

21
205

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



*ESTUDIO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION
DE LOS REFUERZOS METALICOS EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO*

TESIS MANCOMUNADA

PARA OBTENER EL TITULO DE

QUIMICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MARGARITA MIRANDA HERNANDEZ Y WALTTER LOPEZ GONZALEZ

1988



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

PREFACIO	1
CAPITULO I: INTRODUCCION Y OBJETIVOS	7
CAPITULO II: GENERALIDADES	15
II.1) Surgimiento y evolución de los materiales de construcción	
II.2) Conceptos Básicos	
II.2.1) Acero	
II.2.2) Concreto	
II.2.3) Corrosión	
II.3) Factores que afectan la corrosión del refuerzo de acero en el concreto	
II.3.1) Factores dependientes del concreto	
II.3.2) Factores dependientes del refuerzo metálico	
II.3.3) Factores dependientes del medio de servicio	
II.4) Métodos de estudio de la corrosión en las estructuras de concreto	
II.5) Métodos de Protección contra la corrosión del acero de refuerzo en el concreto	
CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL	71
III.1) Que se hizo	
III.2) En que se hizo	
III.3) Como se hizo	
III.4) Reactivos utilizados	
III.5) Equipo empleado	

CAPITULO IV: RESULTADOS EXPERIMENTALES 84

- IV.1) Ensayos electroquímicos
- IV.2) Ensayo de determinación del porcentaje de CaO liberado durante la hidratación del cemento
- IV.3) Ensayo del desarrollo de la resistencia a la compresión del cemento
- IV.4) Ensayo de determinación de Cl^- solubles en ácido y Cl^- solubles en agua
- IV.5) Ensayos de correlación entre pérdidas de peso gravimétricas, electroquímicas

CAPITULO V : DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 171

- V.1) Efecto del tipo de cemento
- V.2) Efecto de la relación agua/cemento
- V.3) Efecto del ión cloruro
- V.4) Efecto del tipo de catión
- V.5) Efecto de aditivos
 - V.5.1) Efecto inhibidor del ión nitrito
 - V.5.2) Efecto de aditivos orgánicos
- V.6) Figuras

CAPITULO VI: Referencias Bibliográficas 229

APENDICE A: Otras Técnicas empleadas 237

APENDICE B: Método de Resistencia de Polarización 248

P R E F A C I O

P R E F A C I O

En este prefacio, los autores queremos compartir con el lector algunos de los por qués, ideas e inquietudes que tratamos de plasmar en cada uno de los capitulos de esta tesis.

Ya que este trabajo es el primero de una serie --que esperamos sea larga-- de estudios sobre el tema de la corrosión en las estructuras de concreto, queremos transmitir algo de la experiencia ganada en este tiempo, realizando el trabajo escrito lo más claro posible para que de alguna forma sirva de base a los futuros estudios en esta Área.

También es de gran importancia para nosotros, el dar en este prefacio una primicia al lector de la forma de abordar los temas tratados, con el fin de lograr la mejor comprensión de este trabajo.

La tesis fue dividida en 6 capitulos y 2 apéndices:

CAPITULO I: INTRODUCCION Y OBJETIVOS

En este capitulo quisimos sensibilizar a los lectores acerca de los costos y daños ocasionados por la corrosión en general y hacer conciencia que en nuestro país son escasos los datos acerca de las pérdidas provocadas por corrosión.

Después nos enfocamos hacia los daños causados por la corrosión exclusivamente en el sector de la construcción, dando algunos ejemplos de los casos más sonados de colapsos en este tipo de estructuras.

Posteriormente se presentan los factores que se han reportado que influyen en el proceso de corrosión del refuerzo metálico en las estructuras de concreto y se plantean los parámetros a estudiar en el trabajo de tesis, terminando este capítulo con la presentación de los objetivos generales del mismo.

CAPITULO II: GENERALIDADES

Este capítulo fue pensado para proporcionar al lector los elementos teóricos necesarios para introducirse en la comprensión del fenómeno de la corrosión en las estructuras de concreto.

En base a lo anterior, la estructura de este capítulo es en forma de paquetes conteniendo la información lo más resumida posible de cada punto a tratar y con anotaciones hacia las referencias originales por si el lector desea ampliar dicha información.

Con esta idea en mente, el capítulo fue dividido en cinco secciones que pensamos que leídas en forma secuencial, dan una muy buena idea global acerca del fenómeno de corrosión de los refuerzos metálicos en las estructuras de concreto.

La primera de estas secciones, llamada SURGIMIENTO Y EVOLUCION DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION, contempla una panorámica histórica de la evolución de dichos materiales y se hace énfasis en aquellas características de la relación acero-concreto, que han llevado al concreto armado a ocupar el lugar que tiene como material de construcción.

En la segunda sección llamada CONCEPTOS BASICOS, se contempla, manteniendo la estructura de paquetes de información, las definiciones y los conceptos necesarios acerca de cada una de las partes involucradas en el fenómeno de la corrosión de las estructuras de concreto.

Así, en esta sección pensamos que era necesario primeramente hablar por separado de cada una de las partes involucradas en el proceso de corrosión de las estructuras de concreto, por lo que se revisan brevemente las características más importantes del acero y del concreto, así como los conceptos fundamentales de la corrosión.

Todo lo anterior fue hecho con la finalidad de dar al lector los fundamentos necesarios para la mejor comprensión de las tercera sección que llamamos FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSION DEL REFUERZO DE ACERO EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO, donde se conjunta toda la información anterior con el fin de comprender más a fondo la manera en que influyen en conjunto, los factores dependientes del concreto, del acero y del medio de servicio en el proceso de corrosión de una estructura de concreto.

Por último, y para redondear el capítulo de GENERALIDADES, creímos necesario incluir la sección cuatro que lleva por nombre METODOS DE ESTUDIO DE LA CORROSION EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO, y la sección cinco que trata de los METODOS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION DEL ACERO EN EL CONCRETO.

CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo mostramos el desarrollo experimental del plan de trabajo.

La estructura de este capítulo surgió como consecuencia de dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Qué se hizo?; ¿En qué se hizo? y ¿Cómo se hizo?. Y para exponer con claridad lo realizado experimentalmente, decidimos reunir en los apéndices A y B toda la información sobre las técnicas y métodos empleados durante la experimentación.

Al finalizar este capítulo se encuentran la especificaciones de los reactivos y el equipo empleados.

CAPITULO IV: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Aquí se presentan los resultados de velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistencia óhmica compensada electrónicamente, junto con los resultados del porcentaje de Ca(OH)_2 liberado durante la hidratación de los cementos y los resultados de resistencia a la compresión desarrollada por éstos en las mismas condiciones que los ensayos electroquímicos, así como la correlación de pérdidas de peso gravimétricas y electroquímicas y los resultados de la determinación de Cl^- totales y Cl^- libres obtenidos experimentalmente.

CAPITULO V: DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se discuten los resultados de velocidad de

corrosión obtenidos para cada uno de los ensayos probados, apoyándonos en los ensayos no electroquímicos realizados con la finalidad de enriquecer la discusión y conclusiones.

CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Este capítulo contiene una buena cantidad de citas bibliográficas con el fin de que el lector pueda disponer de una recopilación más o menos extensa sobre el tema de la corrosión en las estructuras de concreto y sirva de punto de partida a los futuros trabajos sobre el tema.

APENDICE A: OTRAS TECNICAS EMPLEADAS

En este apéndice se reúne toda la información técnica sobre los diferentes métodos analíticos utilizados en la parte experimental, haciendo énfasis en los principios en que se fundamentan.

APENDICE B: METODO DE RESISTENCIA DE POLARIZACION

Este apéndice trata exclusivamente del método de Resistencia de Polarización para determinar la velocidad de corrosión instantánea de cualquier metal en un medio dado.

El apéndice es una recopilación de este método y no es exclusivo para estudios de corrosión en estructuras de

CAPITULO I
INTRODUCCION
Y OBJETIVOS

CAPITULO I: INTRODUCCION

Para la mayoría de las personas, cuando se piensa en el significado de la palabra corrosión, aparece en la mente la idea de un clavo oxidado, la carrocería corroída de algún automóvil o tal vez se piense en las molestias que ocasiona una tubería picada o un calentador de agua inservible.

Sin embargo, los daños causados por la corrosión no se reducen solamente a los señalados anteriormente, sino que las pérdidas por este motivo, se derivan del incremento en los costos directos, tales como medidas preventivas, mantenimiento correctivo, sustitución de piezas corroídas, etc.; además, de los costos indirectos que van desde la disminución en la producción a causa de reparaciones extraordinarias, el excesivo consumo de energía en los procesos industriales y la contaminación del producto terminado causado por los compuestos de corrosión, hasta, por ejemplo, la pérdida de vidas humanas a consecuencia de fallas localizadas por corrosión en sistemas a alta presión, como reactores y gaseoductos, del derrumbe de estructuras de concreto ocasionado por la corrosión del refuerzo metálico o la posibilidad de un accidente nuclear por problemas de corrosión localizada en reactores nucleares.

Desafortunadamente, es difícil cuantificar los costos indirectos, ya que las cifras contenidas en los informes sobre las pérdidas por corrosión, incluyen principalmente los costos directos.

Transladando el valor de dichas pérdidas a un plano más

general como es la economía de un país, el informe Hoar (1), dado a conocer en 1971 en el Reino Unido, menciona que las pérdidas por corrosión ascienden del 3.5 al 4.5% del Producto Interno Bruto de un país.

El mismo informe Hoar, nos da una idea de la distribución de los costos por corrosión en los diferentes sectores de la economía en el Reino Unido, como se presenta en la siguiente tabla:

**COSTOS DE LA CORROSION Y PROTECCION EN EL REINO UNIDO
Y ESTIMACION DE AHORROS POTENCIALES**

Industria o Sector	Costos estimados en millones de libras esterlinas	Ahorro potencial estimado en millones de libras esterlinas
Vivienda y construcción	250	50
Alimentación	40	4
Ingeniería en general	110	35
Departamentos y agencias de gobierno	55	20
Marina	280	55
Refinación de metales y semi- elaborados	15	2
Petróleo y productos químicos	180	15
Energía	60	25
Transporte	350	100
Agua	25	4

Asimismo, el mencionado informe revela que los costos derivados de la corrosión, podrían disminuirse hasta en un 22.7%, a través de la correcta aplicación de los conocimientos ya existentes.

Dado que no se dispone de datos reales sobre el costo de la corrosión en México, se puede inferir de los resultados arrojados por el informe Hoar para el Reino Unido, que si se estima el 4.0% del PIB Nacional de 1986, nuestro país estará perdiendo alrededor de 3.1 billones de pesos por año debido a la corrosión (2).

Por otra parte, de los resultados obtenidos por una encuesta realizada por el Grupo de Corrosión del Departamento de Metalurgia de la Facultad de Química de la UNAM a la industria química mexicana (3), se da a conocer que el 67.4% de las empresas consultadas tienen problemas habituales de corrosión y que el 29.5% sólo esporádicamente, haciendo pensar seriamente en la gravedad del problema para nuestro país.

De la tabla anterior, es importante destacar al sector de vivienda y construcción, ya que en este se concentra una parte significativa de las pérdidas generadas por la corrosión y es hacia donde esta dirigida la investigación que se presenta en este trabajo de tesis.

Las primeras observaciones sobre la corrosión del acero en el concreto fueron hechas a principios de este siglo principalmente en ambientes marinos y plantas químicas (4,5). Sin embargo, es hasta la segunda mitad de este siglo, cuando

el estudio sistemático de la corrosión de los refuerzos metálicos embebidos en concreto ha llegado a ocupar un papel importante a nivel mundial, por la gran ocurrencia del problema en cierto tipo de estructuras y por lo elevado de los costos de reparación (6).

Así, estructuras de concreto reforzado construidas entre 1950 y 1970 han sufrido problemas de corrosión del refuerzo metálico mucho antes del plazo de servicio para el que fueron originalmente diseñadas, como es el caso reportado por la División de Carreteras de California, que mostró que de los 66 puentes de concreto reforzado en una zona del desierto, 20 sufrieron corrosión del acero de refuerzo a los diez años de servicio (7); o en el Reino Unido donde se han presentado casos de corrosión en varias estaciones nucleoelectricas, años antes de la vida útil proyectada (8).

Otros ejemplos en donde estructuras de concreto han sufrido colapsos catastróficos debido a la corrosión del refuerzo, son la caída del puente Ynysyguas en Port Talbot, Reino Unido en 1985 (8), el derrumbe del techo de la sala de congresos de Berlín en 1982 (9), o en nuestro país el desplome de la techumbre del auditorio Benito Juárez en Guadalajara, Jalisco y el colapso del puente Papagayo en la carretera costera del Pacifico (tramo Acapulco-Pinotepa Nacional), en 1980 y 1985 respectivamente (10).

El proceso de corrosión de los refuerzos metálicos en estructuras de concreto es extremadamente complicado aún en los casos más simples, y está fuertemente influenciado por

numerosos factores (7,11,12) dependientes del concreto, del refuerzo metálico y del medio de servicio tal y como se muestra a continuación:

FACTORES DEPENDIENTES DEL CONCRETO	FACTORES DEPENDIENTES DEL REFUERZO METALICO	FACTORES DEPENDIENTES DEL MEDIO DE SERVICIO
Permeabilidad (Relación a/c, cemento/arena, compactación, curado)	Naturaleza química del refuerzo (composición)	Humedad Relativa
Porosidad	Naturaleza física del refuerzo (microestructura)	Degradación biológica
Espesor del recubrimiento	Condición superficial del refuerzo (tipo de óxido superficial)	Acción de diversas sustancias como: Cl^- , SO_4^{2-} , O_2 y CO_2
Tipo de Cemento	Solicitaciones mecánicas en el refuerzo (tensión, compresión y torsión)	Corrientes parásitas
Agregados		
Aditivos		
Puesta en obra		

De las variables identificadas anteriormente, se decidió investigar por métodos electroquímicos los siguientes parámetros sobre la velocidad de corrosión del refuerzo metálico: el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la influencia de la concentración de cloruros y de los

cationes Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} unidos al anión cloruro, del lignosulfonato y estearato de calcio como aditivos en la industria de la construcción y la influencia del ión nitrito como inhibidor de la corrosión del refuerzo de acero.

Consideramos que éstas son las principales variables a investigar en un estudio inicial sobre el campo de la corrosión de los refuerzos metálicos en las estructuras de concreto.

El método electroquímico empleado en el presente trabajo es el de Resistencia de Polarización (R_p) (13), usado recientemente a nivel mundial para el estudio y seguimiento de velocidades de corrosión muy pequeñas, como es el caso de la corrosión de los refuerzos de acero en el concreto.

Dichos resultados serán analizados apoyándose en el empleo de otras técnicas (14) tales como métodos analíticos para la determinación de CaO libre, Cl^- totales y Cl^- libres, resistencia mecánica desarrollada por el cemento, etc., las cuales dan información muy útil para poder relacionar lo que sucede en la masa de concreto con el proceso de corrosión del refuerzo metálico.

Partiendo del hecho de que en México la corrosión representa un gran problema económico y debido a que son escasos los estudios reportados sobre la corrosión en estructuras de concreto, en este trabajo de tesis se persiguen los siguientes objetivos:

O B J E T I V O S

- 1) Subsanan el vacío existente en investigación sobre la corrosión de las estructuras de concreto y tener un estudio básico referido a las condiciones particulares de nuestro país.
- 2) Caracterizar el comportamiento de los diferentes materiales usados en la industria de la construcción en México con respecto a la velocidad de corrosión de los refuerzos metálicos.
- 3) Difundir la ayuda que prestan los métodos electroquímicos para el estudio y seguimiento de la corrosión.

CAPITULO II

GENERALIDADES


CAPITULO II: GENERALIDADES

II.1) SURGIMIENTO Y EVOLUCION DE LOS MATERIALES CONSTRUCCION

El uso de los materiales cementantes se remonta al mismo inicio de la civilización humana.

Pero es hasta el siglo pasado cuando surge la industria del cemento y el concreto que en gran medida ha posibilitado el gran desarrollo tecnológico del siglo XX.


A continuación se presenta una pequeña reseña histórica de los materiales de construcción hasta el presente (15,16,17,18,19).

- 
- Los egipcios usaban como material cementante yeso calcinado impuro.
 - Los griegos y romanos utilizaban primero caliza calcinada y luego aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas (éste fue el primer concreto de la historia).
 - Para construcciones sujetas a la acción del agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica "puzolana" o tejas de arcilla quemada, finamente triturada.

EDAD

- MEDIA - Disminución general en la calidad y uso del concreto. Las construcciones se hacían solamente de roca.

SIGLO

- XVII - En 1756, John Smeaton fue comisionado para construir el faro de Eddystone en Inglaterra y descubrió que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba "puzolana" con caliza de alto contenido de material arcilloso, surgiendo así la cal hidráulica.
- 
- Se desarrollan otros cementos hidráulicos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua.

SIGLO XIX

- 1824 - Joseph Aspdin registró la patente del cemento Portland obteniéndolo en un horno a partir de una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura hasta eliminación del CO₂.

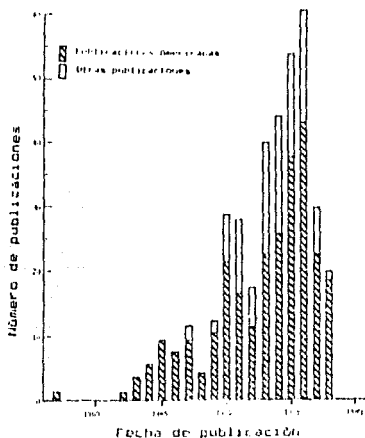
- 1845 - Issac Johnson obtuvo el prototipo del cemento moderno quemando una mezcla de arcilla y caliza hasta semifusión, con lo que produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementante.
- 1861 - Los franceses Monier y Coignet crearon el concreto reforzado como material de construcción.

Final siglo

- XIX - Se extiende el uso del concreto reforzado por Europa y Estados Unidos.

SIGLO XX

- 1902 - Se realiza la primera construcción de concreto armado en México.
- 1928 - El desarrollo del concreto preesforzado se debe a Eugene Freyssinet de Francia, que empezó a usar alambres de acero de alta resistencia para preesfuerzo.
- 1940 - Transición del concreto "artesanal" al concreto "industrializado". (Uso de aditivos, sustitución de minerales como materia prima de la fabricación del cemento, implementación de nuevas tecnologías en la fabricación del concreto).
 - Se amplía el uso del concreto reforzado y preesforzado a situaciones de aplicación extremas. (Ambientes muy agresivos, nuevos diseños estructurales, etc.).
 - Se incrementa el proceso de deterioro del concreto.
- 1960 - A partir de esta fecha, ha habido gran ocurrencia de casos de corrosión del refuerzo en cierto tipo de estructuras.
 - Ultimamente, se ha incrementado el interés por el estudio de la corrosión en estructuras de concreto, como muestra el siguiente histograma (20):



Histograma mostrando el número de reportes y artículos publicados sobre corrosión del acero en el concreto.

LA PAREJA ACERO-CONCRETO

Como se ha visto en la reseña histórica de los materiales de construcción, la relación entre Acero y Concreto (Concreto Armado), surge como material de construcción a finales del siglo XIX y a principios de éste.

¿ Pero qué ventajas ofrecía esta relación Acero-Concreto como material de construcción para los nuevos diseños estructurales del siglo XX ? (17).

Se aplica el término del concreto armado (21) al material compuesto de concreto y armadura o varilla de acero, asociados de modo que forman un sólido único desde el punto de vista mecánico.

Esta unión tiene por objeto aprovechar ventajosamente las propiedades características que presentan ambos materiales desde el punto de vista de la resistencia mecánica.

El concreto ofrece una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción; por lo tanto, es inadecuado para formar piezas que han de resistir tracciones o flexiones.

Ahora bien, si en la zona de tracción se colocan varillas de acero, se habrá suplido esta deficiencia y se tendrá una pieza resistente a la flexión.

El concreto armado es pues un material artificial resistente a la flexión, circunstancia que no se da en las piedras naturales; a esto se debe la excepcional importancia que el concreto armado tiene en la industria de la construcción.

Las ventajas que ofrece el concreto armado en comparación con otros materiales de construcción, no sólo es la resistencia a los esfuerzos de flexión y compresión, sino que además presenta la ventaja de su ilimitada adaptabilidad a las formas más diversas, y la posibilidad de aplicarse acertadamente a casi todo género de construcciones.

Otra característica de gran importancia es la protección que ofrece a las estructuras de acero contra la corrosión causada por el medio ambiente.

El rápido progreso de sus aplicaciones se debe en gran medida a la economía obtenida de su empleo, haciendo posible su competencia no sólo con las construcciones de piedra y madera, sino también con las de acero.

El concreto armado se puede clasificar según el grado de esfuerzo al acero de refuerzo, de la siguiente manera:

CONCRETO ARMADO:

Material compuesto de concreto y acero asociados de modo que forman un sólido único

CONCRETO REFORZADO: Material formado de concreto y acero de bajo carbono sin previo esfuerzo, que al momento de soportar el peso del concreto y las cargas de la estructura, desarrolla esfuerzos de tensión.

CONCRETO PREESFORZADO: Material formado de concreto y acero de alta resistencia que es intencionalmente tensionado, para compensar los esfuerzos provocados por el peso del concreto y las cargas de la estructura.

CONCRETO PRETENSADO: Concreto en que el refuerzo de acero es puesto en tensión antes del colado del concreto, permitiendo el relajamiento del acero después del curado del concreto.

CONCRETO POSTENSADO: Concreto en que el refuerzo de acero es puesto en tensión después del curado del concreto.

II.2) CONCEPTOS BASICOS

II.2.1) A C E R O

El acero es una aleación que contiene fundamentalmente a los elementos, hierro como base y carbono.

