento).

c Distancia del eje neutro de la sección.

ε_c Deformación unitaria del concreto.

Para determinar los esfuerzos del concreto utilizó las ecuaciones de Kent y Park modificado (Ecuación A.3 y Ecuación A.4) que se presenta a continuación:

Curva ascendente

$$f_c = K f'_c \left[\left(\frac{2 \varepsilon_c}{0.002 K} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002 K} \right)^2 \right] \quad 0 < \varepsilon_c < 0.002 K \quad \text{Ecuación A.3}$$

Curva descendente

$$f_c = K f'_c [1 - Z_m (\varepsilon_c - 0.0021)] \quad \varepsilon_c > 0.002 K \quad \text{Ecuación A.4}$$

$$K = 1 + \rho_s \frac{f_{yh}}{f'_c} \quad \text{Ecuación A.5}$$

$$\rho_s = \frac{\text{Volumen de acero de refuerzo transversal}}{\text{Columen de concreto confinado}} \quad \text{Ecuación A.6}$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3+0.028423 f'_c}{14.2116 f'_c - 1000} + \frac{3}{4} \rho_s \frac{b' h^{0.5}}{S h} - 0.002 K} \quad \text{Ecuación A.7}$$

Donde:

f_c Esfuerzo a compresión del concreto.

f'_c Esfuerzo resistente a compresión axial de las muestras de concreto.

ε_c Deformación unitaria que corresponde a la máxima deformación del concreto.

f_{yh} Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo transversal.

b'' Ancho del núcleo confinado de concreto por el acero de refuerzo transversal.

S_h Separación entre el refuerzo transversal.

Para determinar los esfuerzos del acero se utilizó la ecuación de Rodríguez y Boteros (Ecuación A.7) que se presenta a continuación.

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left(\frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^p \quad \text{Ecuación A.8}$$

Donde:

f_s Esfuerzo de tensión del acero.

f_{su} Esfuerzo de tensión máximo del acero.

f_y Esfuerzo de fluencia del acero.

f_s Esfuerzo de tensión del acero.

ε_{su} Deformación unitaria que corresponde al refuerzo de tensión máximo del acero.

ε_s Deformación unitaria del acero.

ε_{sh} Deformación unitaria al inicio del endurecimiento del acero.

p Valor asignado según diámetro del acero de refuerzo.

Se utilizó la Ecuación A.9 para obtener la fuerza de compresión en el concreto cuando $\varepsilon_c \leq 0.002$ y la Ecuación A.10 cuando $\varepsilon_c < 0.002$. Se utilizó la Ecuación A.11 para obtener la fuerza a tensión.

$$C = \frac{2}{3} (f_c)(c)(b) \quad \text{Ecuación A.9}$$

$$C = \left[\left(\frac{f'_c - f_c}{2} \right) \left(1 - \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) (c) \right) (b) \right] + \left[\frac{2}{3} (f'_c) \left(\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) c \right) (b) \right]$$

Ecuación A.10

$$T = A_s(f_s) \quad \text{Ecuación A.11}$$

Donde:

- C Fuerza de compresión
- f_c Esfuerzo a compresión del concreto confinado
- c Distancia al eje neutro
- b Base de la sección de la trabe
- ε_s Deformación unitaria que corresponde a la máxima resistencia a compresión del concreto.
- A_s Área del acero de refuerzo tensión.

Posteriormente se realizó la suma de las fuerzas de compresión y tensión para verificar el equilibrio de la sección con la curvatura y el eje neutro seleccionado. Se realizó el cálculo de momento resistente de la trabe para dicha curvatura y posteriormente se calculó la carga necesaria para generar el momento antes mencionado con las condiciones de apoyo de las Figura 3.1.

Los resultados del proceso iterativo para las trabes con barra de refuerzo de 10 mm se muestran en la Figura A.1 y la Tabla A.1.