De acuerdo con las necesidades se han diseñado diferentes tipos de acero. Existen aceros para la construcción de obras civiles, para maquinaria, para herramientas, etc.

El diseño de la composición de cada acero, la cual además de hierro y carbono, usualmente incluye elementos tales como Mn, Si, Cr, Ni, Mo y otros, depende del uso a que esté destinado.

En la siguiente tabla se presenta de manera muy general el efecto del contenido de carbono en la aleación sobre algunas propiedades físicas y mecánicas (22):

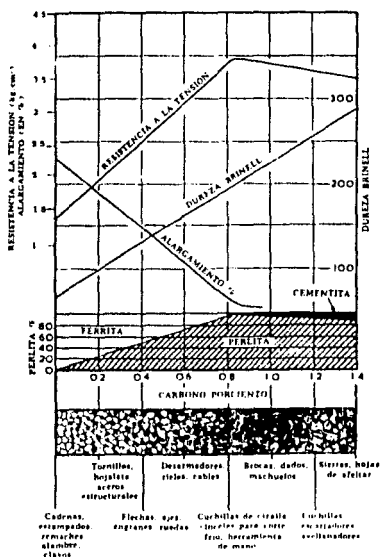


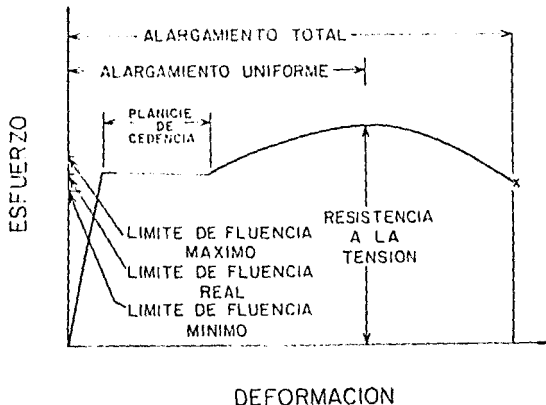
Diagrama que muestra la relación entre el contenido de carbono, propiedades mecánicas, microestructura y usos de los aceros al carbono bajo condiciones normales.

Ahora bien, el tipo de acero usado en la industria de la construcción es el llamado acero estructural. Debido a la diversidad de elementos de aleación presentes, a su concentración y microestructuras generadas, existe hoy en día una amplia gama de aceros estructurales, desarrollados muchas veces para usos específicos. Sin embargo, todos ellos deben cumplir ciertas características sobre las cuales están basadas algunas de las teorías y códigos de las estructuras de concreto (18).

Las características mecánicas que deben ser controladas cuidadosamente en un acero estructural son las siguientes (23): alta resistencia a la tensión, ductilidad, tenacidad y soldabilidad.

Estas características se miden por medio de pruebas mecánicas basadas en estas propiedades, que permiten la interpretación numérica comparativa.

Antiguamente el acero para refuerzo se limitaba sólo al de bajo carbono (0 - 0.3%) el cual muestra una gráfica de tensión contra deformación como la siguiente (23):



Gráfica de esfuerzo de tensión vs. deformación del acero de bajo carbono

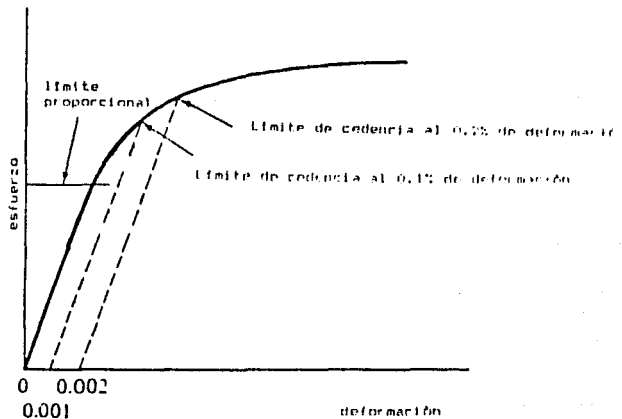
En la figura anterior se puede ver que los aceros de bajo carbono tienen gran ductilidad y ésta es proporcional a la tenacidad ya que presentan una amplia planicie de cedencia y un gran alargamiento total.

Posteriormente hubo una gran tendencia a utilizar varillas de refuerzo de alta resistencia ya que presentan una mayor resistencia a menor costo. Esto se logra, incrementando el contenido de carbono en el acero o introduciendo dureza mecánica por torcido o estirado.

Estos tipos de acero muestran una gráfica diferente de tensión contra deformación como se muestra a continuación

(24):

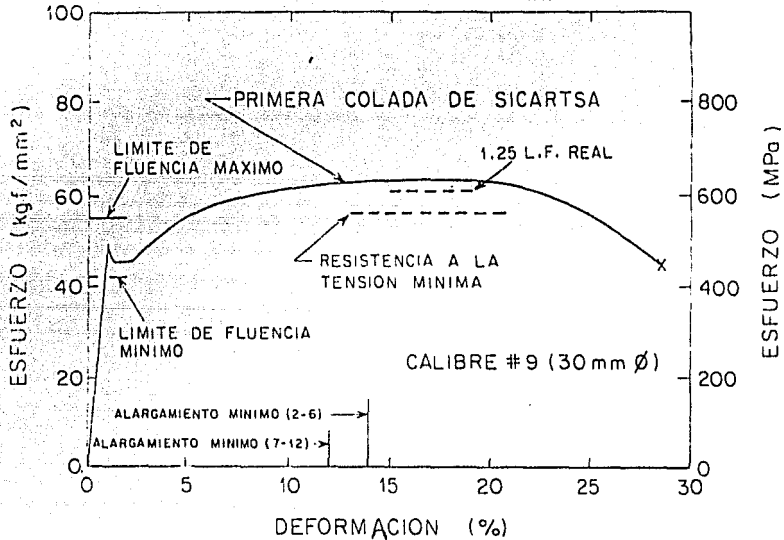
Gráfica de esfuerzo de tensión vs. deformación del acero de alta resistencia



Los aceros de alta resistencia presentan una mayor resistencia a la tensión que los aceros de bajo carbono, pero no presentan planicie de cedencia y por lo tanto su ductilidad es menor que los aceros de bajo carbono. Estos aceros presentan mala soldabilidad.

A partir de 1957 aparecieron en el mercado los aceros de alta resistencia y baja aleación, los cuales conjuntan las propiedades mecánicas de los aceros de alta resistencia de

alto carbono con las propiedades de los aceros de bajo carbono. En estos aceros se conserva bajo el porcentaje de carbono y se incluye la presencia de pequeñas cantidades de otros metales como Nb, V, Ti, Cr, etc.. El comportamiento a la tensión de dichos aceros se presenta en la siguiente figura (23):



Gráfica de esfuerzos de tensión vs. deformación de un acero de alta resistencia y baja aleación

Estos aceros se recomiendan para partes estructurales de construcciones que se encuentran en zonas sísmicas, ya que presentan una amplia planicie de cedencia, alta ductilidad y gran tenacidad para absorber y disipar la energía de deformación que los sismos transmiten a los edificios.

Como hemos visto, se han desarrollado distintos tipos de aceros con la finalidad de satisfacer las demandas que sus

usos requieren desde el punto de vista mecánico y económico. Pero la buena selección de cualquier material estructural debe contemplar otros parámetros aparte de sus propiedades mecánicas y uno de los más importantes es el de la resistencia a la corrosión en el medio de exposición, para evitar fallas a veces catastróficas y que no pueden evaluarse por las propiedades mecánicas simplemente, como es el caso de la corrosión fisurante bajo tensión o la corrosión por picaduras.

En la tabla siguiente se hace un resumen de los distintos tipos de acero estructural de mayor uso y bajo norma ASTM (5):

DISPONIBILIDAD DE ACEROS ESTRUCTURALES EN PERFILES, PLACAS Y BARRAS													
Especie	Grado		Forma				Medio de exposición						
	A36	A572	Perfilado	Placa	Barra	Atm.	Mar.	Ind.	Agua	Agua salada	Agua dulce	Agua salada	Agua dulce
Acero al carbono	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Acero al manganeso	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Acero inoxidable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aluminio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Disponibilidad de Aceros Estructurales en perfiles, placas y barras

11.2.2) C O N C R E T O

CONCRETO (26): También llamado hormigón, es un material sintético producido cuando el cemento se mezcla con agregados finos (arena), agregados gruesos (grava) y agua.

El uso al que se destina el concreto dicta la proporción de los componentes antes mencionados (relación agua/cemento y relación cemento/arena), como también el tipo de cemento y la dosificación de los agregados finos y gruesos.

La calidad requerida del cemento endurecido, la trabajabilidad del cemento fresco y la economía, son factores que usualmente se consideran en el diseño de la mezcla. Actualmente es práctica común el uso de aditivos químicos para modificar las propiedades del concreto.

Debido a su constitución, el concreto contiene poros, algunos de ellos interconectados entre sí, que son de importancia crítica en el proceso de corrosión, ya que a través de ellos los agentes agresivos externos pueden penetrar por capilaridad o difusión hasta el acero de refuerzo.

MORTERO (27): Se compone de una mezcla debidamente proporcionada de arena, cemento y agua.

Las pruebas de resistencia mecánica de los cementos se efectúan internacionalmente en un mortero 1:3:0.5 que se compone en peso de una parte de cemento, tres partes de arena y media parte de agua potable respectivamente.

CEMENTO (26): Es el producto de la calcinación de una mezcla íntima de caliza (CaCO_3) y arcilla ($\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$) en un horno rotatorio a temperatura de semifusión, aproximadamente $1\ 500\ ^\circ\text{C}$.

El producto de ésta calcinación, llamado clinker, se muele con un pequeño porcentaje de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) hasta un polvo fino. El cemento de mayor uso es el cemento Portland, aún cuando se fabrican otros tipos de cemento.

TIPOS DE CEMENTO (26,28,15): Existen muchas clasificaciones para los tipos de cemento de acuerdo con las normas de cada país, pero la ASTM los clasifica de la siguiente manera:

Cementos Portland.- Existen cinco tipos de cemento Portland, los tipos I, II, III, IV y V, que se diferencian en su composición química, finura, calor de hidratación, tiempo del desarrollo de la resistencia, tiempo de fraguado y contenido de aire (en mortero).

En la siguiente tabla se presentan las proporciones típicas de las fases presentes en un cemento Portland (26):

	I	II	III	IV	V
SILICATO TRICALCICO	51	46	58	26	29
SILICATO DICALCICO	25	32	16	54	47
ALUMINATO TRICALCICO	9	4	8	2	2
FERRIALUMINATO TETRALCICO	8	12	8	12	8
OTRAS FASES	7	6	10	6	8

Proporciones típicas de las principales fases anhidras en los cinco tipos de cemento Portland.

Cementos compuestos.-Se conocen como cementos compuestos a las mezclas íntimas de cemento Portland y puzolana (cemento tipo IP) y cemento Portland y escorias de alto horno (cemento tipo IS).

El cemento puzolánico está constituido de un 15-40% de puzolana en peso total de cemento y el cemento de escoria de alto horno contiene entre el 25 y el 65% en peso de escorias.

Otros tipos de cemento.- Se conocen otros tipos de cementos como el cemento de escoria, el cemento natural, el cemento de alta alúmina y los cementos expansivos.

El cemento de escoria (tipo S) es una mezcla íntima de escoria de alto horno uniformemente granulada y cal hidratada. La cantidad de escoria granulada se agrega hasta en un 60% en peso del cemento. Por su característica de producir bajas resistencias se recomienda que el cemento de escoria sea mezclado con cemento Portland para fabricar concreto.

El cemento Natural es un producto obtenido de la calcinación de calizas y arcillas finamente divididas a una temperatura menor que la de descarbonatación. Dada la falta de uniformidad en sus propiedades no es recomendado para usarse en estructuras que requieran un control uniforme. El cemento natural es usualmente mezclado con cemento Portland para fabricar concreto.

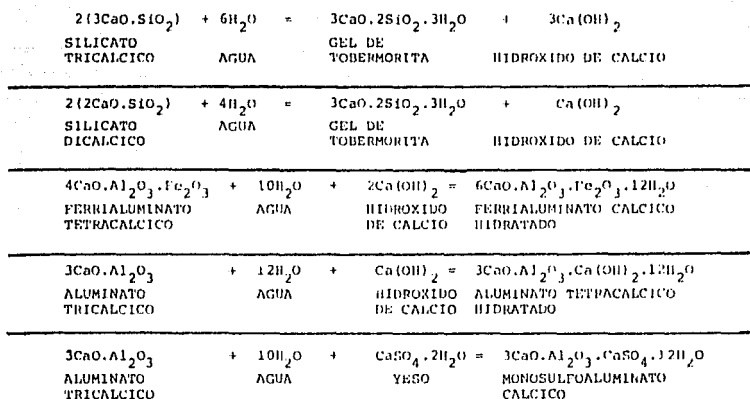
El cemento de alta alúmina se originó por la necesidad de resistir el ataque de los sulfatos y es sumamente satisfactorio en este aspecto. Este cemento difiere mucho en composición y en algunas propiedades de los cementos Portland. El cemento de alta alúmina consta de partes iguales de alúmina y cal, de aproximadamente 40% de cada una, con algunos óxidos de hierro y una cantidad ligeramente mayor del 8% de sílice.

Los cementos expansivos son aquellos que aumentan su volumen en sus primeros días de vida, obteniéndose una forma de concreto preesforzada al restringir esta expansión por medio de acero de refuerzo. La expansión es debida a la formación de un sulfoaluminato de calcio hidratado (ettringita).

HIDRATACION DEL CEMENTO : Una de las características más importantes del cemento Portland es el de ser un cemento hidráulico, esto es, que las fases del cemento reaccionan químicamente con el agua dando lugar a productos de hidratación insolubles responsables del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de la resistencia mecánica aún estando sumergido en agua.

Para fines prácticos, se considera que los agregados finos y gruesos son inertes respecto a estas reacciones de hidratación.

Los productos de hidratación incluyen el silicato de calcio hidratado (gel de Tobermorita), Ca(OH)_2 y otras fases hidratadas como se presentan a continuación (26):



Reacciones que ocurren cuando se agrega agua al cemento Portland.

Cabe hacer notar que un producto de la hidratación del cemento es el Ca(OH)_2 , el cual confiere al concreto un medio de alta alcalinidad, necesaria para pasivar las estructuras de acero de refuerzo, aunque recientes estudios mencionan como responsables de la alcalinidad al NaOH y KOH (29).

ADITIVOS: Son compuestos químicos, orgánicos o inorgánicos, que se agregan al concreto inmediatamente antes o durante el mezclado para modificar las propiedades del concreto fresco o endurecido.

Los aditivos más comúnmente empleados son los siguientes (26):

ADITIVOS PARA CONCRETO COMLINES

TIPO DE ADITIVOS	FUNCION
Inclusores de aire	Proveen un sistema controlado y uniformemente distribuido de burbujas de aire dentro del concreto endurecido. (resina vinosa y sub productos del petróleo amolificados)
Reductores de agua	Reducen la cantidad de agua requerida para la fabricación de un concreto trabajable. (lignosulfonatos de sodio o calcio, sales de ácidos carboxílicos hidroclados)
Retardantes del fraguado	Disminuyen el tiempo requerido para el endurecimiento del concreto. (ácido lignosulfónico y Ácidos carboxílicos hidroclados)
Acelerantes del fraguado	Disminuyen el tiempo requerido para el endurecimiento del concreto. (cloruro de calcio, bromuro de calcio, tetracloruro)
Minerales finamente divididos	Disminuyen el costo del cemento, mejoran la trabajabilidad, mejoran la resistencia, disminuyen el calor de hidratación (pozzolana)

DURABILIDAD DEL CONCRETO (26): Si bien el concreto es un material resistente y durable, existen factores físicos y químicos en el medio de servicio que pueden contribuir a su deterioro o falla.

Frecuentemente una falla prematura puede atribuirse a la baja calidad del concreto (alta relación a/c, consolidación inadecuada, etc.).

En otras circunstancias, un concreto de buena calidad experimenta deterioro debido principalmente a los siguientes factores: ciclos de hielo y deshielo, ciclos térmicos y de humedad, deterioro químico, corrosión del acero embebido en el concreto y cargas mecánicas.

Ciclos de hielo-deshielo.- Los efectos destructores de los ciclos de hielo-deshielo han sido estudiados por muchos años. El mecanismo de este daño es algo complejo y debe ser considerado con respecto a la matriz (pasta de cemento) y a los agregados del concreto.

El uso apropiado de aditivos inclusores de aire ha reducido grandemente la frecuencia y severidad de los daños producidos por el hielo-deshielo al concreto en los últimos 30-40 años.

Ciclos térmicos y de humedad.- Cambios drásticos de temperatura y humedad, resultan en cambios en el volumen del concreto los cuales pueden fisurarlo.

Deterioro Químico.- Existe una gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas que pueden atacar al concreto si existen condiciones favorables de humedad.

Debido a la alcalinidad del cemento Portland hidratado, el concreto reacciona con la mayoría de los medios ácidos (como el CO_2 , ácidos minerales, etc.).

Otro enemigo común del concreto es el sulfato, que reacciona destructivamente con los hidratos del $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ en presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando ettringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) la cual bajo condiciones apropiadas provoca la expansión y fractura del concreto.

La severidad del ataque químico por cualquier solución agresiva gaseosa está fuertemente influenciado por la permeabilidad del concreto, la cual puede variar por un factor de 10^6 entre diferentes concretos.

La permeabilidad del concreto es una función directamente proporcional a la relación a/c e inversamente proporcional al tiempo de curado.

Adicionalmente, se puede hacer notar que algunos agregados toman parte en reacciones químicas adversas con el cemento en el concreto (reacción álcali-agregado), pero en este caso es posible identificar los materiales problema y hacer los ajustes adecuados para acomodar o eliminar su empleo en el concreto.

Corrosión del Acero embebido en el Concreto.- normalmente la
alta alcalini-
dad del con-
creto ($\text{pH} > 12.5$), inhibe la corrosión del acero embebido en él,
como puede verse en el siguiente diagrama de Pourbaix para el
hierro (30):

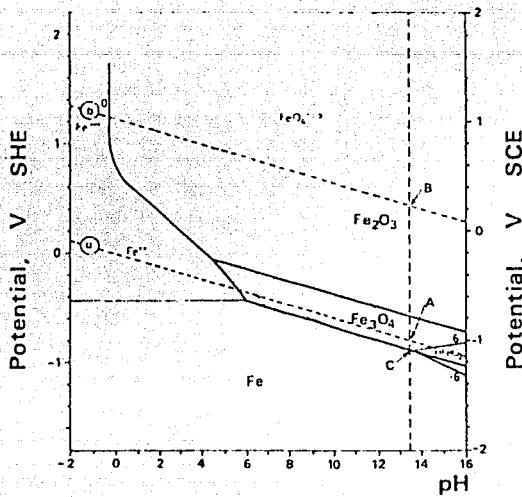


Diagrama de Pourbaix para el hierro

En la práctica, la corrosión se inicia cuando la alcalinidad del concreto se reduce, por ejemplo a través del CO₂; o en la presencia de iones Cl⁻, aún cuando la alcalinidad se mantenga relativamente alta.

El daño del concreto resulta de un esfuerzo residual debido al incremento de volumen ocupado por el refuerzo al corroerse, ya que los productos de corrosión del acero ocupan un mayor volumen que el del acero del que provienen, provocando el agrietamiento y fractura el concreto.

Cargas Mecánicas.- El concreto falla cuando las cargas mecánicas exceden la capacidad para la que estuvo diseñado el concreto.

Esto puede ocurrir por varias razones: fallas del concreto para obtener la resistencia planeada para soportar la carga (tiempo de curado inadecuado, mala calidad del concreto); deterioro de la resistencia del concreto (para tiempos muy largos) o cargas excesivas alejadas de las diseñadas durante el servicio.

II.2.3) C O R R O S I O N

CORROSION : Existen muchas definiciones de corrosión (31,32), pero en un sentido estricto, es un fenómeno natural (espontáneo), por medio del cual los materiales metálicos se degradan, regresando en su mayoría a su estado de menor energía o de equilibrio estable, como son los compuestos en los que se encontraban originalmente en la naturaleza.

Para el caso de la corrosión de los refuerzos metálicos en estructuras de concreto y para este trabajo, se propone la siguiente clasificación del deterioro de ambos materiales de acuerdo al mecanismo del mismo:

M A T E R I A L D E T E R I O R O M E C A N I S M O

Concreto

Deterioro químico
o físico

Reacciones químicas de intercambio iónico, precipitación, Ácido-base, complejación, etc.

Fracturas y fallas por cambios en temperatura, humedad, hielo o cargas mecánicas.

Refuerzo
Metalico

Corrosión

Reacciones electroquímicas por formación de pilas de corrosión: ánodo, cátodo, conductor iónico y eléctrico.

TIPOS DE CORROSION: Existen varias clasificaciones propuestas para los tipos de corrosión (31,33), pero en las estructuras de concreto armado, donde los refuerzos se encuentran previamente pasivados, el tipo de corrosión que se puede presentar es el localizado, ya sea por picaduras o bajo tensión. Para que aparezca éste último tipo de corrosión, se tiene que conjuntar un metal susceptible a sufrir este tipo de ataque y un medio específico, como por ejemplo los aceros de alta resistencia en concreto preesforzado sujetos a una elevada tensión mecánica y un medio agresor específico (en este caso el concreto).

Ahora bien, si el pH del concreto disminuye por una neutralización, entonces la capa pasiva del acero desaparece y se manifiesta una corrosión generalizada.

MECANISMO DE LA CORROSION: El mecanismo de la corrosión es electroquímico, por formación en el metal que se corroe de miles de micropilas o a veces macropilas que alejan a las diversas fases metálicas de su estado de equilibrio (34).