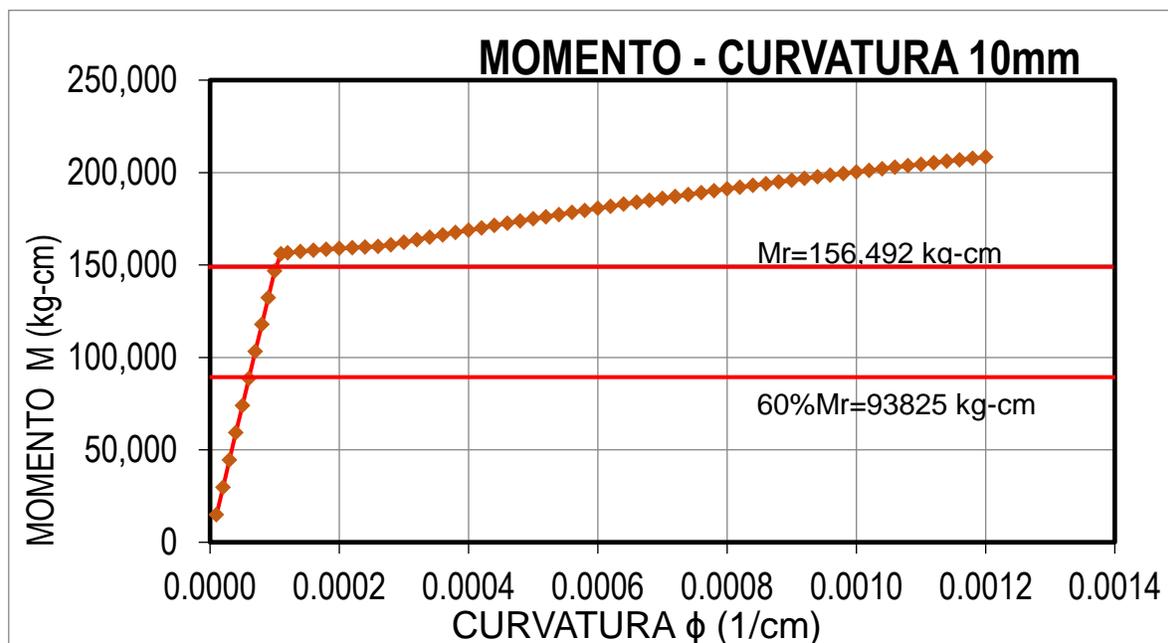


Figura A.1 Diagrama momento-curvatura de la trabe con refuerzo de 10 mm.

Tabla A.1 Diseño de flexión de la trabe con refuerzo de 10 mm.

ϕ	c	ϵ_s	ϵ_c	fc	fs	T	C1	C2	Cd	P _{axial}	M	P
0.00002	5.46	0.0004	0.0001	15	432	615	616	0	616	1	14883	252
0.00004	5.50	0.00082	0.0002	30	863	1229	1231	0	1231	1	29722	504
0.00006	5.54	0.0012	0.0003	44	1293	1842	1843	0	1843	1	44516	755
0.00008	5.59	0.0016	0.0004	58	1722	2454	2453	0	2453	-1	59264	1004
0.00010	5.64	0.0020	0.0006	72	2150	3064	3066	0	3066	3	73963	1254
0.00011	5.57	0.0023	0.0006	86	2578	3674	3668	0	3668	-5	88613	1502
0.00012	5.34	0.0025	0.0006	99	3003	4280	4285	0	4285	5	103210	1749
0.00024	3.88	0.0049	0.0009	112	3429	4887	4882	0	4882	-5	117756	1996
0.00036	3.30	0.0073	0.0012	125	3853	5491	5487	0	5487	-4	132245	2241
0.00048	2.99	0.0098	0.0014	137	4275	6093	6092	0	6092	-1	146677	2486
0.00060	2.79	0.0123	0.0017	147	4544	6476	6479	0	6479	3	156037	2645
0.00072	2.66	0.0149	0.0019	152	4544	6476	6469	0	6469	-7	156492	2652
0.00084	2.57	0.0177	0.0022	163	4544	6476	6475	0	6475	-1	157306	2666
0.00096	2.52	0.0205	0.0024	172	4544	6476	6470	0	6470	-6	157936	2677
0.00108	2.49	0.0233	0.0027	181	4544	6476	6478	0	6478	2	158482	2686
0.00112	2.49	0.0244	0.0028	189	4544	6476	6476	0	6476	0	158926	2694
0.00114	2.48	0.0250	0.0028	197	4544	6476	6476	0	6476	0	159307	2700

Los resultados del proceso iterativo para las traveses con barra de refuerzo de 13 mm se muestran en la Figura A.1 y la Tabla A.1

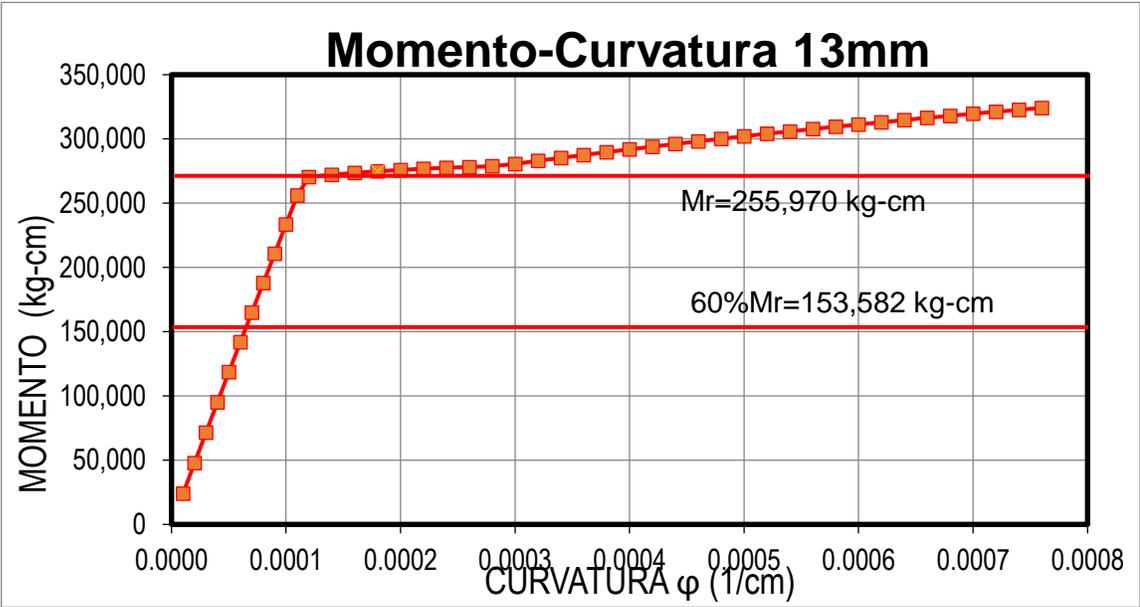


Figura A.2 Diagrama momento-curvatura de la trabe con refuerzo de 13 mm.

Tabla A.2 Diseño de flexión de la trabe con refuerzo de 13 mm.