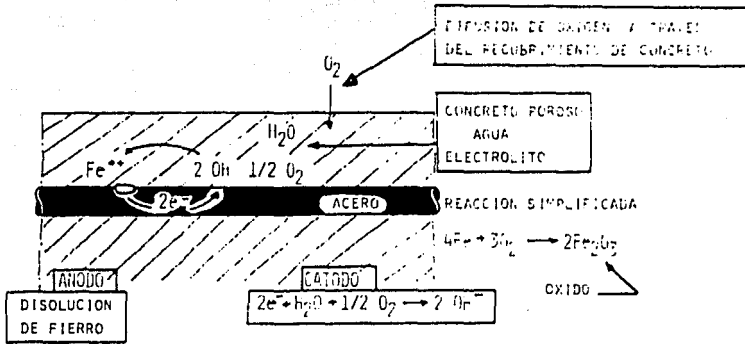
En 1938, Wagner y Traud desarrollaron la teoría del Potencial Mixto, con la cual explican que un metal se corroe debido a que ocurren a lo menos dos diferentes reacciones electroquímicas, una de oxidación (en el ánodo) y otra de reducción (en el cátodo).

Posteriormente, Evans representó esta teoría por medio de diagramas η vs. $\log i$, donde se manifiestan gráficamente las reacciones que se llevan a cabo durante un proceso de corrosión. Estos diagramas constituyen una base importante para poder interpretar un proceso de corrosión por métodos electroquímicos, además de poder calcular el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), la cual es una de las formas de representar la velocidad de corrosión (V_{corr}) del proceso.

Por ejemplo, las reacciones que se verifican en el proceso de corrosión de una varilla de acero embebido en concreto pueden esquematizarse de la siguiente manera (35):

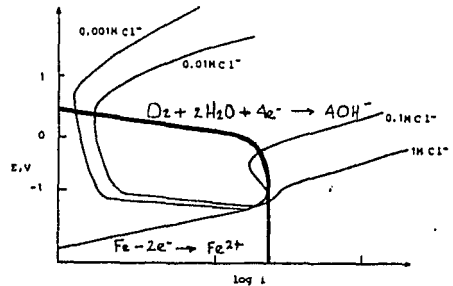
CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO

MODELO SIMPLIFICADO



Y si se representan estas reacciones en un Diagrama de Evans, resultaría un diagrama aproximadamente así:

Diagrama de Evans esquemático para la Corrosión del Acero de Refuerzo embebido en Concreto



En este momento es importante enfatizar en los componentes necesarios para el desarrollo de una pila de corrosión, ya que sin la participación de estos elementos en conjunto, la corrosión no puede progresar. Por lo tanto, su modificación constituye los puntos claves para poder controlar un proceso de corrosión.

Estos cuatro elementos son:

ANODO: Parte(s) de la superficie del metal donde se lleva a

cabo la reacción de oxidación, usualmente esta reacción es la disolución del mismo metal.

CATODO: Parte(s) de la superficie del metal en la(s) cual(es) ocurre la reacción de reducción, siendo esta generalmente la reducción del H^+ o de O_2 según el medio.

CONDUCTOR ELECTRONICO: Conductor eléctrico a través del cual fluyen los electrones provenientes de la reacción de oxidación hacia los sitios donde se está desarrollando la reacción de reducción. Puede ser un alambre que una ánodos y cátodos físicamente separados (como en un acumulador) o puede ser el mismo metal si se está corroyendo.

CONDUCTOR IONICO: Disolución iónica que transporta cargas eléctricas a través de especies químicas cargadas (iones), cerrándose así el circuito eléctrico de un sistema electroquímico.

En base a la teoría electroquímica de la corrosión, Lewis y Copenhagen en 1959 (20), consideraron que las pilas de corrosión más probables en el proceso de corrosión del refuerzo de acero en las estructuras de concreto debían ser las siguientes:

Acero (ANODO)	Concreto Permeable (bajo pH, concentración elevada de Cl^-)		Concreto poco Permeable (alto pH, baja concentración de Cl^-)	Acero (CATODO)
Acero (ANODO)	baja disponibilidad de O_2		alta disponibilidad de O_2	Acero (CATODO)

En las cuales se pone de manifiesto que en el proceso de corrosión del refuerzo de acero en el concreto, se involucran varios factores: los dependientes del concreto (permeabilidad, pH), los que dependen del acero (zonas anódicas y catódicas) y los del medio ambiente (Cl^- , O_2). Lo mencionado se verá a continuación con más detalle.

II.3) FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSION DEL REFUERZO DE ACERO EN EL CONCRETO

Como se dijo en el Prefacio, el proceso de corrosión del refuerzo de acero embebido en estructuras de concreto, debe contemplarse con una visión en conjunto de todos los factores que conforman el sistema de concreto armado.

Ya anteriormente en este capítulo se dieron algunas generalidades sobre el acero, el concreto y la corrosión. Ahora es el momento de conjuntar toda esa información y volcarla hacia un sólo objetivo: el comprender como influyen los factores dependientes del acero, del concreto y del medio de servicio en la corrosión del refuerzo de acero.

El tiempo total que transcurre para que la corrosión provoque un daño severo del concreto se puede representar bajo el siguiente modelo (20):

$$t_{\text{total}} = t_{\text{iniciación}} + t_{\text{propagación}}$$

Donde:

$t_{\text{iniciación}}$ Es el tiempo necesario para que las condiciones en la interfase acero/concreto sean propicias para el proceso de corrosión.

$t_{\text{propagación}}$ Es el tiempo requerido para que el proceso se desarrolle hasta un punto en que la corrosión sea apreciable o que la estructura exija alguna reparación.

Los tiempos de iniciación y propagación dependerán de que existan ciertos factores (12), que hacen que se desarrolle o acelere el proceso de corrosión; éstos son los llamados

factores desencadenantes y acelerantes de la corrosión; aunque su modo de actuar todavía no es muy claro en muchos casos.

FACTORES DESENCADENANTES DE LA CORROSION: Son todos aquellos capaces de generar sobre el metal zonas con una diferencia de potencial tal que la corriente provocada pueda romper la capa pasiva que normalmente recubre al acero en el concreto.

Se han identificado los siguientes factores:

- Cantidad crítica de O₂ y humedad
- Dosis suficientes de iones despasivantes, en particular Cl⁻, SO₄²⁻ y S²⁻
- Defectos superficiales del acero
- Constitución metalográfica del acero
- Descenso del pH habitual del concreto
- Pilas de pH o areación diferencial
- Corrientes parásitas
- Pilas galvánicas

FACTORES ACELERANTES DE LA CORROSION: Son aquellos que no son capaces de romper la capa pasiva del metal, pero que sin embargo influyen sobre la velocidad del proceso de corrosión. Algunos factores acelerantes son los siguientes:

- Una cantidad mayor de la crítica de O₂ y humedad
- La presencia de adiciones activas (puzolanas y escorias) que reduzcan la reserva alcalina de los cementos.

Los factores desencadenantes y acelerantes son los necesarios para que se desarrolle el proceso de corrosión, pero además existen los factores intrínsecos de cada una de las partes del sistema ACERO/ CONCRETO / MEDIO DE SERVICIO, que también contribuyen en el tiempo total del proceso de corrosión.

En conclusión, el proceso de corrosión del refuerzo de acero en las estructuras de concreto, aún en los casos más simples, es extremadamente complicado y está fuertemente influenciado por numerosos factores dependientes del concreto, del refuerzo metálico y del medio de servicio, como se muestra a continuación:

FACTORES DEPENDIENTES DEL CONCRETO	FACTORES DEPENDIENTES DEL REFUERZO METALICO	FACTORES DEPENDIENTES DEL MEDIO DE SERVICIO
Permeabilidad (Relación a/c, cemento/arena, compactación, curado)	Naturaleza química del refuerzo (compo- sición)	Humedad Relativa
Porosidad	Naturaleza física del refuerzo (mi- croestructura)	Degradación biológica
Espesor del recubrimiento	Condición super- ficial del refuer- zo (tipo de óxido superficial)	Acción de diversas sustancias como: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , O ₂ y CO ₂

Tipo de Cemento

Solicitaciones mecánicas en el refuerzo (tensión, compresión y torsión)

Corrientes parásitas

Agregados

Aditivos

Puesta en obra

II.3.1) FACTORES DEPENDIENTES DEL CONCRETO:

PERMEABILIDAD (7): Es la medida de la capacidad de un material poroso para transmitir fluidos a través de sus poros interconectados.

Por lo tanto, existe una relación entre la permeabilidad y la porosidad efectiva, más no con la porosidad absoluta.

La permeabilidad es la propiedad física más importante del concreto en cuanto a la corrosión del refuerzo metálico se refiere, porque la acción pasivante del concreto sobre el acero, sólo puede ser mantenida si el concreto proporciona una efectiva y durable protección física contra los agentes agresivos del medio de servicio.

La permeabilidad del concreto depende de varios factores como son la relación a/c, el tamaño y gradación de los agregados, la composición de la mezcla, el método de compactación y el curado.

POROSIDAD (7): Representa el porcentaje de espacio total disponible para ser ocupado por gases o líquidos.

En un estudio hecho por Powres y Brownyard (36) se identificaron dos tipos de poros en pastas de cemento: los poros de gel (poros pequeños entre las partículas de gel y la pasta) y los poros capilares (que son poros más grandes y que existen entre los agregados y las partículas de gel). En el concreto, además de éstos, se encuentran poros relativamente grandes que se forman debajo de las partículas del agregado debido a las diferentes velocidades de sedimentación entre las partículas de cemento y los agregados.

La porosidad total es proporcional a la relación agua/cemento.

ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO (6,7): Se ha recomendado una cubierta mínima de dos pulgadas de espesor de recubrimiento sobre la varilla, ya que en estudios realizados de la difusión de O₂ a través de concreto y mortero, se observa que a partir de ese espesor, el flujo de O₂ ya no cambia demasiado, como puede verse en la gráfica siguiente (6):

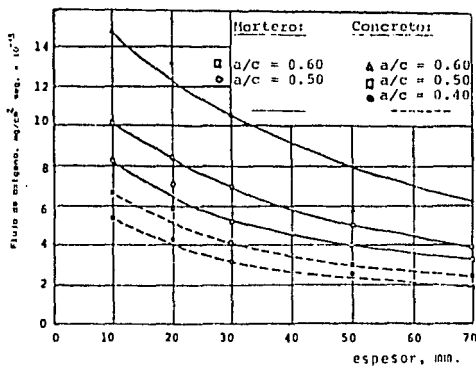


Figura de la relación a/c y del espesor del recubrimiento en el estudio del flujo de oxígeno a través de mortero y concreto.

También se ha reportado en la literatura que la velocidad de difusión del O_2 a través del concreto se ve significativamente afectada por el grado y forma de saturación del concreto con agua, ya que la corrosión del acero se acrecienta en aquellas partes de la estructura expuestas a periodos de secado y mojado; en cambio, aún con Cl^- presentes en la pasta, la velocidad de corrosión del acero es muy pequeña si el concreto está continuamente saturado con agua.

Así, para que el O_2 sea consumido en la reacción catódica del proceso de corrosión, en el caso del concreto sumergido en agua, el O_2 debe primeramente difundirse en la disolución acuosa, mientras que en el concreto parcialmente seco, la difusión del O_2 gaseoso es mucho más rápida.

Por lo anteriormente dicho, como puede observarse de la gráfica anterior, el espesor del recubrimiento es un factor muy relacionado con la permeabilidad, ya que 2 pulgadas de concreto permeable darán menor protección al acero que 0.25 pulgadas de concreto impermeable.

Asimismo el efecto del espesor del recubrimiento en la difusión de cloruros es más que una simple relación lineal (7), ya que la difusión de estos iones en la pasta de cemento no puede considerarse como una difusión normal para un electrolito dentro de un sólido poroso sin reacciones químicas. En la pasta de cemento, la difusión de los cloruros está acompañada de adsorciones físicas y uniones químicas que reducen la concentración del ion cloruro durante la difusión

dentro del concreto y por lo tanto la tendencia de la difusión interna se ve reducida.

TIPO DE CEMENTO: Como se ha mencionado anteriormente, la alta alcalinidad producto de la hidratación del cemento Portland, protege al acero embebido en el concreto por la formación de un óxido protector.

Las diferencias en los tipos de cemento son el resultado de la variación en composición química o finura y por lo tanto no todos los tipos de cemento tendrán la misma capacidad de proteger al acero.

Pressler et al (37) reportan que un cemento Portland bien hidratado (curado) puede contener del 15-30% de Ca(OH)_2 por peso de cemento original, esto es suficiente para mantener la solución dentro del concreto a un pH cercano a 13, independientemente del contenido de humedad.

El uso de cementos mezclados (puzolánico o escorias de alto horno) pueden bajo ciertas circunstancias ser perjudiciales por la reducción en la alcalinidad proporcionada; además, debe cuidarse muy bien la calidad y origen de estas adiciones, ya que se sabe de algunos casos reportados de corrosión acelerada al usar cemento puzolánico (6). Esto hace pensar que la calidad protectora de la puzolana está relacionada con su origen y tipo genérico.

Los cementos que contienen escorias de alto horno también pueden tener influencia en el proceso de corrosión del acero de refuerzo (38), dado que si las escorias contienen más del

1% de S^{2-} , puede ser causa de corrosión del refuerzo, especialmente a los alambres pretensados de diámetro pequeño. Sin embargo, los cementos mezclados pueden reducir sustancialmente la permeabilidad, incrementar la resistividad eléctrica y ser de 2 a 5 veces más resistentes a la penetración de Cl^- que el concreto fabricado con cemento Portland (39). Estos efectos pueden ser benéficos en cuanto a la corrosión se refiere y en algunas circunstancias los beneficios asociados a los cementos mezclados pueden superar sus efectos adversos.

Por otro lado, se ha observado que la fase $3CaO.A1O3$ del cemento, reacciona rápidamente con el agua y es la causa del fraguado instantáneo del cemento; por lo que esta reacción debe retardarse, razón por la cual se agrega $CaSO4.2H2O$ al clínker durante la fabricación del cemento.

El yeso forma una cubierta de ettringita ($3CaO.A12O3.3CaSO4.32H2O$) alrededor de los granos de aluminato tricálcico, con lo cual se retarda su reactividad. Sin embargo, el $CaCl2$ puede formar productos insolubles con los aluminatos en el cemento, siendo el más común la llamada sal de Friedel: $3CaO.A12O3.CaCl2.XH2O$.

La cinética de formación del complejo $Cl^-3CaO.A12O3$ es más lenta que la de formación de la ettringita, por lo que el complejo $Cl^-3CaO.A12O3$ se forma después de la ettringita (40), previniendo reacciones futuras de los sulfatos con el $3CaO.A12O3$ restante.

La combinación del $3CaO.A12O3$ con los cloruros es

frecuentemente referida como benéfica, ya que reduce la velocidad de penetración de los cloruros en el concreto; aunque Gjorv (41) menciona que no puede esperarse enlaces químicos de los cloruros penetrantes si el $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ es menor que el 8.6% del porcentaje del cemento.

AGREGADOS: Los agregados pueden contribuir a la corrosión en virtud de que es posible que contengan en sus poros cloruros o sulfatos y son capaces de absorber considerables cantidades de sal.

La otra forma en que los agregados pueden influir en el proceso de corrosión es a través de la susceptibilidad a la reacción álcali-agregado.

Ciertos tipos de cementos tienen un contenido relativamente alto de álcalis y tienden a reaccionar con los agregados que contienen sílice hidratada para formar álcali-silicatos complejos que fracturan el concreto, acelerando la penetración de agentes agresivos.

ADITIVOS: Como se vio anteriormente, la industria de la construcción utiliza frecuentemente aditivos para mejorar las propiedades fisicoquímicas del concreto.

Entre los más utilizados están los inclusores de aire, los reductores de agua, acelerantes del fraguado y los minerales finamente divididos.

Como consecuencia de la inclusión de aire, de la reducción de agua y del aumento de la finura en el concreto, la porosidad y

la permeabilidad de éste se ven abatidas.

Por lo tanto, la probabilidad de corrosión del refuerzo metálico, por difusión o capilaridad de los agentes agresivos externos, se ve disminuida.

Por otro lado, como aditivo acelerante del fraguado se utiliza frecuentemente CaCl_2 que aumenta la probabilidad de la corrosión del refuerzo de acero embebido en el concreto.

Actualmente es motivo de interés el desarrollo de aditivos inhibidores de la corrosión y se han ensayado varios compuestos como el dicromato de potasio, cloruro estanoso, cromatos de zinc y plomo, nitrito de sodio, nitrito de calcio, benzoato de sodio, etil anilina y el mercaptobenzotiazol (6). De ellos se requiere no sólo un buen funcionamiento como inhibidores de corrosión, sino que además no deben producir efectos perjudiciales en el concreto, como disminuir la resistencia a la compresión, dar tiempos de fraguado errático o producir manchas blancas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la superficie del concreto (eflorescencia).

Dado el gran empleo de aditivos en la industria de la construcción, uno de los objetivos de este trabajo es el estudio del efecto que tienen algunos de los compuestos activos de los aditivos de mayor uso, sobre la velocidad de corrosión del refuerzo metálico en las estructuras de concreto.

DISEÑO Y PUESTA EN OBRA: A través de un cuidadoso diseño y una buena práctica de construcción, la protección proveída por el concreto

al acero de refuerzo puede ser optimizada.

La prevención de un adecuado drenaje para remover el agua de una estructura es particularmente importante.

En el acero de refuerzo expuesto a cloruros y sujeto a ciclos intermitentes de secado y mojado, el grado de protección contra la corrosión es determinado principalmente por el espesor del recubrimiento del acero y la permeabilidad del concreto; no así en el concreto sumergido donde la velocidad de corrosión está limitada por la difusión del O₂ en el agua. Aunque el concreto convencional no es impermeable, puede hacerse un concreto de baja permeabilidad usando materiales de buena calidad, aditivos, una relación mínima de relación a/c, un buen curado en las consideraciones de los requerimientos del medio de servicio y una buena consolidación. Sin embargo, un factor incontrolable que puede terminar con la efectiva protección del acero en el concreto es el factor humano por una mala o deficiente puesta en obra. De poco sirve que existan códigos de buena práctica, un buen diseño o una gran investigación en este campo si no se lleva a cabo a la práctica sus conclusiones. También servirán de poco que se utilicen los mejores materiales de construcción si por ejemplo no se provee al acero de un recubrimiento o si el concreto no es bien curado.

Por lo anterior, actualmente muchas de las estructuras de concreto se prefieren fabricar en plantas donde se lleva a cabo un estricto control de su calidad desde el punto de vista de la Ingeniería Civil; desgraciadamente muchas veces no se toma en cuenta el proceso de corrosión del refuerzo

metálico en los parámetros de diseño de estas estructuras.

11.3.2) FACTORES DEPENDIENTES DEL REFUERZO METALICO

COMPOSICION QUIMICA Y MICROESTRUCTURA DEL ACERO: Varios autores (42)

han señalado que la velocidad de corrosión del acero es independiente del pH en el rango de 4 a 10, ya que ésta es controlada por la difusión del O₂ y que pequeñas variaciones en la composición del acero y en su microestructura no tienen influencia significativa en sus propiedades a la corrosión. Sólo la concentración de oxígeno, la temperatura y la agitación del medio determinan la velocidad de la reacción.

Esto quiere decir que en un acero de alto o bajo carbono, aceros similares microaleados, el hierro forjado, colado y el acero trabajado en frío, todos ellos observarán velocidades de corrosión similares en un ambiente dado (43).

Por otro lado, en medios ácidos y extremadamente alcalinos en ausencia de O₂, la reacción catódica es desprendimiento de H₂ y la sobretensión para el desprendimiento de éste sí depende del tipo de impurezas y fases presentes en un acero específico.

En cambio, en la región pasiva, a 10 pH 13, el efecto de las concentraciones usuales de impurezas o de los factores metalúrgicos sobre el proceso de pasivación del acero no se espera que sean pronunciados (42). Si bien el acero estructural es el material más ampliamente

usado en asociación con el concreto, es importante mencionar el comportamiento a la corrosión de otros metales que también se usan en la industria de la construcción:

Aceros Inoxidables.- El acero inoxidable 316 muestra un mejor comportamiento frente a la humedad y a los cloruros que el acero estructural, aunque no hay que perder de vista que éste es susceptible a fallar por picaduras en presencia de cloruros. Se ha empleado en casos especiales como en los reactores nucleares y en algunas estructuras expuestas a ambientes marinos que puedan justificar su costo.

Sin embargo, la serie 300 de aceros inoxidables son susceptibles a corrosión bajo tensión cuando la temperatura es superior a 60 °C y existen Cl⁻ en contacto con el material (28).

Cobre y sus aleaciones.- El cobre no se corroe normalmente en contacto con el concreto como se evidencia por su amplio uso como tuberías en las líneas de distribución de agua.

Sin embargo, se ha reportado que pequeñas cantidades de NH₃ y posiblemente NO₃⁻ pueden causar corrosión bajo tensión (CBT) del cobre.

Si el cobre se encuentra unido al acero, se forma un par galvánico provocando la corrosión de este último.

Zinc.- El zinc reacciona con materiales alcalinos que se encuentran en el concreto produciendo H₂. Aún así, el zinc en forma de un recubrimiento sobre el acero, es algunas veces embebido en el concreto, pero los datos disponibles de sus beneficios, si los hay, son conflictivos (20).

Aluminio.- El aluminio se utiliza ampliamente en las mamposterías. La parte embebida en el concreto se corroe rápidamente fracturando la estructura debido a los productos de corrosión.

También se han realizado estudios de la susceptibilidad a la corrosión en estructuras de concreto de otros metales tales como Pb, Ag, Sn, Ni, etc. (6).

CONDICION SUPERFICIAL DEL REFUERZO: Los estudios realizados acerca de los óxidos superficiales en las varillas de refuerzo

han tendido solamente hacia el estudio de las propiedades de adherencia entre el acero y el concreto y se reporta que el efecto de estos óxidos superficiales sobre la corrosión del acero no ha sido adecuadamente investigado (19).

Actualmente, existen puntos de vista diferentes entre Ingenieros Civiles y Electroquímicos respecto a la influencia del óxido rojo formado durante el almacenamiento de las varillas de acero.

Los primeros mencionan que este óxido favorece la adherencia en el concreto armado y los electroquímicos piensan que como este óxido es poroso y no protector, puede ser asiento de heterogeneidades en la superficie metálica y aumentar la probabilidad de corrosión del acero si existen las condiciones propicias para que se desencadene este proceso.

TIPO DE ESFUERZO APLICADO: Desde hace tiempo se han realizado estudios para evaluar la existencia de alguna relación entre el esfuerzo al que está sujeto el refuerzo de una estructura de concreto y su propensión a la corrosión.

En 1957 Evans (44) realizó una serie de pruebas sin observar diferencias significativas en la corrosión de alambres pretensados bajo carga y sin carga, en concreto con CaCl_2 .

En 1960, como consecuencia de una serie de fallas en tubos de concreto preesforzado, Monfare y Verbeck (47) compararon el comportamiento a la corrosión de varios alambres con diferentes tipos de preesfuerzo embebidos en concreto conteniendo CaCl_2 , sin encontrar diferencias significativas en la corrosión observada entre ellos.

La Portland Cement Association (44) realizó pruebas de corrosión en varios tipos de alambres preesforzados bajo diferentes niveles y tipos de esfuerzo en una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con CaCl_2 sin encontrar diferencia alguna en cuanto al tipo y velocidad de corrosión entre los

diferentes alambres ensayados, ni en la tendencia a la corrosión de los alambres preesforzados cuando se compararon en tensión, torsión y flexión.

En la actualidad, la corrosión bajo tensión (CBT) ha tomado gran importancia debido al hecho de que aleaciones de muy alta resistencia han fallado a esfuerzos por debajo de la mitad de su valor crítico de ruptura, debido a este tipo de corrosión.

El fenómeno de CBT se manifiesta por una falla mecánica (grieta) bajo circunstancias en donde, en la sólo presencia de corrosión o de un esfuerzo, no hubiera ocurrido ninguna falla. La ocurrencia de una falla localizada por corrosión bajo tensión requiere de un balance crítico entre una conducta activa (en la punta de la grieta) y otra pasiva (paredes de la grieta), lo que significa que su mecanismo es también de tipo electroquímico, y por lo tanto la CBT ocurre en aquellas condiciones de potencial en donde las transiciones activo-pasivo se observan, por lo que no debe confundirse a este tipo de corrosión con la de un metal simplemente sujeto a tensión.

En el estado actual del conocimiento no existe consenso acerca de la corrosión bajo tensión en las estructuras de

concreto preesforzado, ya que cierta literatura (6) reporta que no existen ejemplos documentados de dicha falla, mientras que otros autores (7,45) reportan estudios de CBT en dichas estructuras.

II.3.3) FACTORES DEPENDIENTES DEL MEDIO DE SERVICIO

HUMEDAD RELATIVA: Ya se ha mencionado que al aumentar el contenido de humedad o el grado de saturación en el concreto, disminuye la velocidad de difusión del O₂ en éste, abatiéndose por tal motivo la velocidad de corrosión del refuerzo metálico.

Un alto contenido de humedad reduce también la velocidad de difusión del CO₂ y por lo tanto la velocidad de carbonatación del concreto.

Un efecto importante del contenido de humedad del concreto se da sobre la resistividad eléctrica del mismo, por ejemplo, el secado de un concreto inicialmente saturado con agua resulta en un aumento de la resistividad eléctrica de, aproximadamente 7×10^3 ohm cm a 6×10^6 ohm cm. Otros autores (6) reportan valores de resistividad de 1×10^4 y 1.2×10^4 ohm cm, arriba de los cuales el daño por corrosión es improbable, aún en la presencia de Cl⁻, O₂ y humedad.

DEGRADACION BIOLÓGICA (46): La corrosión puede acelerarse debido a la presencia de organismos microbianos, ya que éstos producen especies agresivas como H⁺ o SO₄²⁻, que pueden actuar como catalizadores de algunas reacciones de corrosión.

Quizá la más nociva de las bacterias aeróbicas sea la "Thiobacillus concretivorus" que provoca muchos casos de deterioro del concreto y piedra de construcción, ya que es capaz de oxidar el azufre hasta ácido sulfúrico como parte de su metabolismo.

Otro grupo de bacterias cuyos estragos son más comunes, proliferan en condiciones anaeróbicas y reducen el sulfato a sulfuros o ácido sulfhídrico. La más abundante es la "Desulfovibrio", que es activa a $5 < \text{pH} < 9$.

Existen otros microorganismos que también contribuyen a la corrosión en gran medida, al interferir con el acceso de O_2 , ocasionando pilas de aireación diferencial. Dentro del agua de mar los microorganismos más comunes son los percebes y mejillones, que son los causantes de la formación de costras en los cascos de los barcos.

Para prevenir este tipo de ataque en las estructuras de concreto, existe un cemento Portland antibacteriano, o pueden agregarse durante la fabricación del concreto aditivos desinfectantes a cualquier tipo de cemento.

ACCION DEL ION CLORURO: Como se mencionò anteriormente, uno de los factores desencadenantes de la corrosión del acero es el ión cloruro.

Existe bastante literatura (6) que lo menciona como el principal destructor de la capa de óxido protector en el acero, aunque también se ha reportado que el SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , ClO_4^- , CH_3COO^- , H_2S y otros halógenos pueden causar la corrosión de éste.

Los iones Cl^- pueden introducirse al concreto de varias maneras:

- 1) Como aditivo del concreto, ya que es uno de los más conocidos acelerantes del fraguado y generalmente es agregado en forma de CaCl_2 hasta un porcentaje del 2% en peso de cemento. Los cloruros también pueden estar presentes en otros tipos de aditivos como los reductores de agua.
- 2) Como contaminante del agua de amasado, ya que algunos tipos de agua pueden contener gran cantidad de cloruros. En algunos lugares se utiliza agua de mar para amasar el concreto.
- 3) Con los agregados porosos, ya que éstos pueden contener grandes cantidades de cloruros.
- 4) Los cloruros pueden provenir de las sales de deshielo usadas en los caminos y carreteras, salmueras industriales, brisa marina, agua de mar, niebla o vapores y difundir desde el exterior a través del sistema capilar del concreto.

Existen tres modernas teorías para explicar los efectos de la ión cloruro en la corrosión del acero (6):

Teoría de la capa de óxido.- Esta teoría postula que los iones Cl^- penetran la capa de óxido protector sobre el acero a través de algunos poros o defectos en ella mucho más fácilmente que otros iones de mayor tamaño como por ejemplo, los iones SO_4^{2-} . Como consecuencia, los iones cloruro pueden dispersar coloidalmente la capa de óxido haciéndola más fácilmente penetrable.

Teoría de la adsorción.- Los iones Cl^- son adsorbidos en la superficie metálica en competencia con el O_2 disuelto y los iones OH^- . Los iones Cl^- promueven la hidratación de los iones metálicos, facilitando así la disolución del metal.

Teoría del complejo transitorio.- De acuerdo con esta teoría, los Cl^- compiten con los OH^- por los iones ferrosos producidos por la corrosión, formándose un complejo soluble de hierro-cloruro. Este complejo puede difundir lejos del ánodo destruyendo la capa protectora de óxido y permitiendo que la corrosión continúe. A cierta distancia del electrodo el complejo se destruye, precipitando $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y el ion Cl^- está ahora libre para transportar más iones ferrosos del ánodo.

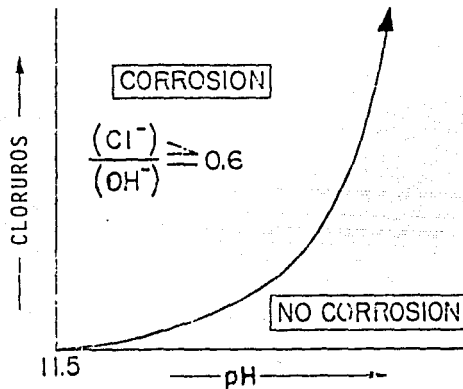
Si la corrosión no es controlada, cada vez más iones ferrosos continúan migrando hacia el concreto desde los sitios donde se lleva a cabo la corrosión, y al reaccionar con el O_2 se forman óxidos de hierro superiores, que dan como resultado un incremento de cuatro veces el volumen del metal disuelto, provocando esfuerzos internos que eventualmente fracturan al concreto.

En la década de los 70's se realizaron estudios tendientes a encontrar la concentración de Cl^- necesaria para iniciar el proceso de corrosión en las estructuras de concreto, concluyéndose que no se puede hablar de una concentración límite únicamente de Cl^- , ya que esta acción despasivante está íntimamente relacionada con la concentración de OH^- en la interfase metal/concreto (44).

Algunos investigadores (44) reportan como probable valor umbral, a la relación en actividades molares de

$\text{Cl}^-/\text{OH}^- > 0.6$ en la interfase metal-pasta, para destruir la pasividad en el sistema.

La cantidad requerida de Cl^- para iniciar la corrosión es por lo tanto dependiente del pH de la pasta en la interfase, como se muestra en la siguiente gráfica (47):



Relación entre cloruros y pH en la fase líquida y la corrosión del hierro.

A $\text{pH} < 11.5$ la corrosión puede ocurrir sin la presencia de Cl^- ; mientras que a $\text{pH} > 11.5$ una cantidad de Cl^- medible es requerida para iniciar el proceso de corrosión, incrementándose ésta al aumentar el pH.

En conclusión, no es posible hablar de una concentración de Cl^- universal para el inicio del proceso de corrosión en estructuras de concreto, porque esta concentración es dependiente del pH del concreto y de otros factores desencadenantes y acelerantes de la corrosión como se dijo anteriormente. Además de que los Cl^- pueden estar presentes en

el concreto como Cl^- solubles en agua o estar químicamente combinados con las fases del cemento como también se ha mencionado.

Los Cl^- solubles inducen la corrosión, mientras que los combinados tienen poco efecto sobre el proceso.

Esto trae como consecuencia que los límites de Cl^- en los códigos de cada país varíen ampliamente (6), dependiendo de las materias primas empleadas en la fabricación del concreto, el proceso de fabricación de éste y la agresividad del medio donde se encuentra la estructura, entre otros factores.

En el presente estado del conocimiento, el Comité 222 del ACI (6) sugiere las siguientes concentraciones máximas del Cl^- totales para minimizar el riesgo de corrosión inducida por Cl^- :

Concreto Preesforzado	0.08% por peso de cemento
Concreto Reforzado	0.20% por peso de cemento

Dicho Comité recomienda tener buen juicio en aplicar estos límites, teniendo en mente que otros factores son siempre necesarios para la corrosión en el concreto.

Dada la necesidad de contar con estudios sobre los límites tolerables de Cl^- de las estructuras de concreto fabricadas con materias primas nacionales y bajo las condiciones de agresividad de nuestro país, uno de los objetivos de este trabajo es dar un panorama del efecto del ion Cl^- sobre la

velocidad de corrosión del acero de refuerzo embebido en tres tipos de cementos mexicanos y mostrar su capacidad de protección al acero bajo diferentes condiciones de agresividad por Cl^- .

EFFECTO DEL ION SULFATO: Como se ha visto, los SO_4^{2-} se han reportado como posibles iones despasivantes del acero en el concreto, aunque esta información no está bien documentada.

Por otra parte, también se ha mencionado que su principal acción destructiva es sobre la masa de concreto por la formación de la Ettringita, que puede provocar la expansión y fractura del concreto y de este modo cooperar para el progreso de la corrosión del refuerzo metálico en el concreto.

EFFECTO DEL OXIGENO: El papel del O_2 en un proceso de corrosión es de gran importancia porque actúa como desencadenante y como acelerante de la corrosión.

Además es un factor limitante del desarrollo de la corrosión puesto que es la especie consumida en la reacción catódica en el proceso de corrosión del acero en el concreto.

EFFECTO DEL BIOXIDO DE CARBONO (CARBONATACION): Debido a la alcalinidad del cemento Portland hidratado, el concreto puede reaccionar con el CO_2 atmosférico

y reducir su pH a alrededor de 10, donde el acero no se encuentra totalmente pasivado, pudiendo ocurrir la corrosión de éste (6).

La carbonatación no es un problema si el concreto se encuentra totalmente seco o bien, saturado completamente con agua.

Las máximas velocidades de carbonatación se han observado cuando la humedad relativa es de alrededor del 50%.

CORRIENTES ERRATICAS O PARASITAS: Las corrientes erráticas son aquellas que siguen otros caminos que ofrecen menor resistencia al paso de corriente que el del circuito deseado.

La corrosión por esta causa debe considerarse como una posibilidad en la vecindad de cualquier equipo de corriente directa, como vías electrificadas, plantas de electrodepósito y los sistemas de protección catódica.

Miller y colaboradores (48) han discutido este problema en las estructuras de concreto y mencionan que la atención debe centrarse cuando un sistema de protección catódica se encuentra junto a una estructura de concreto armado, la cual no está directamente conectada al sistema de protección.

En el caso en donde existan cantidades significativas de Cl^- en el concreto, puede ocurrir una corrosión severa del refuerzo de acero. En ausencia de Cl^- sin embargo, no se han encontrado evidencias de daño alguno.

II.4) METODOS DE ESTUDIO DE LA CORROSION EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO (20,49,50)

Una vez que se han planteado los conceptos generales de la influencia de todos los factores principales que se involucran en el proceso de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, es importante revisar los métodos conocidos para evaluar el grado de deterioro de las estructuras de concreto armado durante su vida de servicio, determinar la necesidad de una reparación, proponer métodos de protección o el estudio del fenómeno de corrosión.

Existen varios métodos de evaluar el deterioro de las estructuras de concreto por corrosión, desde los muy simples hasta los muy altamente sofisticados; algunos de éstos sólo son prácticos para su uso en el laboratorio, pero prometen su aplicación en el campo en el futuro.

TECNICAS VISUALES Y DE ULTRASONIDO: Las técnicas visuales sólo permiten apreciar el proceso de corrosión cuando éste ya está presente y no en sus etapas iniciales, sin permitir cuantificar el ataque a la estructura metálica.

Las técnicas de ultrasonido, especialmente las que se basan en el proceso de reflexión, tienden a la determinación del agrietamiento interno y de los productos de corrosión atrapados bajo la superficie.

Es importante recalcar que estas técnicas no son destructivas.

SEGUIMIENTO DEL ION CLORURO: Esta es una técnica indirecta que consiste en la medición de la concentración del ión Cl^- en el concreto.

La técnica ha sido de uso común tanto en el laboratorio como en el campo debido al importante papel que juega el ión Cl^- en la iniciación del proceso de corrosión.

Presenta algunas desventajas porque es una técnica puntual que no ofrece un panorama completo de la distribución del ión en la estructura de concreto y se utiliza solamente como un sistema oportuno de anticipación del problema y no como un mecanismo para la localización de los puntos en proceso de corrosión.

MEDICION DEL POTENCIAL ELECTROQUIMICO: La medición del potencial electroquímico se ha usado ampliamente para evaluar el estado de los materiales metálicos en diversos medios.

En las estructuras de concreto, la alta resistividad de éste, aunado con el hecho de que la acción de las macroceldas de corrosión involucra una respuesta eléctrica, permite que las mediciones del potencial sobre la superficie del concreto tiendan a la localización de áreas anódicas y catódicas en el

acero de refuerzo, pudiéndose construir mapas de potenciales para el acero embebido en el concreto.

Esta técnica es la más usada en el campo por su facilidad de manejo, pero la medida de un potencial electroquímico no da información cuantitativa sobre la velocidad con que se lleva a cabo el proceso de corrosión.

METODO DE RESISTENCIA ELECTRICA: Este método se basa en la conocida fórmula $R = \rho l/A$, que relaciona el cambio de resistencia eléctrica de un elemento sensor a medida que el proceso de corrosión reduce su área en la sección transversal.

Este método se ha usado ampliamente para determinar velocidades de corrosión en distintos medios. La principal ventaja del método de resistencia eléctrica radica en la posibilidad de evaluar los cambios que se presentan en la velocidad de corrosión en función del tiempo y poder usarse en el campo.

Esto lo hace más ventajoso que la técnica de medición del potencial electroquímico, pero tiene algunas desventajas. Por ejemplo los valores de velocidad de corrosión son representativas exclusivamente del punto en que se localiza la sonda que se utiliza para las mediciones de resistencia eléctrica. Esta técnica presenta dificultades de uso comparada

con las mediciones del potencial electroquímico, pero estas dos técnicas pueden usarse complementariamente.

METODO DE RESISTENCIA DE POLARIZACION: Ya que es el método utilizado para evaluar la velocidad de corrosión en este trabajo, en el apéndice B se hace una revisión amplia del método.

METODO MECANICO: Este método mide los esfuerzos que se desarrollan en el concreto reforzado como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo.

Se han utilizado probetas de concreto reforzado circundadas por cinturones de titanio y se colocan deformímetros eléctricos sobre los cinturones para establecer el momento exacto de la aparición del esfuerzo y su crecimiento en función del tiempo. Sin embargo, como los esfuerzos tienden a localizarse en el área donde se encuentra la corrosión activa, no siempre es fácil puntualizar ésta zona por esta técnica.

IMPEDANCIA FARADAICA Y RUIDO ELECTROQUIMICO: Recientemente, con el avance de la electrónica se han desarrollado nuevas técnicas

electroquímicas como la impedancia faradàica y el ruido electroquímicos. Esto debido por un lado al reconocimiento de la dinàmica en los procesos electroquímicos en general, y en particular a los errores al utilizar tècnicas potencioestàticas, galvanostàticas y mediciones de resistencia de polarización para la determinación de la velocidad de corrosión.

Muchos de estos errores aparecen debido a que la "resistencia" de la reaccion electròdica depende de la frecuencia. Esto es que las reacciones no son puramente resistivas sino que tienen un componente capacitivo que debe tomarse en cuenta, por lo que es màs adecuado medir la impedancia del electrodo.

Sin embargo, la impedancia de una reacciòn electròdica es sumamente compleja y sus componentes incluyen el proceso de corrosión, ademàs de las resistencias y capacitancias òhmicas debidas a procesos de difusiòn y adsorciòn en òxidos y películas pasivas, que contribuyen a la medida de la impedancia. Todos estos procesos son responsables del ruido observado a bajas frecuencias y que dieron lugar al desarrollo de la tècnica de ruido electroquímico.

Esta tècnica han permitido estudiar los mecanismos y la cinètica de procesos electroquímicos difìciles de investigar con otras tècnicas.

II.5) METODOS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO EN EL CONCRETO (6,49,51)

Como se ha mencionado anteriormente, para el desarrollo de una pila de corrosión es necesaria la participación de cuatro elementos en conjunto: ánodo, cátodo, conductor electrónico y conductor iónico.

Los métodos de protección contra la corrosión se basan en el control de uno o más de estos componentes básicos, de tal manera que su efecto se vea reflejado en una disminución de la velocidad de corrosión del metal a proteger.

En el caso particular de las estructuras de concreto armado, los métodos de protección pueden clasificarse de la siguiente manera:

1) Aquellos que actúan sobre el concreto, impidiendo la difusión de O₂ y de los agentes agresivos del exterior a través de los poros del concreto.

Para este fin se han empleado aditivos reductores de agua, fluidificantes, inclusores de aire, hidrófugos y materiales finamente divididos.

También se han aplicado sobre la superficie del concreto membranas impermeables y polímeros.

Se han desarrollado asimismo concretos artificiales en base a emulsiones de concreto y látex.

2) Aquellos que modifican la superficie del refuerzo metálico, aumentando su resistencia a la corrosión. En este sentido se han empleado recubrimientos metálicos de zinc y níquel y en algunos casos se ha empleado acero

inoxidable como refuerzo.

Tambièn se usan recubrimientos no metàlicos, principalmente resinas epòxicas con buenos resultados.

- 3) Aquellos que actúan sobre la corrosión misma. Para este fin se emplean inhibidores de la corrosión y sistemas de protección catódica.

La protección catódica es el método más versátil para el control de la corrosión ya que es aplicable a cualquier estructura eléctricamente continua y es casi el único recurso disponible para controlar el problema, una vez que la corrosión se ha detectado en una estructura en servicio.

Para concluir es necesario tener en mente que los mejores esfuerzos para el control de la corrosión deben hacerse desde el diseño mismo de la estructura y no cuando se ha presentado el problema.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL

III.1) QUE SE HIZO

En este trabajo se estudia el efecto que sobre la velocidad de corrosión del refuerzo de acero embebido en el concreto tienen los siguientes factores:

- 1) El tipo de cemento
- 2) La relación agua/cemento (porosidad)
- 3) Diferentes concentraciones del ión Cl^-
- 4) El efecto de los cationes Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} que acompañan al anión cloruro.
- 5) El efecto de aditivos
 - i) Nitrito de sodio como inhibidor de la corrosión
 - ii) Lignosulfonato de calcio como fluidificante y estearato de calcio como impermeabilizante.

El seguimiento del efecto de estos factores se realizó a través de mediciones de la velocidad de corrosión instantánea por el método de Resistencia de Polarización (Ver Apéndice B), del potencial a circuito abierto (E_{corr}) del acero; y de la resistencia óhmica del concreto compensada electrónicamente; en probetas de mortero durante 120 días.

Paralelamente se siguió el efecto de dichos factores sobre la velocidad de hidratación de los cementos ensayados y el desarrollo de la resistencia a la compresión de los mismos.