ϕ	c	ϵ_s	ϵ_c	fc	fs	T	C1	C2	Cc	P axial	M	P
0.00001	6.98	0.0002	0.0001	19	399	1012	1012	0	1012	0	23950	435
0.00003	7.05	0.0006	0.0002	56	1194	3025	3025	0	3025	0	71485	1300
0.00005	7.12	0.0009	0.0004	91	1983	5023	5023	0	5023	0	118503	2155
0.00007	7.19	0.0013	0.0005	124	2765	7005	6999	0	6999	-7	164960	2999
0.00009	7.27	0.0017	0.0007	155	3540	8969	8963	0	8963	-6	210803	3833
0.00011	7.36	0.0021	0.0008	183	4307	10911	10912	0	10912	0	255970	4654
0.00012	7.28	0.0022	0.0009	194	4544	11512	11512	0	11512	0	270292	4914
0.00018	6.06	0.0036	0.0011	227	4544	11512	11511	0	11511	-1	274854	4997
0.00024	5.35	0.0050	0.0013	251	4544	11512	11510	0	11510	-2	277499	5045
0.00030	4.88	0.0063	0.0015	269	4568	11573	11571	0	11571	-2	280642	5103
0.00036	4.59	0.0077	0.0017	283	4664	11817	11809	0	11809	-8	287539	5228
0.00042	4.39	0.0091	0.0018	292	4758	12055	12056	0	12056	1	294026	5346
0.00048	4.23	0.0104	0.0020	297	4850	12288	12287	0	12287	0	300127	5457
0.00054	4.12	0.0118	0.0022	295	4939	12514	11689	825	12515	1	305875	5561
0.00060	4.04	0.0132	0.0024	290	5026	12733	10520	2207	12728	-6	311251	5659
0.00066	3.99	0.0145	0.0026	285	5110	12946	9564	3384	12948	2	316323	5751
0.00072	3.96	0.0159	0.0029	280	5191	13152	8767	4384	13151	-1	321120	5839
0.00076	3.95	0.0168	0.0030	276	5244	13285	8305	4980	13285	0	324182	5894

APÉNDICE B

Diseño y Proporcionamiento de mezcla de concreto

El diseño y proporcionamiento de la mezcla de concreto para la construcción de las trabes se realizó de acuerdo al Manual de Diseño y Proporcionamiento de Mezclas de Concreto Normal del Instituto Americano del Concreto ACI 211.1-91.

Los pasos a seguir fueron:

- 1) Se seleccionó un revenimiento de 75 a 100 mm.
- 2) Se seleccionó un tamaño máximo de agregado (TMA) de 19mm.
- 3) Se estimó el agua de mezclado de acuerdo a la Tabla 6.3.3 del manual ACI 211.1-91 con los valores del TMA y el revenimiento.
- 4) Se seleccionó una relación agua cemento (a/c) para concreto con aire incluido.
- 5) Se calculó la cantidad de cemento con base en la relación a/c y la cantidad de agua asignada.
- 6) Se obtuvo el factor de grava con base a Tabla 6.3.6 del manual ACI 211.1-91. Para determinar ese factor se tomó en cuenta el TMA y el módulo de finura del agregado fino. Dicho factor se multiplicó con el peso volumétrico seco compacto de la grava para obtener el contenido de la grava.
- 7) Se calculó el volumen correspondiente del agua, cemento y grava para obtener el volumen restante que sería del polvo (Tabla B.1).

Tabla B.1 Proporciones de materiales sin corrección.

Material	Peso (kg/m ³)	Densidad (kg/lit)	Volumen(lit)
Agua	180	1	180
Cemento	391.3	3.13	125.02
Grava	750	2.22	337.74
Arena	734.49	2.28	322.14
Aire	35	1	35
		Total	1000

8) Se realizó la corrección por humedad de la grava y el polvo. En la Tabla B.2 se presenta las proporciones de materiales para las trabes P1-10-1 y C1-10-1, en la Tabla B.3 se presenta las proporciones de materiales para las trabes P1-10-2 y C1-10-2, en la Tabla B.4 se presenta las proporciones de materiales para las trabes P1-13-1 y C1-13-1, y en la Tabla B.3 se presenta las proporciones de materiales para las trabes P1-13-2 y C1-13-2.

9)

Tabla B.2 Proporción de materiales para las trabes P1-10-1 y C1-10-1.

Material	Peso (kg/m ³)
Agua	228.24
Cemento	391.3
Grava	761.25
Arena	773.42

Tabla B.3 Proporción de materiales para las trabes P1-10-2 y C1-10-2.

Material	Peso (kg/m ³)
Agua	231.9
Cemento	391.3
Grava	758.91
Arena	671.99

Tabla B.4 Proporción de materiales para las trabes P1-13-1 y C1-13-1.