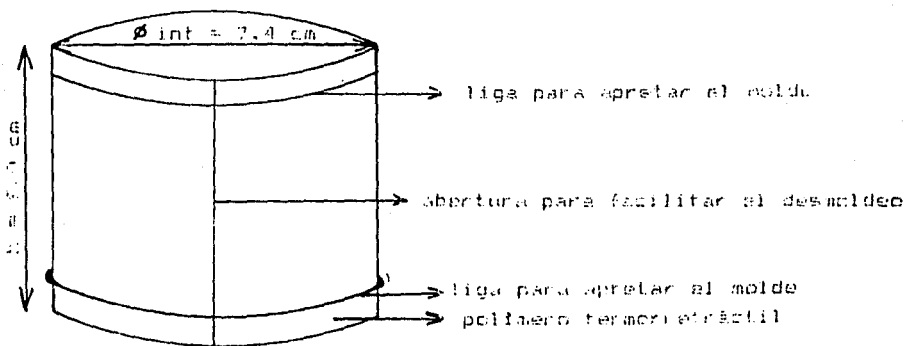
Al término de los ensayos electroquímicos se fracturaron algunas de las probetas de concreto, realizándose análisis gravimétricos de las varillas para correlacionar su pérdida de peso con los datos de velocidad de corrosión obtenidos electroquímicamente, y a la masa de concreto se le determinó

la concentración de Cl^- totales y Cl^- libres con el objeto de cuantificar la cantidad de Cl^- que reaccionaron químicamente con los componentes de los distintos tipos de cementos ensayados (para mayor información sobre estas determinaciones, ver el apéndice A).

III.2) EN QUE SE HIZO

Los ensayos electroquímicos se realizaron sobre probetas de mortero fabricadas de la siguiente manera:

Características del molde.- Los moldes utilizados para la fabricación de las probetas fueron de PVC y con las dimensiones que se muestran a continuación:

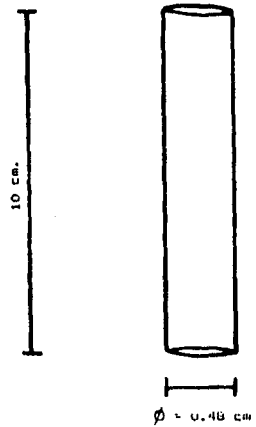
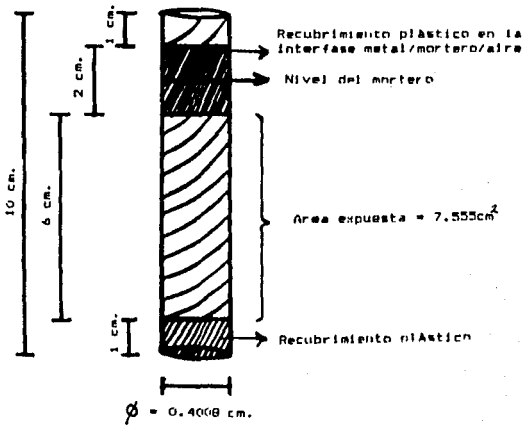


Características de los electrodos.- Los ensayos electroquímicos fueron realizados por triplicado, embebiendo en cada probeta de concreto, tres varillas de acero (ELECTRODOS DE TRABAJO) y

una barra de grafito (ELECTRODO AUXILIAR), con las características que se muestran a continuación:

ELECTRODO DE TRABAJO:
(Varillas de acero AISI 1020)

ELECTRODO AUXILIAR
(Barra de grafito)



III.3) COMO SE HIZO

Diseño de la mezcla.- La mezcla de mortero de todas las probetas se preparó utilizando una relación cemento/arena de 1/3 en base 300 g de cemento.

Las sustancias elegidas para probar su influencia sobre la velocidad de corrosión fueron disueltas previamente en el agua de amasado, excepto el estearato de calcio que fue suspendido en ésta.

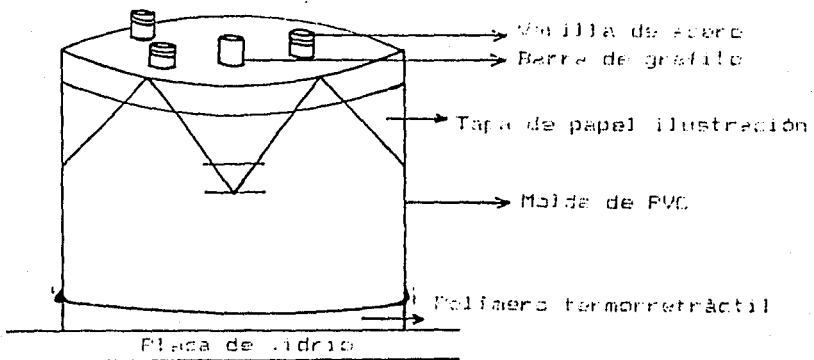
El mezclado se realizó de acuerdo a la norma C305-65 ASTM (52).

Preparación de las probetas.- La mezcla se vació a los moldes en dos etapas, la primera hasta la mitad de la capacidad del molde seguida de un apisonamiento manual, y en la segunda etapa se llenó completamente el molde volviéndose a compactar la mezcla.

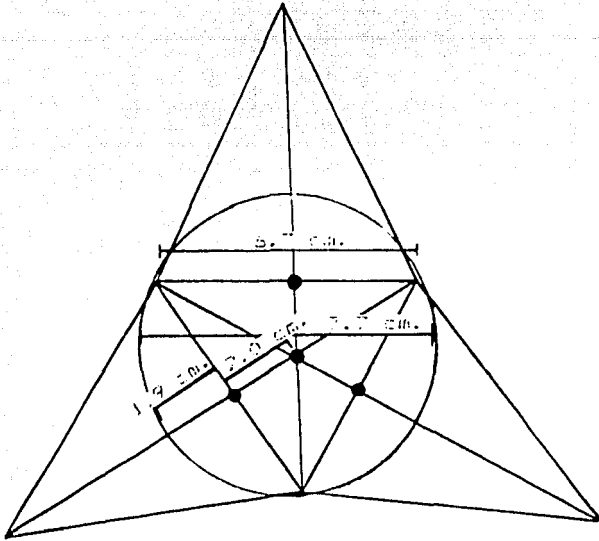
Una vez llenado el molde se colocó una tapa de papel ilustración con la finalidad de sostener firmemente los electrodos en una posición determinada.

Los electrodos fueron embebidos en el mortero bajo presión manual y el molde se vibró externamente para evitar la formación de cavidades de aire y asegurar el contacto íntimo del acero con el concreto.

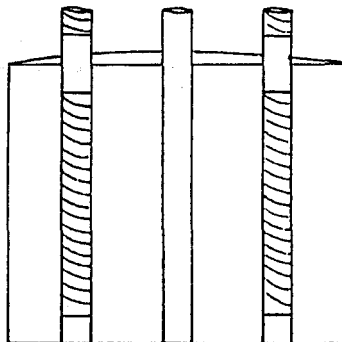
La forma final de las probetas durante su fabricación fue la siguiente:



VERBA ESQUEMATICA DE LA PROBETA DURANTE SU FABRICACION



DISTRIBUCION DE LOS ELECTRODOS EN LA TAPA DE PAPEL ILUSTRACION



CORTE LONGITUDINAL DE LA PROPIETA

Las probetas de desmoldaron 24 hrs. después de haber sido coladas y fueron inmediatamente introducidas en una cámara de humedad relativa al 100% medida con higrómetro de pelo.

La primera medición se efectuó 24 hrs. después del colado de las probetas.

En total se fabricaron 28 probetas con distinta composición como se muestra a continuación en forma detallada:

1) EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO

En este apartado se estudió la influencia que tienen los tres cementos de mayor producción y uso en nuestro país sobre la velocidad de corrosión del refuerzo de acero. Para lo cual se construyeron las siguientes probetas:

# PROBETA	TIPO DE CEMENTO	RELACION A/C
1	Portland I	0.5
2	Puzolánico	0.5
3	Portland III	0.5

2) EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO (POROSIDAD)

La relación agua/cemento está íntimamente ligada a la resistencia a la compresión de las estructuras de concreto, a sus trabajabilidad para la puesta en obra y a la porosidad de la masa de concreto, por lo que es importante caracterizar esta variable respecto a la velocidad de corrosión del

refuerzo metálico. Para ello se fabricaron varias probetas como se muestra a continuación:

# PROBETA	RELACION A/C	TIPO DE CEMENTO
4	0.1	Portland I
1	0.5	Portland I
5	0.6	Portland I
6	0.65	Portland I

3) EFECTO DE LA CONCENTRACION DE CLORUROS

Se ha reportado en la literatura que el principal agente destructor de la pasividad del acero en el concreto es el ión Cl^- , y éste puede provenir de distintas fuentes, ya sea por difusión desde el exterior en medio salino, o puede ser agregado directamente a la masa de concreto en el agua de mezclado, como aditivo para acelerar el fraguado o como contaminante de los agregados.

En esta parte del proyecto se estudió el efecto de diferentes concentraciones del ión Cl^- sobre la velocidad de difusión del refuerzo de acero embebido en concreto preparado con cada uno de los tres tipos de cemento anteriormente señalados. Para ésto se fabricaron las siguientes probetas:

# Probeta	P A R A		Tipo de cemento
	A/C = 0.5		
	% de Cl^- (como NaCl) por peso de cemento		
7,8,9,10	0.25, 0.5, 1.0, 3.0		Portland I
15,16,17,18	0.25, 0.5, 1.0, 3.0		Puzolánico
19,20,21,22	0.25, 0.5, 1.0, 3.0		Portland III

P A R A A/C = 0.65

# Probeta	% de Cl ⁻ (como NaCl) por peso de cemento	Tipo de cemento
11,12,13,14	0.25, 0.50, 1.0, 3.0	Portland I

4) EFECTO DEL TIPO DE CATION

En este punto se estudió el efecto de distintos cationes acompañantes del anión Cl⁻ y su influencia sobre la proporcionalidad de la velocidad de corrosión del refuerzo. Para ello se eligieron los cationes Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ a una misma concentración del ión Cl⁻, como se muestra a continuación:

#Probeta	Cation	%Cl ⁻	Relación a/c	Tipo Cemento
10	Na	3	0.5	Portland I
23	Mg	3	0.5	Portland I
24	Ca	3	0.5	Portland I

5) EFECTO DE OTROS ADITIVOS

Nitrito de sodio como inhibidor de la corrosión.- Se ha reportado en la literatura que el ión nitrito puede actuar como probable inhibidor de la corrosión del refuerzo en las estructuras de concreto, por lo cual se estudió la factibilidad de su uso en los concretos fabricados con los cementos de producción nacional, realizándose los siguientes ensayos:

# Probeta	%NO ₂ ⁻	%Cl ⁻	Rel a/c	Tipo Cemento
26	2	3	0.5	Portland III
27	3	3	0.5	Portland III

Aditivos orgánicos empleados comunmente en la industria de la construcción .- Se caracterizó el comportamiento del refuerzo de acero embebido en concreto amasado con un aditivo fluidificante (lignosulfonato de calcio) y con un aditivo impermeabilizante (estearato de calcio) en las concentraciones típicas usadas en la industria de la construcción y en presencia de cloruros en la masa de concreto, fabricándose las siguientes probetas:

# Probeta	Aditivo	% Cl ⁻	Rel a/c	Tipo Cemento
25	0.1% de lignosulfonato de calcio	3	0.5	Portland III
28	1.0% de estearato de calcio	3	0.5	Portland III

Por otro lado, los ensayos del desarrollo de la resistencia a la compresión fueron realizados en cubos del mismo mortero con que se fabricaron las probetas para los ensayos electroquímicos y se mantuvieron en las mismas condiciones de humedad.

Las pruebas de resistencia a la compresión (ver apéndice A para detalles del método), se realizaron por duplicado en cubos de 2.5

cm de arista a los 14, 28, 60, 90 y 120 días de haberse colado.

El seguimiento de la velocidad de hidratación se hizo utilizando pastas de cemento con el mismo porcentaje de sustancias elegidas para probar su influencia sobre la velocidad de corrosión en base a 100 g. de cemento.

Las pastas se fabricaron mezclando las sustancias elegidas disueltas en agua y el cemento de manera manual y llenando cilindros de vidrio de 4 cm. de altura y 1.2 cm. de diámetro, manteniéndolas en las mismas condiciones de humedad que los ensayos anteriores.

La velocidad de hidratación se siguió por la determinación del porcentaje de cal libre liberado a los 14, 28, 60, 90 y 120 días después de la fecha de colado (para detalles del método empleado, ver apéndice A).

III.4) REACTIVOS UTILIZADOS

- 1) Cementos Portland I, Puzolánico y Portland III con la siguiente composición:

TIPO DE CEMENTO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	C O M %Fe ₂ O ₃	F O S %CaO	I C I O N %MgO	C I O N %SO ₃	I O N %K ₂ O	N %Na ₂ O
Portland I	20.05	4.62	3.05	63.91	2.04	4.09	0.45	0.50
Puzolánico (% Puzolana = 14.82)	28.10	6.39	4.70	54.38	1.93	5.2	0.98	0.60
Portland III	20.05	5.22	3.15	63.73	1.83	3.9	0.57	0.68

2) Agua:

Se empleó agua bidestilada para el amasado de las muestras.

3) Arena:

Se utilizó arena estándar gradada de Ottawa, III. Norma C109-77 ASTM (53).

4) Acero de refuerzo:

Se utilizaron varillas de acero AISI 1020 con la siguiente composición:

%C	%Mn	%Si	%S	Dureza
0.21	1.12	0.16	0.018	86 R _b

5) Sustancias utilizadas en el amasado de las muestras:

NaCl R.A. secado a 110 °C

CaCl₂ anhidro R.A. secado a 110 °C

MgCl₂·6H₂O Q.F. secado a 45 °C

NaN₂ R.A.

Estearato de calcio R.A.

Lignosulfonato de calcio
(ANALISIS TOTAL)

pH solución 3%	= 7
sólidos totales	= 5.3%
SO ₄ ²⁻ como S	= 0.5%
Ca	= 7%
Azúcar reductor	= 13.8
Meloxil	= 8.6%
humedad	= 6%
densidad	= 36 lb/ft ³
grumos = 0, Fe = 0, Zn = 0, Mn = 0, Mg = 0	
color	CAFE

III.5) EQUIPO EMPLEADO

Potenciostato/Galvanostato FAR Modelo 173

Graficador X-t marca Linseis

Electrodo de calomelanos saturado Corning

Electrodo de Ag/AgCl

Higrómetro de pelo

Cámara de humedad relativa

Equipo de extracción Soxhlet

Equipo de titulación potenciométrica

Mezcladora marca Hobart Manufacturing Co.

Máquina de compresión universal marca Losenhausen I.

Equipo de reflujos en serie

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

CAPITULO IV: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en las distintas pruebas realizadas para investigar la influencia de los factores analizados sobre la velocidad de corrosión del refuerzo de acero embebido en las estructuras de concreto armado.

IV.1) ENSAYOS ELECTROQUIMICOS

De los resultados electroquímicos obtenidos por triplicado en cada una de las 28 probetas ensayadas, se presentan a continuación sólo los valores máximos de velocidad de corrosión (i_{corr}) y sus respectivos potenciales de corrosión (E_{corr}) en función del tiempo, ya que en este caso es más importante manejar los valores máximos de velocidad de corrosión que un promedio de los valores obtenidos en cada uno de los electrodos embebidos en una misma probeta; porque los valores máximos de velocidad de corrosión siempre representan peligros potenciales de fallas de la estructura y esta información puede diluirse fuertemente dentro de un promedio de velocidades de corrosión.

Además, si es posible disminuir la velocidad máxima de corrosión, se tendrá la seguridad que los valores abajo de ésta también serán disminuidos o controlados.

Asimismo se observó que el comportamiento de los tres electrodos de cada probeta mostraron una tendencia similar a la corrosión en función del tiempo y por lo tanto la

presentación únicamente de los valores máximos encontrados de velocidad de corrosión y de potencial de corrosión es válida.

Por otro lado, los valores presentados de la resistencia óhmica compensada electrónicamente (RESISTENCIA COMP.) entre el electrodo de referencia y el de trabajo, depende predominantemente del espesor del recubrimientos de concreto sobre las varillas y como se puede observar del diseño de las probetas, que es el mismo en todos los casos, este valor dependerá casi exclusivamente de la cantidad de iones presentes en la masa de concreto y de la resistencia de los productos de hidratación del cemento con el que se fabricó el concreto.

En vista de lo anterior, los valores de resistencia óhmica compensada presentados, son un promedio de los encontrados por triplicado.

Los valores de Resistencia de polarización (R_p) fueron obtenidos haciendo el cociente $\Delta E / \Delta I$, y el valor de ΔE fue de 10 mV ya que se empleó una polarización de 10 mV anódicos en todas las determinaciones.

El valor empleado de la constante B en la ecuación de Stern-Geary para determinar la velocidad de corrosión en todas las muestras fue de 26 mV, por las razones explicadas en el apéndice B.

E F E C T O D E L T I P O D E C E M E N T O

C E M E N T O F O R T L A N D T I P O I

TIEMPO: (dias)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
2	-377	0.980	170.0	10.204	0.337
4	-280	1.300	90.0	7.692	0.447
5	-245	0.700	70.0	14.286	0.241
6	-206	0.450	120.0	22.222	0.155
7	-207	0.500	80.0	20.000	0.172
8	-234		90.0	ERR	ERR
9	-180	0.450	100.0	22.222	0.155
11	-166	0.280	116.7	35.714	0.096
13	-200	0.500	120.0	20.000	0.172
15	-166	0.360	146.7	27.778	0.124
22	-137	0.315	160.0	31.746	0.108
29	-134	0.265	183.3	37.736	0.091
36	-143	0.260	170.0	38.462	0.089
43	-127	0.245	196.7	40.816	0.084
50	-119	0.200	193.3	50.000	0.069
57	-116	0.100	225.0	100.000	0.034
64	-102	0.175	181.7	57.143	0.060
70	-104	0.185	173.3	54.054	0.064
78	-98	0.350	196.7	28.571	0.120
85	-105	0.160	203.3	62.500	0.055
92	-116	0.175	205.7	57.143	0.060
99	-98	0.170	213.3	58.824	0.059
106	-116	0.185	196.7	54.054	0.064
113	-108	0.190	203.3	52.632	0.065
120	-108	0.180	216.7	55.556	0.062

TABLE 4.1 EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 (ver figura 4.1)

EFEECTO DEL TIPO DE CEMENTO

Cemento Portland Tipo I

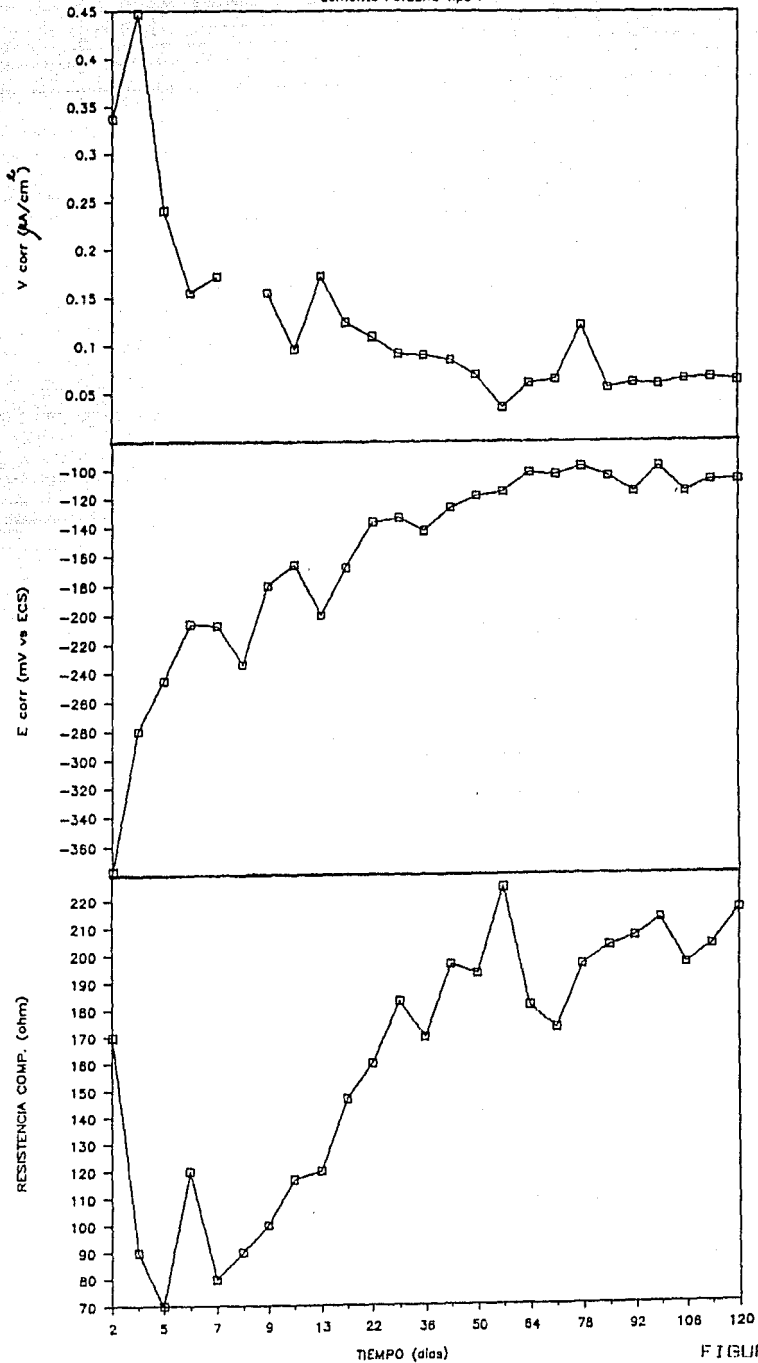


FIGURA 4.1

EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO

CEMENTO PUZOLANICO

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-411	4.500	36.7	2.222	1.549
2	-352	3.730	63.3	2.681	1.284
3	-309	1.700	90.0	5.882	0.585
4	-299	1.600	95.7	6.250	0.551
6	-277	1.350	120.0	7.407	0.465
8	-257	0.840	130.0	11.905	0.289
10	-271	0.690	136.7	14.493	0.237
11	-267	0.720	136.7	13.889	0.248
13	-234	0.620	150.0	16.129	0.213
15	-237	0.510	161.7	19.608	0.176
22	-213	0.400	180.0	25.000	0.138
29	-204	0.355	220.0	28.169	0.122
36	-200	0.355	230.0	28.169	0.122
43	-194	0.315	233.3	31.746	0.108
50	-184	0.305	261.7	32.787	0.105
57	-197	0.320	258.3	31.250	0.110
64	-183	0.275	283.3	36.364	0.095
71	-177	0.210	311.7	47.619	0.072
78	-182	0.265	330.0	37.736	0.091
85	-166	0.247	360.0	40.486	0.085
92	-152	0.240	370.0	41.667	0.083
100	-166	0.235	403.3	42.553	0.081
106	-157	0.215	423.3	46.512	0.074
113	-144	0.220	500.0	46.455	0.076
120	-133	0.225	520.0	44.444	0.077

TABLA 4.2 EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO. Cemento Pozolánico
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 (ver figura 4.2)

EFFECTO DEL TIPO DE CEMENTO

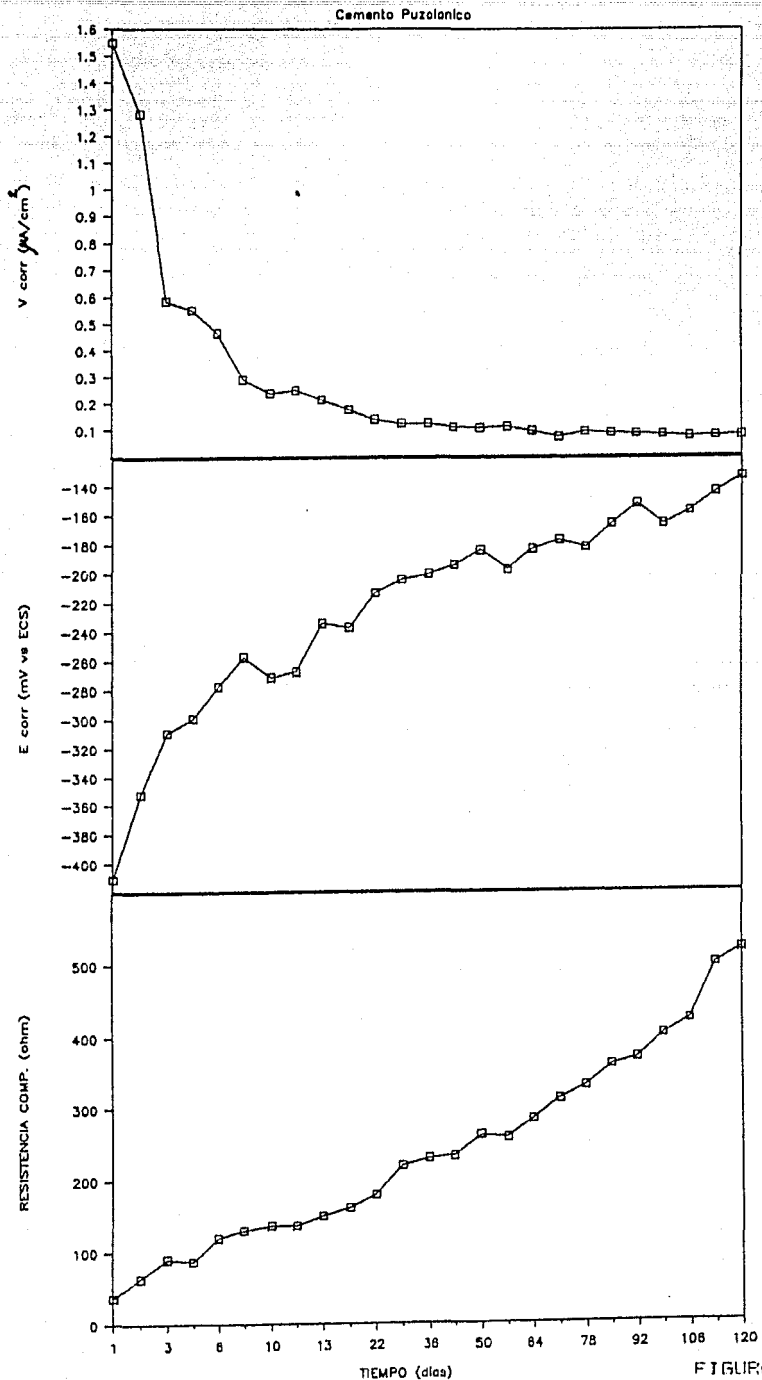


FIGURA 4.2

E F E C T O D E L T I P O D E C E M E N T O

CEMENTO PORTLAND TIPO III

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-260	0.785	48.3	12.739	0.270
2	-224	0.765	73.3	13.072	0.263
3	-222	0.590	95.0	16.949	0.203
4	-193	0.410	96.7	24.390	0.141
5	-191	0.345	100.0	28.986	0.119
7	-177	0.365	116.7	27.397	0.126
8	-171	0.320	118.3	31.250	0.110
11	-171	0.380	120.0	26.316	0.131
14	-149	0.200	136.7	50.000	0.069
16	-150	0.220	146.7	45.455	0.076
21	-160	0.190	141.7	52.632	0.065
28	-166	0.110	148.3	90.909	0.038
35	-169	0.140	165.0	71.429	0.048
42	-163	0.215	145.0	46.512	0.074
49	-167	0.195	140.0	51.282	0.067
56	-172	0.180	171.7	55.556	0.062
63	-178	0.190	156.7	52.632	0.065
70	-176	0.180	156.7	55.556	0.062
77	-176	0.210	145.0	47.619	0.072
84	-166	0.190	163.3	52.632	0.065
91	-159		166.7	ERR	ERR
100	-168	0.175	203.3	57.143	0.060
108	-185	0.190	180.0	52.632	0.065
119	-191	0.220	150.0	45.455	0.076
120		0.200	153.3	50.000	0.069

TABLA 4.3 EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO. Cemento Portland Tipo III
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 (Ver figura 4.3)

EFFECTO DEL TIPO DE CEMENTO

Cemento Portland Tipo III

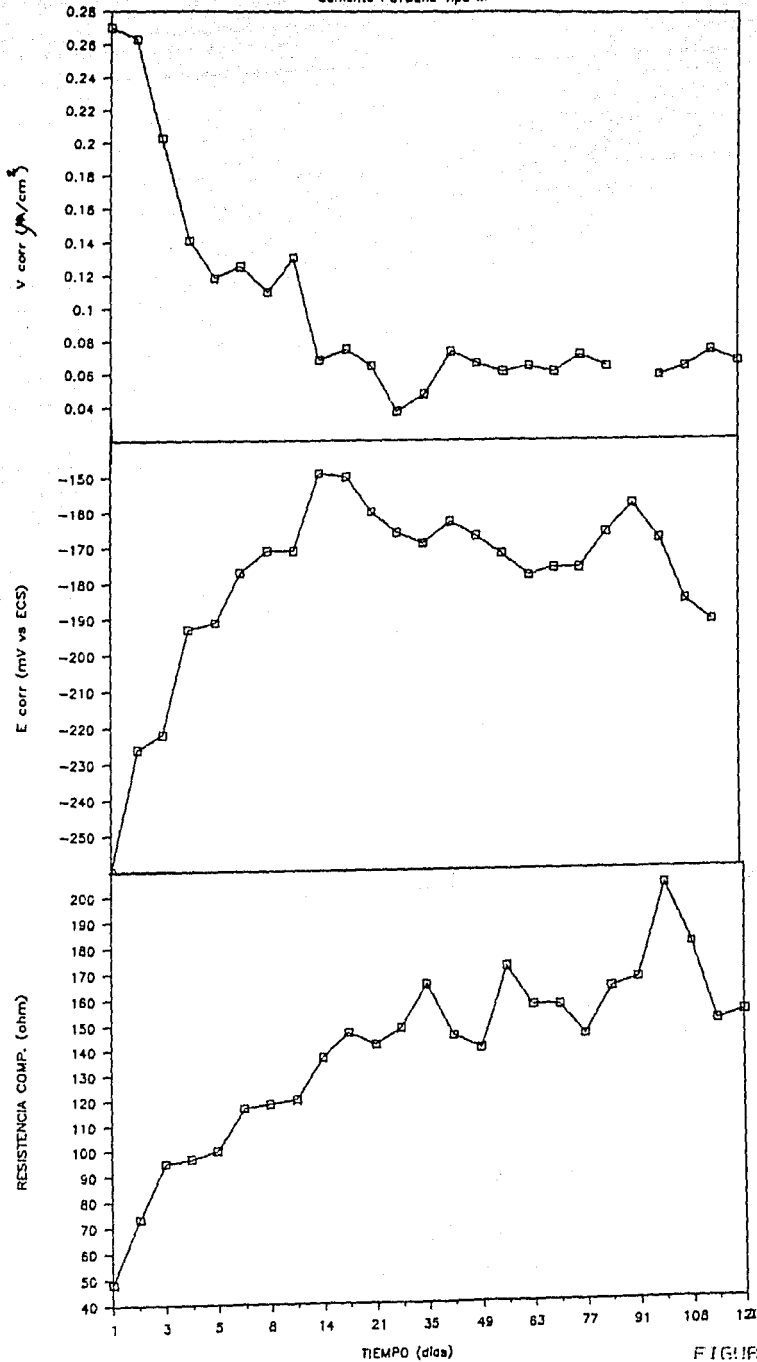


FIGURA 4.3

EFEECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO (REL A/C= 0.4)

Cemento Portland Tipo I

TIEMPO (días)	Ecorr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (k ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
2	-296	2.050	90.0	4.878	0.706
4	-327	3.170	200.0	3.155	1.091
5	-325	1.850	100.0	5.405	0.637
6	-309	1.700	100.0	5.882	0.585
7	-277	1.370	150.0	7.299	0.471
8	-269	1.22	146.7	8.197	0.420
9	-297	1.440	140.0	6.944	0.496
11	-193	1.500	163.3	6.667	0.516
13	-187	0.460	163.3	21.739	0.158
15	-197	0.820	196.7	12.195	0.282
22	-180	0.570	198.3	17.544	0.196
29	-148	0.370	231.7	27.027	0.127
36	-135	0.350	215.0	28.571	0.120
43	-106	0.380	243.3	26.316	0.131
50	-90	0.265	276.7	37.736	0.091
57	-87	0.260	300.0	38.462	0.089
64	-79	0.270	288.3	37.037	0.093
70	-96	0.275	270.0	36.364	0.095
78	-82	0.185	235.0	54.054	0.064
83	Se sumergió en solución del 3.0% de Cl ⁻				
85	-287	1.100	70.0	9.091	0.379
92	-587	6.200	76.7	1.613	2.134
99	-613	7.850	77.3	1.274	2.702
102	-590	6.700	84.0	1.493	2.306
104	-551	5.500	83.3	1.818	1.893
106	-573	4.700	76.3	2.128	1.618
109	-532	4.600	100.0	2.174	1.583
112	-516	4.250	82.3	2.353	1.463
113	-521	4.400	83.0	2.273	1.514
116	-474	3.500	85.7	2.857	1.205
118	-424	3.450	85.3	2.899	1.187
120	-412	2.870	97.0	3.484	0.988
123	-424	2.450	94.3	4.082	0.843
125	-379	2.370	95.3	4.219	0.816
127	-390	2.630	94.3	3.802	0.905
133	-460	2.870	91.7	3.484	0.988
151	-591	6.450	92.3	1.550	2.220
156	-596	6.500	96.7	1.538	2.237
166	-621	7.050	105.0	1.418	2.426
172	-581	5.300	94.7	1.887	1.824
179	-581	5.585	104.7	1.791	1.922
186	-599	6.250	100.7	1.600	2.151
201	-449	2.800	99.0	3.571	0.964
263	-609	7.300	102.0	1.370	2.512
278	-612	7.400	107.3	1.351	2.547

Tabla 4.4 EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.4
 (Ver figura 4.4)

EFFECTO DE LA RELACION A/C

Rel a/c= 0.4 (Cemento Portland I)

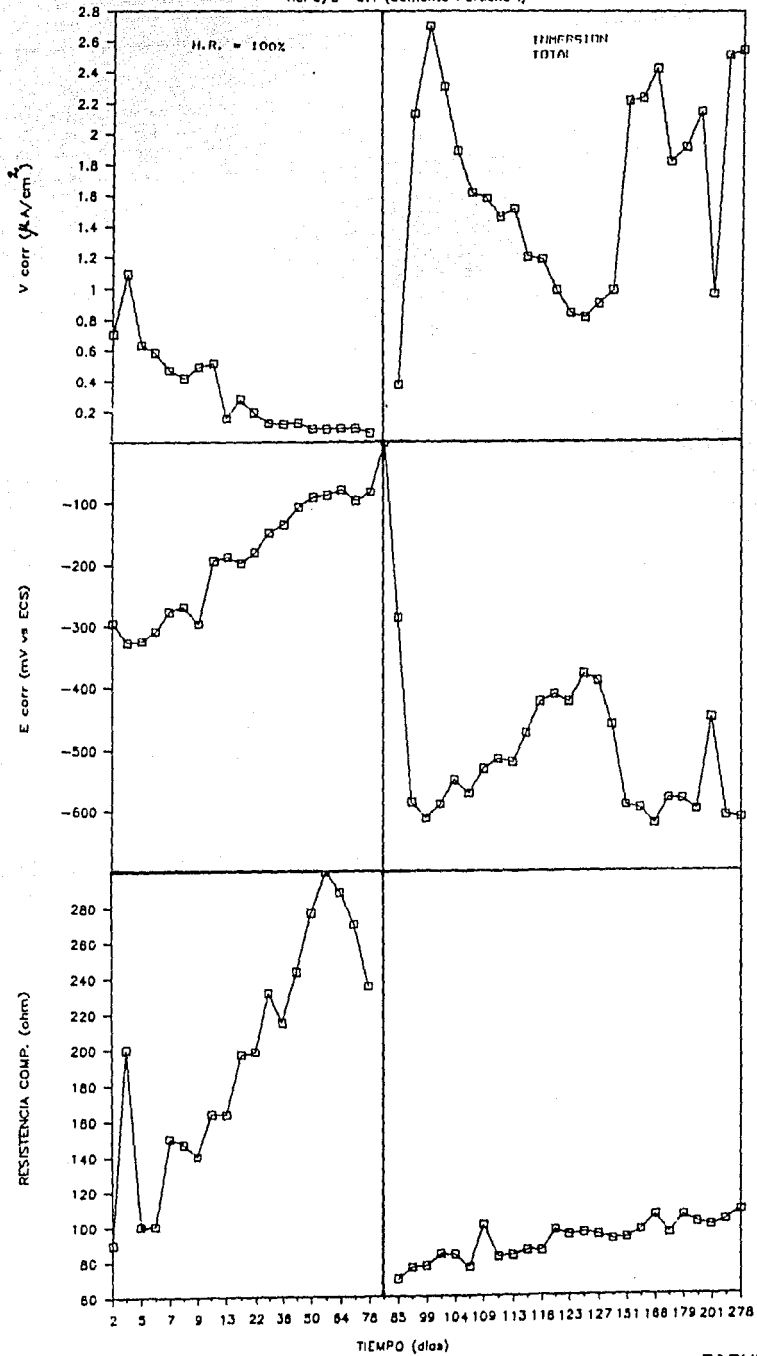


FIGURA 4.4

EFEECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO (REL A/C= 0.5)

Cemento Portland Tipo I

TIEMPO (días)	Ecorr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (k ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
2	-377	0.980	170.0	10.204	0.337
4	-280	1.300	90.0	7.692	0.447
5	-245	0.700	70.0	14.286	0.241
6	-206	0.450	80.0	22.222	0.155
7	-207	0.500	90.0	20.000	0.172
8	-234		90.0	ERR	ERR
9	-180	0.450	100.0	22.222	0.155
11	-166	0.280	116.7	35.714	0.096
13	-200	0.500	120.0	20.000	0.172
15	-168	0.360	145.7	27.778	0.124
22	-137	0.315	160.0	31.746	0.108
29	-134	0.265	183.3	37.736	0.091
36	-143	0.260	170.0	38.462	0.089
43	-127	0.245	196.7	40.816	0.084
50	-119	0.200	193.3	50.000	0.069
57	-116	0.100	225.0	100.000	0.034
64	-102	0.175	191.7	57.143	0.060
70	-104	0.185	173.3	54.054	0.064
78	-98	0.350	196.7	28.571	0.120
85	-105	0.160	203.3	62.500	0.055
92	-116	0.175	206.7	57.143	0.060
99	-98	0.170	213.3	58.824	0.059
106	-116	0.185	196.7	54.054	0.064
113	-108	0.190	203.3	52.632	0.065
120	-108	0.180	216.7	55.556	0.062

TABLA 4.5 EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1:3, Rel. agua/cemento = 0.5
 (Ver figura 4.5)

EFFECTO DE LA RELACION A/C

Rel a/c = 0.5 (Cemento Portland I)

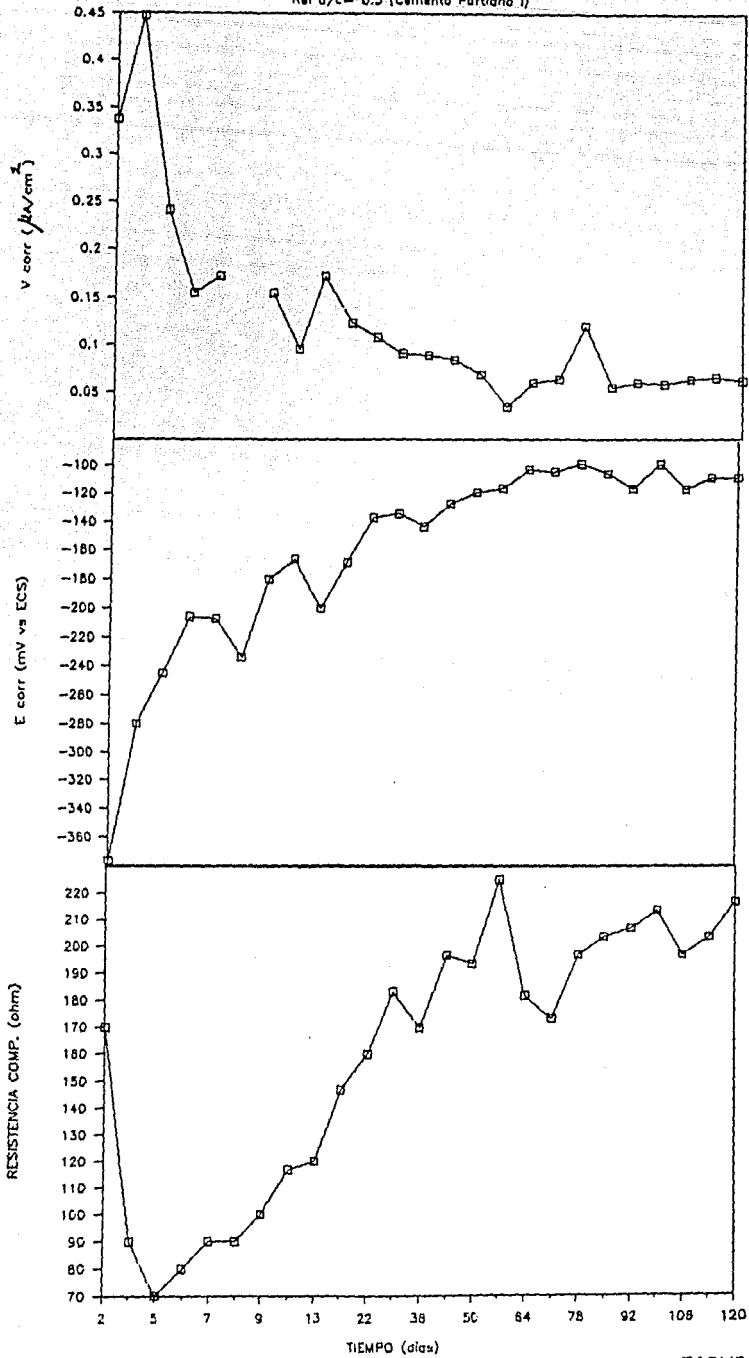


FIGURA 4.5

EFFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO (REL. A/C = 0.6)