Material	Peso (kg/m ³)
Agua	225.22
Cemento	391.3
Grava	765
Arena	772.68

Tabla B.5 Proporción de materiales para las trabes P1-13-2 y C1-13-2.

Material	Peso (kg/m ³)
Agua	224.16
Cemento	391.3
Grava	763.13
Arena	775.62

APÉNDICE C

Tabla C.1 Contenido de cloruros en el concreto de las trabes P1-10-1 y C1-10-1.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	S.E	ppm de Cl	%Cl-ppconcreto	% por peso de cemento
P1-10-1 y C1-10-1	197	154	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	202	158	44	0.81	0.016	0.01	5.74	0.029	0.13
	203	158	45	0.83	0.015	0.01	5.47	0.027	0.12
	208	159	46	0.85	0.015	0.01	5.20	0.026	0.12
	202	158	44	0.81	0.016	0.01	5.74	0.029	0.13
	203	158	45	0.83	0.015	0.01	5.47	0.027	0.12
	201	159	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	200	158	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	203	159	44	0.81	0.016	0.01	5.74	0.029	0.13
	200	158	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	200	157	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	200	157	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	197	157	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.16
	196	157	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
	194	155	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
194	156	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17	
S	54								

Tabla C.2 Contenido de cloruros en el concreto de las trabes P1-10-2 y C1-10-2.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	S.E	ppm de Cl	%Cl-ppconcreto	% por peso de cemento
P1-10-2 y C1-10-2	197	156	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
	200	157	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	198	158	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.16
	201	158	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	203	158	45	0.83	0.015	0.01	5.47	0.027	0.12
	202	160	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	202	159	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	201	159	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	198	158	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.16
	197	157	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.16
	197	157	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.16
	196	156	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.16
	197	156	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
	198	157	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
	195	156	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
192	154	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17	
S	54								

Tabla C.3 Contenido de cloruros en el concreto de las trabes P1-13-1 y C1-13-1.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	S.E	ppm de Cl	%Cl-ppconcreto	% por peso de cemento
P1-13-1 y C1-13-1	194	156	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	194	156	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	197	158	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
	195	157	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	193	156	37	0.69	0.023	0.01	8.20	0.041	0.18
	171	150	21	0.39	0.059	0.01	20.97	0.105	0.46
	197	157	40	0.74	0.020	0.01	7.02	0.035	0.15
	198	157	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
	195	157	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	194	156	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	194	155	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
	190	155	35	0.65	0.026	0.01	9.12	0.046	0.20
	195	157	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	196	157	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
	198	157	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
200	158	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14	
S	54								

Tabla C.4 Contenido de cloruros en el concreto de las trabes P1-13-2 y C1-13-2.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	S.E	ppm de Cl	%Cl-ppconcreto	% por peso de cemento
P1-13-2 y C1-13-2	198	156	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	196	157	39	0.72	0.021	0.01	7.39	0.037	0.16
	197	156	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
	197	155	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	193	155	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	194	156	38	0.70	0.022	0.01	7.78	0.039	0.17
	200	158	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	199	157	42	0.78	0.018	0.01	6.35	0.032	0.14
	199	155	44	0.81	0.016	0.01	5.74	0.029	0.13
	197	154	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	198	155	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	198	155	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	195	154	41	0.76	0.019	0.01	6.67	0.033	0.15
	198	155	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13
	198	154	44	0.81	0.016	0.01	5.74	0.029	0.13
198	155	43	0.80	0.017	0.01	6.04	0.030	0.13	
S	54								

Tabla C.5 Contenido de cloruros en el agregado fino utilizado en la mezcla del concreto para las trabes P1-10-1 y C1-10-1.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-10-1 y C1-10-1	152	137	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	151	136	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	152	137	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	152	136	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
	152	137	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	153	138	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	153	138	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	152	137	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.6 Contenido de cloruros en el agregado fino utilizado en la mezcla del concreto para las trabes P1-10-2 y C1-10-2.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-10-2 y C1-10-2	156	141	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	156	141	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
	157	141	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
	157	141	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
	146	135	9	0.17	0.163	0.1171	0.01	57.763
	146	135	9	0.17	0.163	0.1171	0.01	57.763
	144	133	7	0.13	0.207	0.1616	0.01	73.561
	144	134	8	0.15	0.183	0.1372	0.01	64.878
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.7 Contenido de cloruros en el agregado fino utilizado en la mezcla del concreto para las trabes P1-13-1 y C1-13-1.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-13-1 y C1-13-1	161	144	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	160	143	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	160	143	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	160	143	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	157	140	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	158	142	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
	157	140	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	155	139	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.8 Contenido de cloruros en el agregado fino utilizado en la mezcla del concreto para las trabes P1-13-2 y C1-13-2.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-13-2 y C1-13-2	165	147	18	0.33	0.073	0.0274	0.01	25.915
	164	146	18	0.33	0.073	0.0274	0.01	25.915
	161	144	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	161	144	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	161	144	17	0.31	0.079	0.0331	0.01	27.932
	158	142	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
	158	142	16	0.30	0.085	0.0394	0.01	30.183
	156	141	15	0.28	0.092	0.0466	0.01	32.710
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.9 Contenido de cloruros en el agua utilizada en la mezcla del concreto para las trabes P1-10-1 y C1-10-1.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-10-1 y C1-10-1	120	96	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	119	95	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	119	95	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	119	95	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.10 Contenido de cloruros en el agua utilizada en la mezcla del concreto para las trabes P1-10-2 y C1-10-2.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-10-2 y C1-10-2	113	91	22	0.41	0.055	0.0097	0.10	34.3
	117	93	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	117	93	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	119	95	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.11 Contenido de cloruros en el agua utilizada en la mezcla del concreto para las trabes P1-13-1 y C1-13-1.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-13-1 y C1-13-1	116	92	24	0.4444	0.049	0.003	0.1	10.5
	117	94	23	0.4259	0.052	0.006	0.1	21.9
	118	95	23	0.4259	0.052	0.006	0.1	21.9
	117	93	24	0.4444	0.049	0.003	0.1	10.5
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.12 Contenido de cloruros en el agua utilizada en la mezcla del concreto para las trabes P1-13-2 y C1-13-2.

Trabes	E1	E2	E1-E2	$\frac{E1-E2}{S}$	Q	Q corregida	S.E	ppm de Cl
P1-13-2 y C1-13-2	119	95	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	117	93	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	116	92	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
	117	93	24	0.44	0.049	0.0029	0.10	10.5
AGUA	89	64	25	0.463	0.046			
S	54							

Tabla C.13 Porosidad efectiva del concreto de las trabes P1-10-1 y C1-10-1.

Cilindro	1	2	3	4
Z(m)	0.051	0.050	0.051	0.051
Wo(kg)	0.439	0.437	0.438	0.439
Wt(kg)	0.496	0.495	0.500	0.498
t(s)	2592000	2419200	2678400	2505600
D(cm)	0.0767	0.0769	0.077	0.0758
A(m ²)	0.0092	0.0093	0.0093	0.0090
m	1016370944	958075295	1034824237	968061383
k	0.0038	0.0040	0.0041	0.0042
ξe(%)	12.247	12.393	13.100	13.015

Cilindro	5	6	7	8
Z(m)	0.051	0.051	0.051	0.049
Wo(kg)	0.440	0.431	0.434	0.426
Wt(kg)	0.496	0.491	0.494	0.480
t(s)	2592000	2419200	2592000	2678400
D(cm)	0.071	0.0773	0.0768	0.0767
A(m ²)	0.0079	0.0094	0.0093	0.0092
m	1001442810	939289961	982044861	1115535194
k	0.0044	0.0041	0.0040	0.0036
$\xi_e(\%)$	13.966	12.579	12.664	11.985

Tabla C.14 Porosidad efectiva del concreto de las trabes P1-10-2 y C1-10-2.