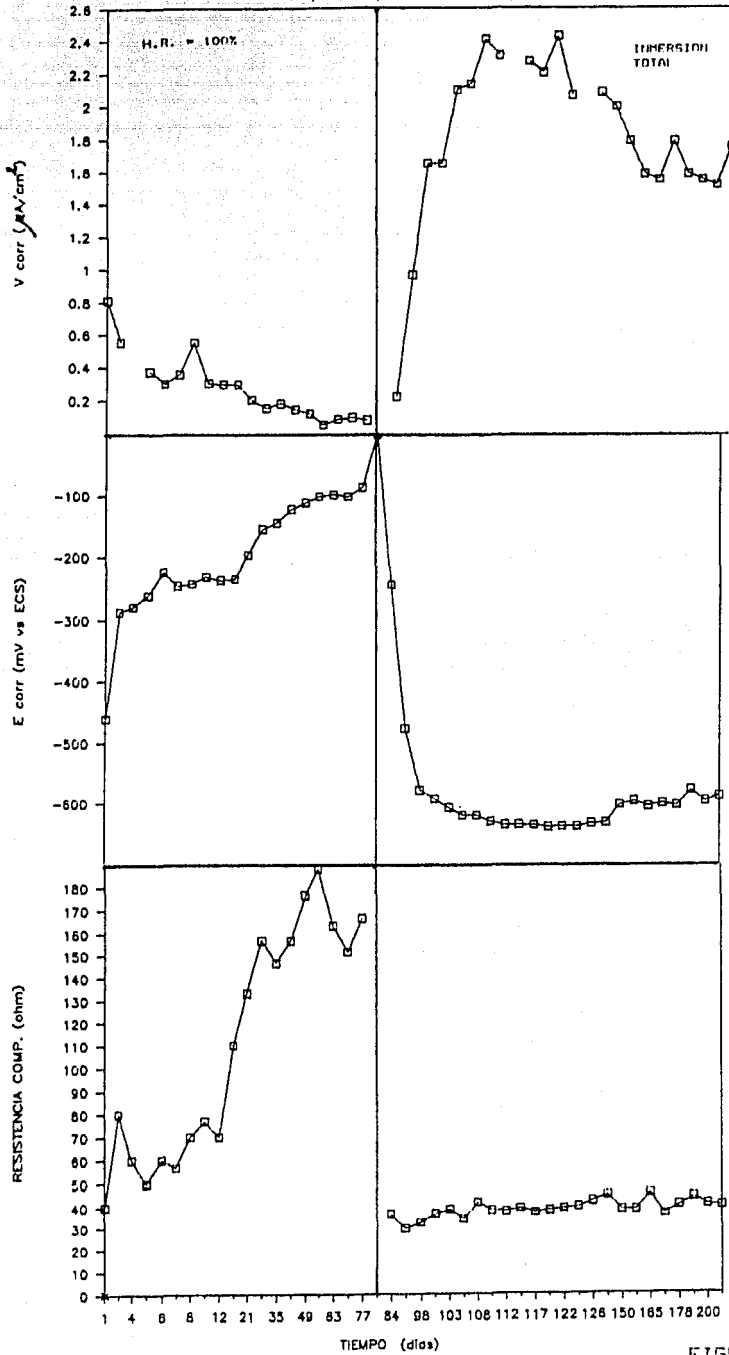
Cemento Portland Tipo I

TIEMPO (días)	Ecorr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (k ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-461	2.350	40.0	4.255	0.809
3	-287	1.610	80.0	6.211	0.554
4	-279		60.0	ERR	ERR
5	-261	1.080	50.0	9.259	0.372
6	-223	0.875	60.0	11.429	0.301
7	-245	1.04	56.7	9.615	0.358
8	-242	1.600	70.0	6.250	0.551
10	-231	0.880	76.7	11.364	0.303
12	-236	0.860	70.0	11.628	0.296
14	-234	0.860	110.0	11.628	0.296
21	-196	0.600	133.3	16.667	0.206
28	-154	0.455	156.7	21.978	0.157
35	-144	0.535	146.7	18.692	0.184
42	-122	0.430	156.7	23.256	0.148
49	-111	0.355	176.7	28.169	0.122
56	-101	0.160	188.3	62.500	0.055
63	-98	0.260	163.3	38.462	0.089
69	-101	0.290	151.7	34.483	0.100
77	-86	0.240	166.7	41.667	0.083
82	Se sumergió en solución del 3.0% de Cl ⁻				
84	-243	0.650	36.7	15.385	0.224
91	-477	2.900	30.0	3.571	0.964
98	-579	4.800	32.7	2.083	1.652
101	-593	4.800	36.7	2.083	1.652
103	-607	6.100	38.7	1.639	2.099
105	-620	6.200	34.3	1.613	2.134
108	-620	7.000	41.7	1.429	2.409
111	-630	6.700	38.3	1.493	2.306
112	-635		37.7	ERR	ERR
115	-635	6.600	39.0	1.515	2.271
117	-636	6.400	37.3	1.563	2.203
119	-639	7.050	38.0	1.418	2.426
122	-638	6.000	39.0	1.667	2.065
124	-638		39.7	ERR	ERR
126	-633	6.050	42.3	1.653	2.082
132	-632	5.800	44.7	1.724	1.996
150	-602	5.200	38.3	1.923	1.790
155	-596	4.600	38.3	2.174	1.583
165	-605	4.500	45.7	2.222	1.549
171	-606	5.200	36.3	1.923	1.790
178	-603	4.600	40.3	2.174	1.583
185	-578	4.500	44.0	2.222	1.549
200	-596	4.400	40.7	2.273	1.514
262	-588	5.100	40.0	1.961	1.755

Tabla 4.6. EFFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.6
 (Ver figura 4.6)

EFFECTO DE LA RELACION A/C

Rel a/c = 0.8 (Cemento Portland I)



EFFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO (REL A/C= 0.65)

Cemento Portland Tipo I

TIEMPO (dias)	Ecorr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (k ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-414	5.500	20.0	1.818	1.893
3	-362	5.500	50.0	1.818	1.893
4	-352	6.000	50.0	1.667	2.065
5	-320	4.950	40.0	2.020	1.704
6	-303	5.000	60.0	2.000	1.721
7	-314	3.8	60.0	2.632	1.308
8	-302	4.350	80.0	2.299	1.497
10	-264	2.970	78.3	3.367	1.022
12	-248	2.500	90.0	4.000	0.860
14	-213	4.330	106.7	2.309	1.490
21	-135	1.470	141.7	6.803	0.506
28	-134	1.060	163.3	9.434	0.365
35	-126	1.180	163.3	8.475	0.406
42	-125	1.000	160.0	10.000	0.344
49	-130	1.210	175.0	8.264	0.416
56	-130	1.270	175.0	7.874	0.437
63	-122	0.790	174.7	12.658	0.272
69	-120	1.690	155.0	5.917	0.582
77	-103	1.060	180.0	9.434	0.365
82	Se sumergió en solución del 3.0% de Cl ⁻				
84	-187	1.170	38.3	8.547	0.403
91	-235	1.570	36.7	6.369	0.540
98	-412	4.100	32.0	2.439	1.411
101	-590	12.900	38.0	0.775	4.440
103	-612	14.300	30.7	0.699	4.921
105	-629	15.000	40.3	0.667	5.162
108	-620	15.800	38.3	0.633	5.438
111	-623	14.600	34.0	0.685	5.025
112	-619	14.400	29.0	0.694	4.956
115	-614	14.400	39.0	0.694	4.956
117	-610	12.400	37.7	0.806	4.268
119	-606	13.300	34.3	0.752	4.577
122	-592	10.100	35.3	0.990	3.476
124	-586	11.400	36.0	0.877	3.923
126	-588	8.000	36.0	1.250	2.753
132	-605	10.000	35.0	1.000	3.442
150	-560	8.000	32.0	1.136	3.029
153	-572	9.400	38.3	1.064	3.235
165	-593	9.300	40.3	1.075	3.201
171	-572	9.300	32.0	1.075	3.201
178	-572	7.900	36.3	1.266	2.719
185	-572	9.300	36.0	1.075	3.201
200	-576	8.200	37.7	1.220	2.822
262	-575	8.900	33.7	1.124	3.063

TABLE 4.7 EFFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.65
 (Ver figura 4.7)

EFFECTO DE LA RELACION A/C

Rel a/c = 0.85 (C. Portland I)

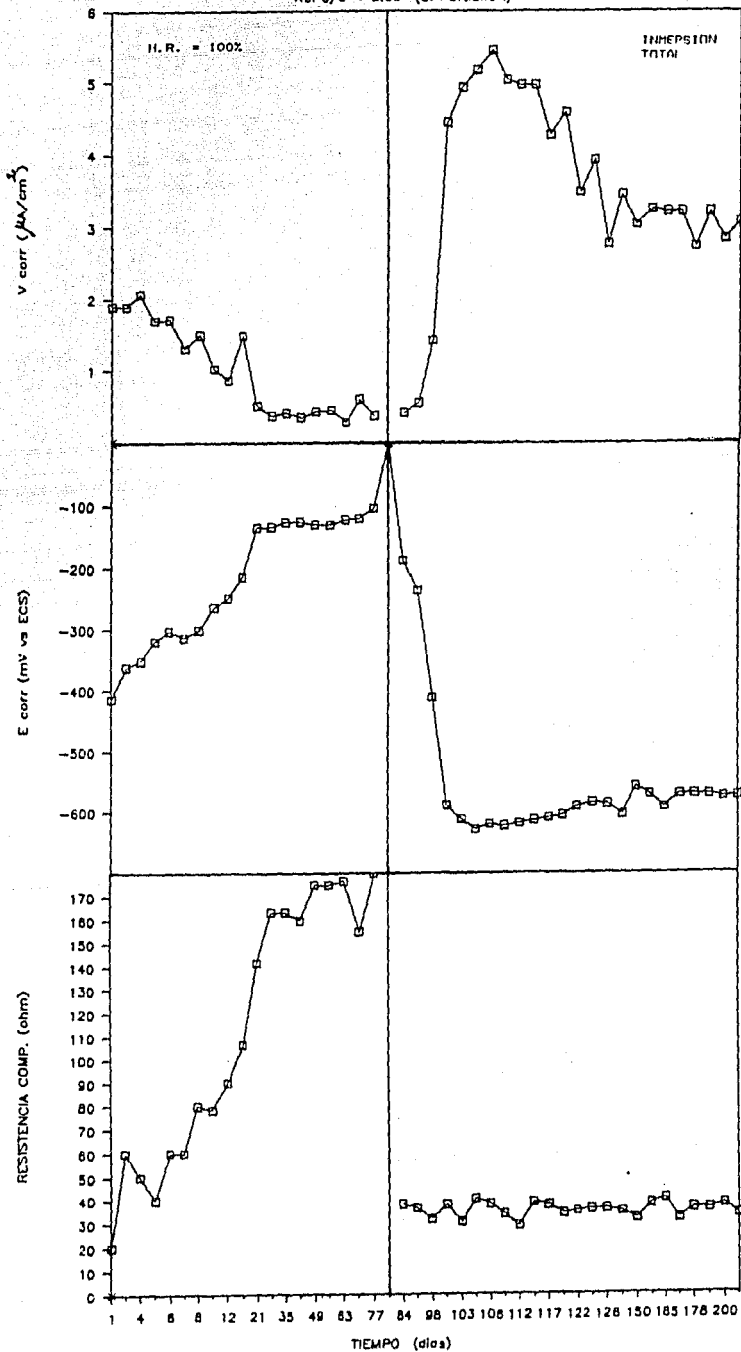


FIGURA 4.7

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.0% de Cl^- (C. Portland I)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μA)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr ($\mu A/cm^2$)
2	-337	0.980	170.0	10.204	0.337
4	-280	1.300	90.0	7.692	0.447
5	-245	0.700	70.0	14.286	0.241
6	-206	0.450	120.0	22.222	0.155
7	-207	0.500	80.0	20.000	0.172
8	-234		90.0	ERR	ERR
9	-180	0.450	100.0	22.222	0.155
11	-166	0.280	116.7	35.714	0.096
13	-200	0.500	120.0	20.000	0.172
15	-166	0.360	146.7	27.778	0.124
22	-137	0.315	160.0	31.746	0.108
29	-134	0.265	183.3	37.736	0.091
36	-143	0.260	170.0	38.462	0.089
43	-127	0.245	196.7	40.816	0.084
50	-119	0.200	193.3	50.000	0.069
57	-116	0.100	225.0	100.000	0.034
64	-102	0.175	181.7	57.143	0.060
70	-104	0.135	173.3	54.054	0.064
78	-98	0.350	196.7	28.571	0.120
85	-105	0.160	203.3	52.500	0.055
92	-116	0.175	206.7	57.143	0.060
99	-98	0.170	213.3	58.824	0.059
106	-116	0.185	196.7	54.054	0.064
113	-108	0.190	203.3	52.632	0.065
120	-108	0.180	216.7	55.556	0.062

TABLA 4.8 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.8)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.0% de Cloruros (C. Portland I)

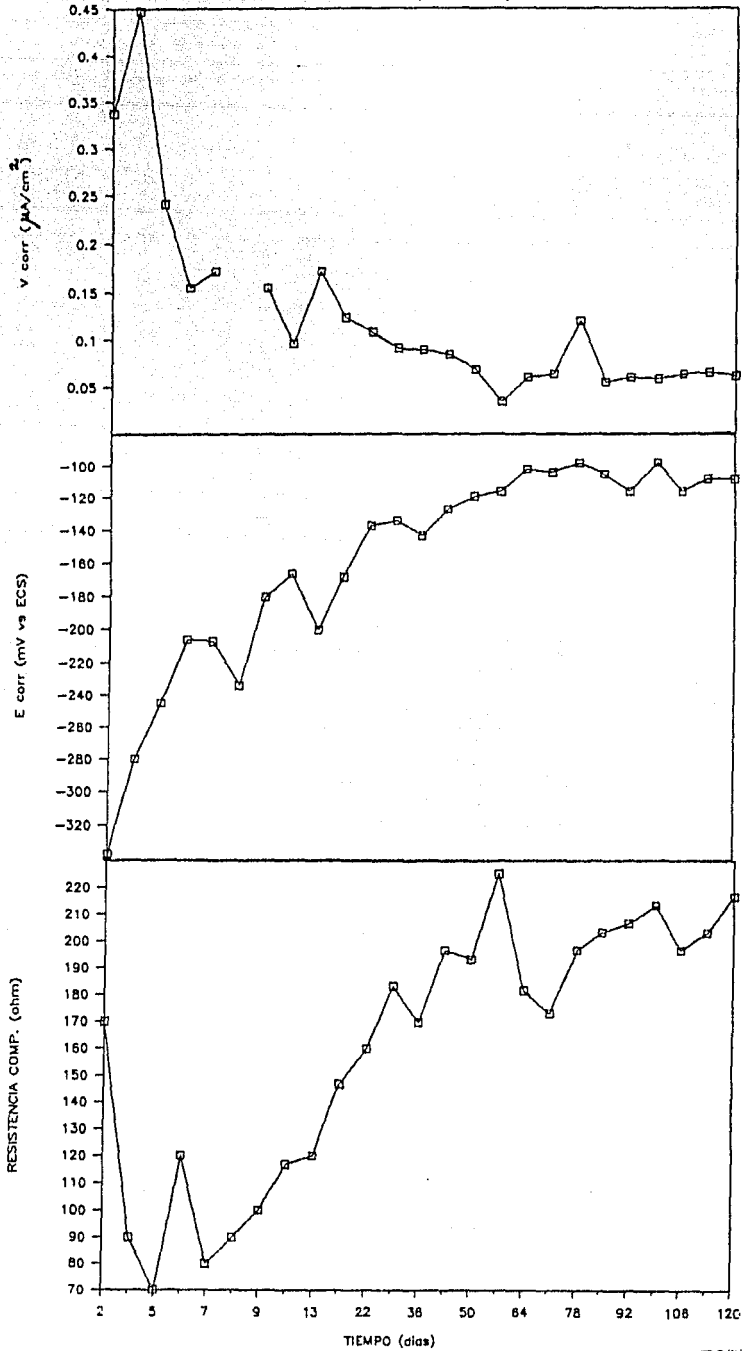


FIGURA 4.0

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.25% de Cl⁻ (C. Portland I)

TIEMPO: (días)	E corr (mV)	I (A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (A/cm)
1	-417	2.400	40.0	4.167	0.826
2	-383	1.500	50.0	6.667	0.516
3	-366	1.200	40.0	8.333	0.413
4	-400	1.950	63.3	5.128	0.671
5	-400	1.950	83.3	5.128	0.671
7	-397		86.7	ERR	ERR
8	-366	1.900	80.0	5.263	0.654
10	-382	2.110	83.3	4.739	0.726
12	-359	1.700	90.0	5.882	0.585
14	-319	1.170	100.0	8.547	0.403
22	-223	0.700	100.0	14.286	0.241
28	-220	0.560	111.7	17.857	0.193
35	-202	0.500	106.7	20.000	0.172
42	-226	0.445	103.3	22.472	0.153
49	-202	0.440	101.7	22.727	0.151
56	-236	0.770	108.3	12.987	0.265
63	-212	0.395	118.3	25.316	0.136
70	-181	0.460	111.7	21.739	0.158
77	-167	0.390	103.3	25.641	0.134
84	-172	0.230	121.7	43.478	0.079
91	-165	0.330	110.0	30.303	0.114
98	-166	0.370	116.7	27.027	0.127
105	-177	0.320	100.0	31.250	0.110
112	-166	0.345	113.3	28.986	0.119
119	-155	0.345	120.0	28.986	0.119

TABLA 4.9 - EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.25% de cloruros como NaCl (ver figura 4.9)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.25% de Cloruros (C. Portland I)

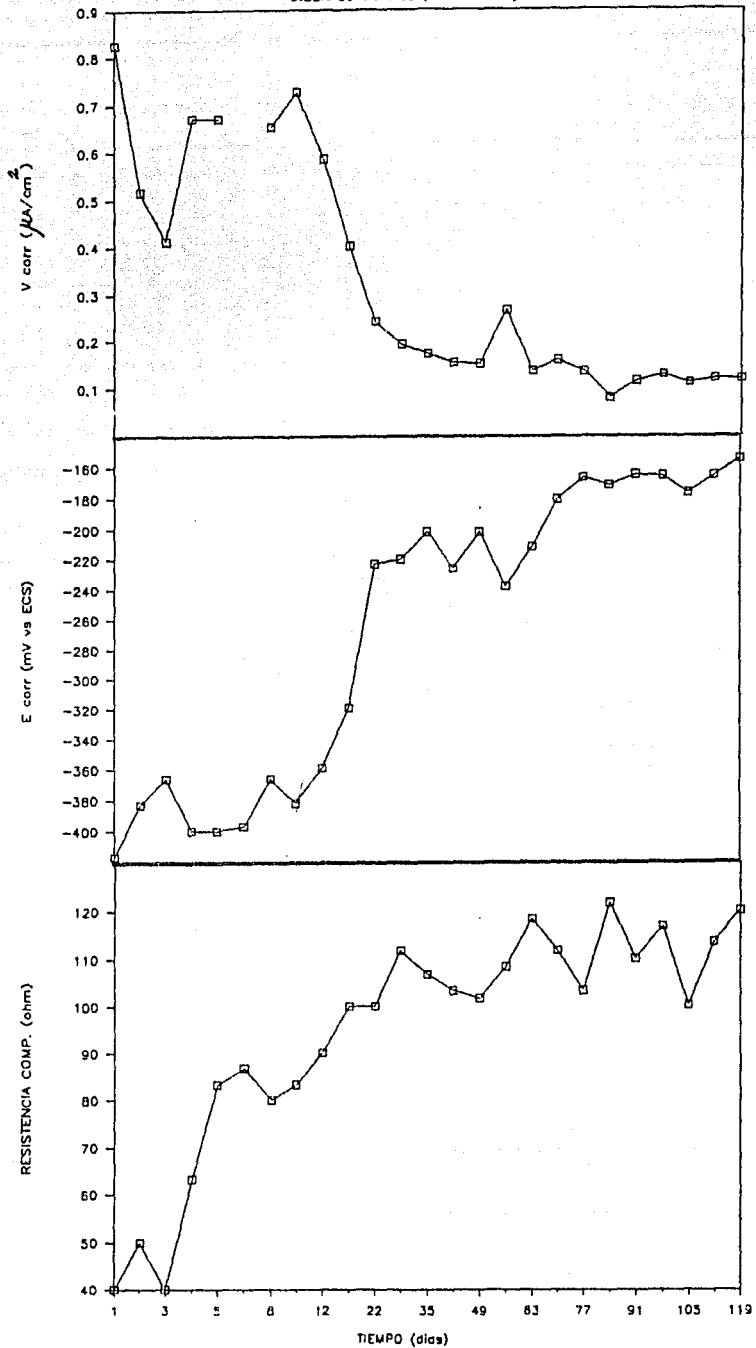


FIGURA 4.9

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.50% de Cl⁻ (C. Portland I)

TIEMPO (dias)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-470	5.200	50.0	1.923	1.790
2	-498		50.0	ERR	ERR
3	-492	5.400	60.0	1.852	1.858
4	-495	6.500	60.0	1.538	2.237
5	-474	5.400	63.3	1.852	1.858
7	-418	3.350	85.0	2.985	1.153
8	-383	3.850	76.7	2.597	1.325
10	-366	3.340	85.0	2.994	1.149
12	-355	3.550	83.3	2.817	1.222
14	-331	2.600	90.0	3.846	0.895
22	-350	3.220	105.0	3.106	1.108
28	-341	3.100	105.0	3.226	1.067
35	-343	3.180	98.3	3.145	1.094
42	-331	2.330	98.3	4.292	0.802
49	-319	2.630	103.0	3.802	0.905
56	-345	2.600	106.7	3.846	0.895
63	-317	2.250	118.3	4.444	0.774
70	-317	2.500	91.7	4.000	0.860
77	-315	2.450	100.0	4.082	0.843
84	-306	2.270	121.7	4.405	0.781
91	-284	1.670	96.7	5.988	0.575
98	-314	2.170	106.7	4.608	0.747
105	-325	2.230	115.0	4.484	0.767
112	-323	2.450	120.0	4.082	0.843
119	-239	1.640	120.0	6.098	0.564

TABLA 4.10 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.5% de cloruros como NaCl (ver figura 4.10)

EFEECTO DEL ION CLORURO

0.50% de Cloruros (C. Portland I)