Cilindro	1	2	3	4
Z(m)	0.05	0.0487	0.05	0.0495
Wo(kg)	0.42966	0.42971	0.43948	0.42552
Wt(kg)	0.48863	0.48432	0.4964	0.48206
t(s)	2678400	2678400	2764800	2592000
D(cm)	0.0768	0.0777	0.0773	0.0771
A(m ²)	0.0093	0.0095	0.0094	0.0093
m	1071360000	1129321286	1105920000	1057851240
k	0.0039	0.0035	0.0036	0.0038
$\xi_e(\%)$	12.730	11.824	12.129	12.233

Cilindro	5	6	7	8
Z(m)	0.0475	0.0505	0.05	0.05
Wo(kg)	0.4276	0.43566	0.43074	0.42505
Wt(kg)	0.48842	0.49671	0.48845	0.48465
t(s)	2937600	2764800	2937600	2505600
D(cm)	0.0768	0.0764	0.0765	0.0779
A(m ²)	0.0093	0.0092	0.0092	0.0095
m	1301983380	1084129007	1175040000	1002240000
k	0.0038	0.0040	0.0037	0.0039
$\xi_e(\%)$	13.820	13.185	12.556	12.505

Tabla C.15 Porosidad efectiva del concreto de las trabes P1-13-1 y C1-13-1.

Cilindro	1	2	3	4
Z(m)	0.05075	0.049625	0.04985	0.049725
Wo(kg)	0.42085	0.42439	0.43881	0.42624
Wt(kg)	0.47832	0.48259	0.4924	0.47945
t(s)	2332800	2073600	2160000	2073600
D(cm)	0.0092	0.0095	0.0094	0.0090
A(m ²)	0.0767	0.0777	0.0772	0.0758
m	905743891	842022981	869207422	838639667
k	0.0041	0.0043	0.0039	0.0041
ξe(%)	12.254	12.367	11.483	11.857

Cilindro	5	6	7	8
Z(m)	0.05	0.050075	0.04995	0.049975
Wo(kg)	0.42138	0.42535	0.42484	0.42822
Wt(kg)	0.48074	0.47923	0.48411	0.48764
t(s)	2073600	2073600	2073600	2073600
D(cm)	0.0095	0.0094	0.0093	0.0093
A(m ²)	0.0776	0.0773	0.0771	0.0768
m	829440000	826957268	831101372	830270062
k	0.0044	0.0040	0.0044	0.0045
ξe(%)	12.551	11.464	12.708	12.833

Tabla C.16 Porosidad efectiva del concreto de las trabes P1-13-2 y C1-13-2.

Cilindro	1	2	3	4
Z(m)	0.049225	0.0511	0.051675	0.051125
Wo(kg)	0.4346	0.44364	0.43524	0.44128
Wt(kg)	0.48718	0.5	0.49336	0.49865
t(s)	2678400	2851200	2332800	2332800
D(cm)	0.0092	0.0095	0.0094	0.0090
A(m ²)	0.0767	0.0777	0.0772	0.0758
m	1105360616	1091907583	873607867	892505425
k	0.0035	0.0035	0.0041	0.0042
ξe(%)	11.559	11.630	12.014	12.433

Cilindro	5	6	7	8
Z(m)	0.0514	0.0508	0.051125	0.0512
Wo(kg)	0.4365	0.43832	0.44594	0.43989
Wt(kg)	0.49407	0.49621	0.50185	0.49907
t(s)	2678400	2332800	2678400	2851200
D(cm)	0.0095	0.0094	0.0093	0.0093
A(m ²)	0.0776	0.0773	0.0771	0.0768
m	1013792790	903961808	1024728451	1087646484
k	0.0037	0.0040	0.0037	0.0038
$\xi_e(\%)$	11.841	12.141	11.712	12.476