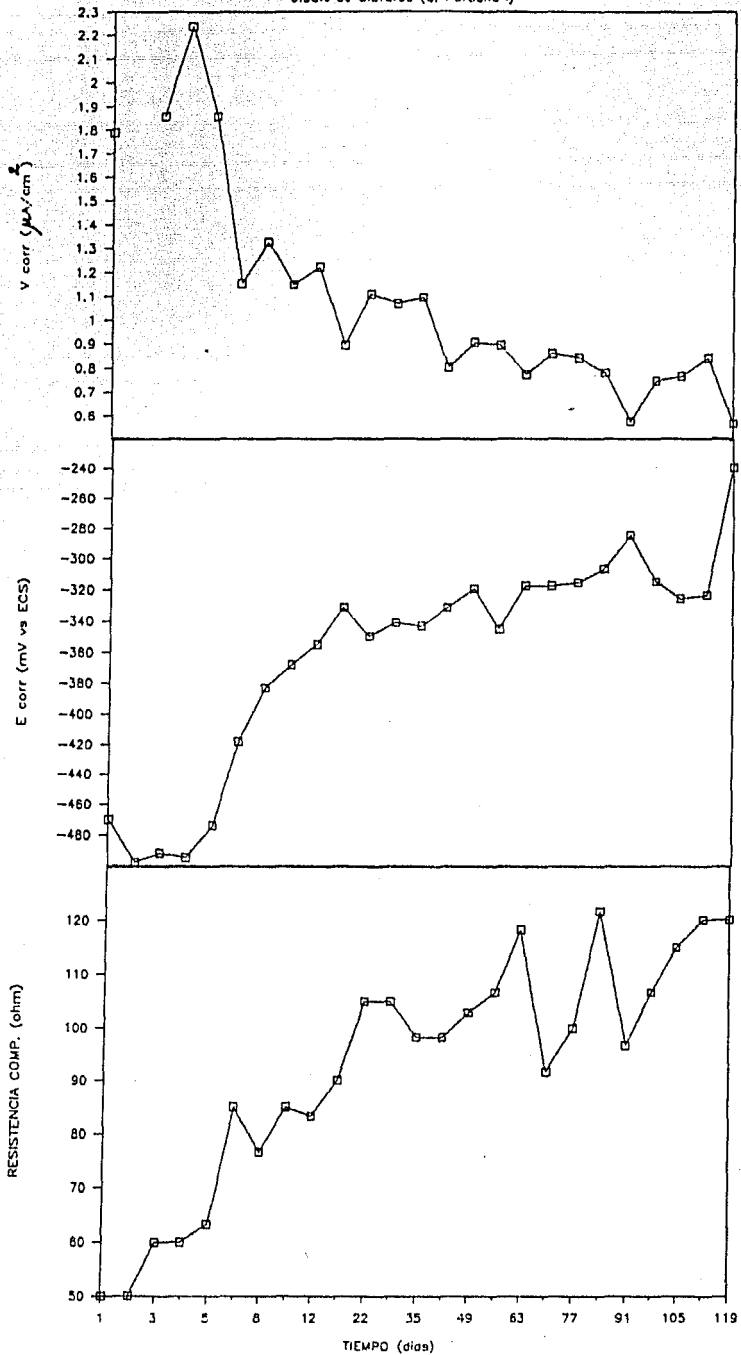


FIGURA 4.10

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

1.00% de Cl⁻ (C. Portland I)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-447	4.550	20.0	2.198	1.566
2	-459	7.200	40.0	1.389	2.478
3	-481	6.200	40.0	1.613	2.134
4	-478	5.100	48.3	1.961	1.755
6	-480	5.800	55.0	1.724	1.996
7	-459	5.000	56.7	2.000	1.721
8	-441	4.400	60.0	2.273	1.514
10	-456	5.350	65.0	1.869	1.841
13	-460	4.300	73.3	2.326	1.480
15	-461	4.200	70.0	2.381	1.445
22	-468	4.850	78.3	2.062	1.669
29	-472	4.200	71.7	2.381	1.445
36	-420	3.950	81.7	2.532	1.359
43	-421	4.300	88.3	2.326	1.480
50	-390	3.700	81.7	2.703	1.273
57	-408	3.600	75.0	2.778	1.239
64	-415	3.150	70.0	3.175	1.084
71	-448	3.900	90.0	2.564	1.342
78	-461	3.950	83.3	2.532	1.359
85	-458	3.650	86.7	2.740	1.256
92	-493	4.050	93.3	2.469	1.394
99	-506	4.000	100.0	2.500	1.377
107	-494	4.250	103.3	2.353	1.463
113	-495	3.800	96.7	2.632	1.308
120	-468	3.300	103.3	3.030	1.136

TABLA 4.11 E F E C T O D E L I O N C L O R U R O. C e m e n t o P o r t l a n d t i p o 1
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 1.0% de cloruro como NaCl (ver figura 4.11)

EFFECTO DEL ION CLORURO

1.0% de Cloruros (C. Portland I)

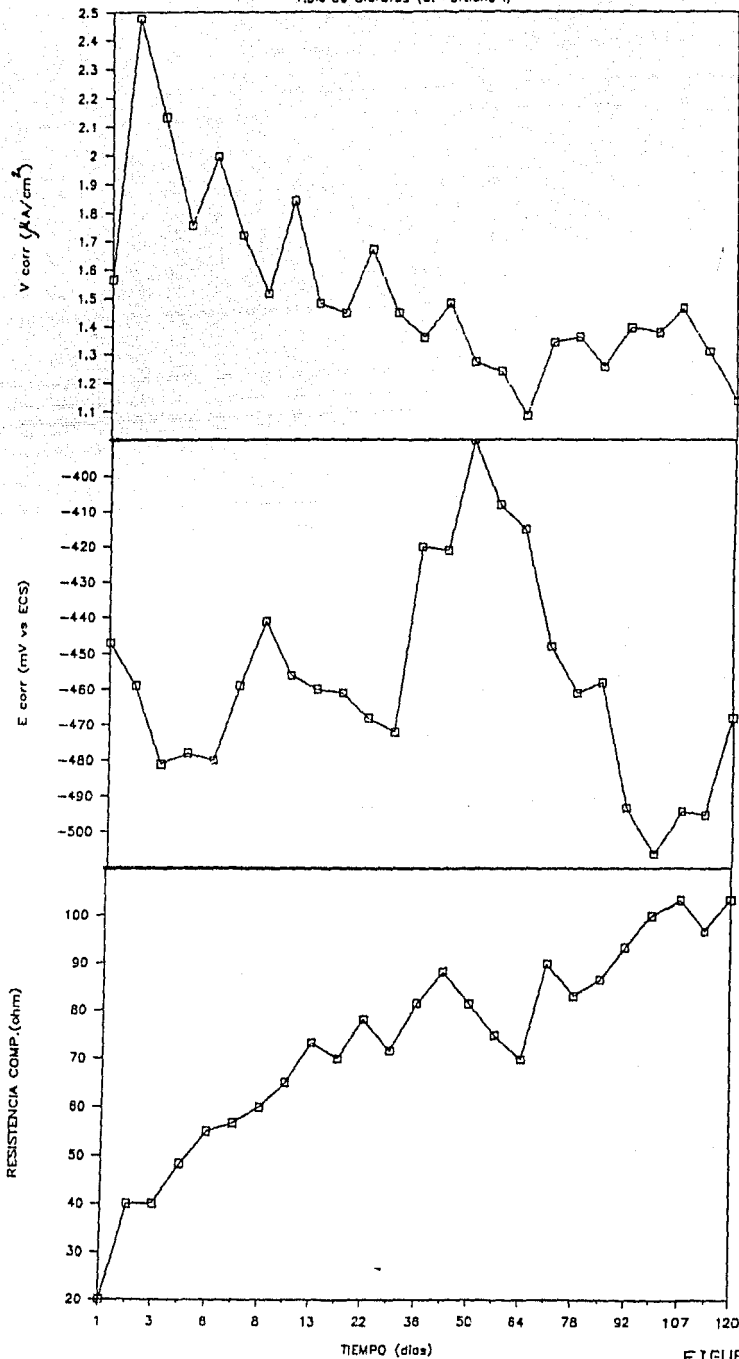


FIGURA 4.11

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

3.00% de Cloruros (C. Portland I)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-484	6.400	13.0	1.563	2.203
2	-509	9.900	20.0	1.010	3.407
3	-547	12.300	23.3	0.813	4.233
4	-625	8.800	25.0	1.136	3.029
6	-653	9.400	26.7	1.064	3.235
7	-674	15.400	31.7	0.649	5.300
8	-702	20.000	31.7	0.500	6.883
10	-663	9.600	31.7	1.042	3.304
13	-662	12.200	41.7	0.820	4.199
15	-621		46.7	ERR	ERR
22	-638	12.500	43.3	0.800	4.302
29	-609	7.800	48.3	1.282	2.684
36	-601	7.350	50.0	1.361	2.530
43	-601	7.000	53.3	1.429	2.409
50	-580	6.550	45.0	1.527	2.254
57	-584	5.500	43.3	1.818	1.893
64	-589	5.950	46.7	1.681	2.048
71	-581	5.850	45.0	1.709	2.013
78	-585	6.200	51.7	1.613	2.134
85	-518	7.300	46.7	1.370	2.512
92	-620	6.550	53.3	1.527	2.254
99	-609	3.500	60.0	2.857	1.205
107	-585	8.550	65.0	1.170	2.943
113	-596	4.650	63.3	2.062	1.669
120	-578	5.000	63.3	2.000	1.721

TABLA 4.12 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 3.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.12)

EFFECTO DEL ION CLORURO

3.0% de Cloruros (C. Portland I)

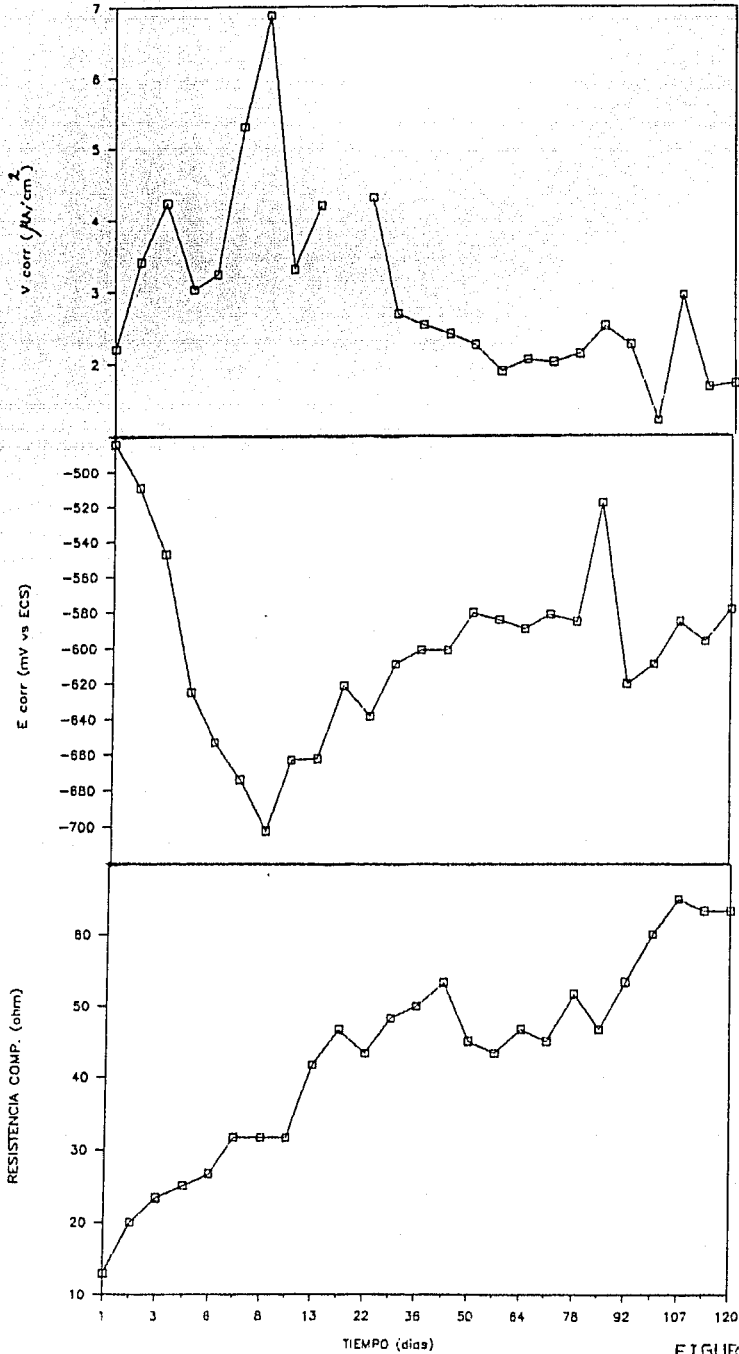


FIGURA 4.12

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.0% de Cl⁻ (C. Portland tipo I) RELACION a/c= 0.65

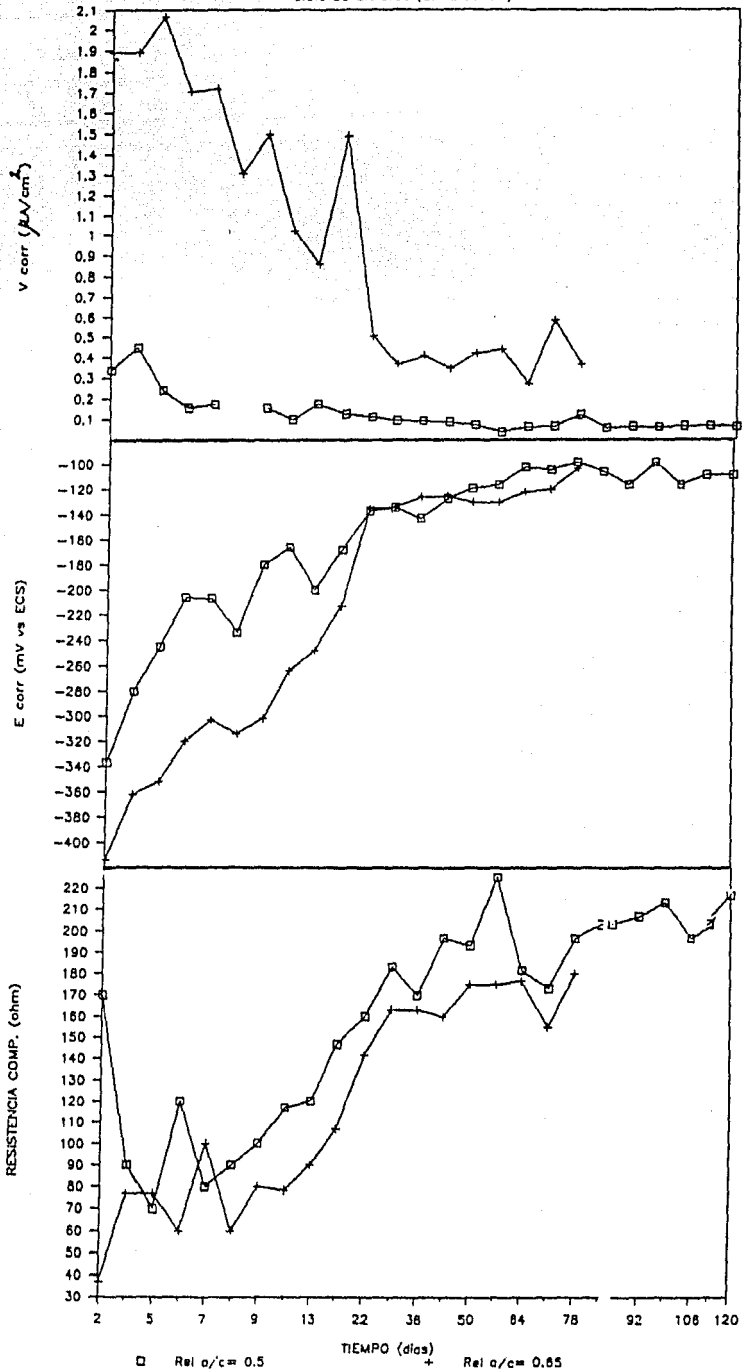
TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (A/cm)
1	-414	5.500	36.7	1.818	1.893
3	-362	5.500	76.7	1.818	1.893
4	-352	6.000	76.7	1.667	2.065
5	-320	4.950	60.0	2.020	1.704
6	-303	5.000	100.0	2.000	1.721
7	-314	3.600	60.0	2.632	1.308
8	-302	4.350	80.0	2.299	1.497
10	-264	2.970	78.3	3.367	1.022
12	-248	2.500	90.0	4.000	0.860
14	-213	4.330	106.7	2.309	1.490
21	-135	1.470	141.7	6.803	0.506
28	-134	1.060	163.3	9.434	0.365
35	-126	1.180	163.3	8.475	0.406
42	-125	1.000	160.0	10.000	0.344
49	-130	1.210	175.0	8.264	0.416
56	-130	1.270	175.0	7.874	0.437
63	-122	0.790	176.7	12.658	0.272
69	-120	1.690	155.0	5.917	0.582
77	-103	1.060	180.0	9.434	0.365

La probeta se sumergió en solución del 3.0% de Cl⁻

TABLA 4.17 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo 1
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.65
 0.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.13)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.0% de Cloruros (C. Portland I)



E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.25% de Cl⁻ (C. Portland tipo I) RELACION a/c= 0.65

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-420	3.500	20.0	2.857	1.205
2	-450	4.130	40.0	2.421	1.421
3	-450	4.300	43.3	2.326	1.480
5	-420	2.800	63.3	3.571	0.964
6	-396	2.550	68.3	3.922	0.878
7	-368	2.220	63.3	4.505	0.764
8	-333	2.250	70.0	4.444	0.774
10	-337	2.070	73.3	4.831	0.712
14	-297	1.270	93.3	7.874	0.437
16	-279	1.310	90.0	7.634	0.451
23	-279	1.490	105.0	6.711	0.513
28	-280	1.880	101.7	5.319	0.647
35	-265	1.390	100.0	7.194	0.478
42	-271	1.140	110.0	8.772	0.392
49	-268	1.400	91.7	7.143	0.482
56	-266	1.200	101.7	8.333	0.413
63	-281	1.700	96.7	5.882	0.585
70	-267	1.180	100.0	8.475	0.406
77	-223	0.990	103.3	10.101	0.341
84	-246	0.930	80.0	10.753	0.320
91	-235	0.930	103.3	10.753	0.320
98	-220	0.970	110.0	10.309	0.334
106	-214	0.830	113.3	12.048	0.286
112	-207	0.880	113.3	11.364	0.303
119	-225	0.860	113.3	11.628	0.296

TABLA 4.14 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.65
 0.25% de cloruros como CaCl₂ (ver figura 4.14)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.25% de Cloruros (C. Portland I)

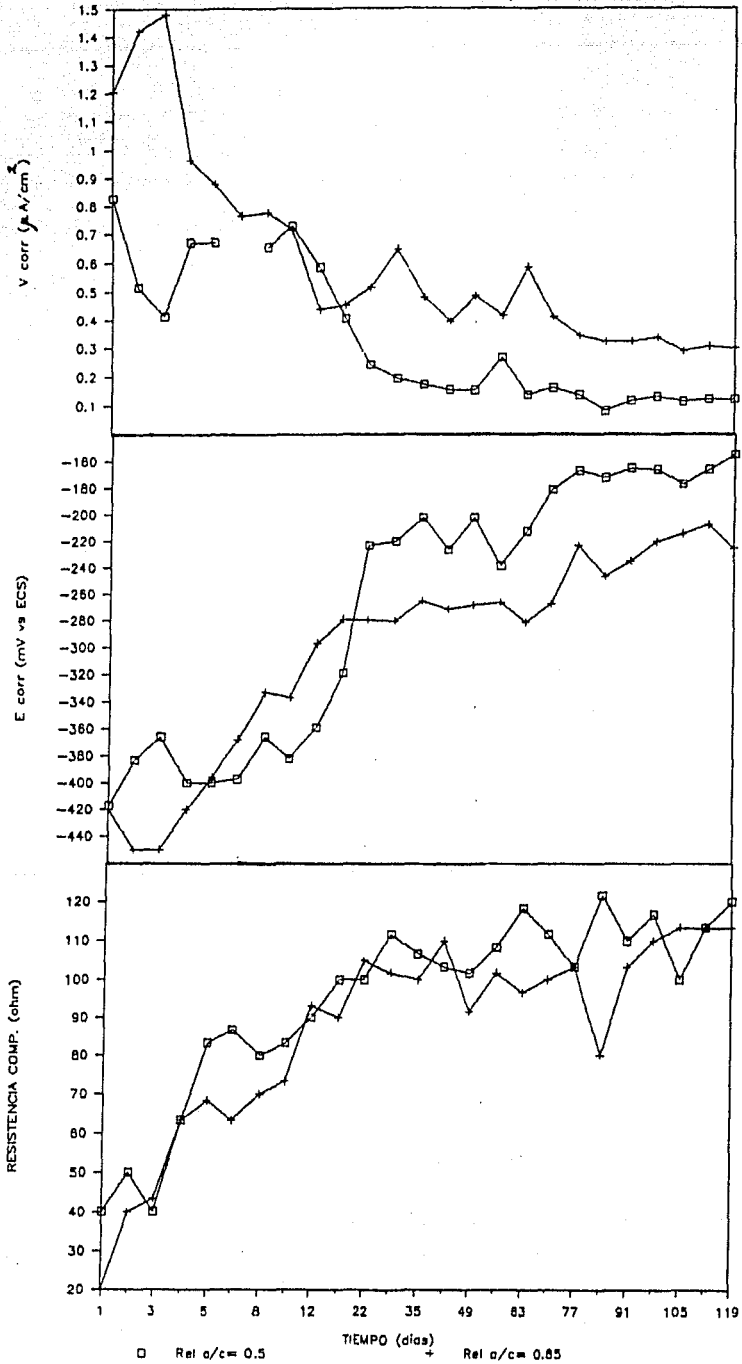


FIGURA 4.14

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.50% de Cl⁻ (C. Portland tipo I) RELACION a/c= 0.65

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-400	2.250	30.0	4.444	0.774
2	-367	4.500	36.7	2.222	1.549
3	-466	6.000	40.0	1.667	2.005
5	-487	6.600	46.7	1.515	2.271
6	-470	6.500	50.0	1.538	2.237
7	-460	5.650	55.0	1.770	1.944
8	-429	4.850	56.7	2.062	1.669
10	-384	3.000	71.7	3.333	1.032
14	-330	2.400	75.0	4.167	0.826
16	-348	2.630	70.0	3.802	0.905
23	-254	1.470	88.3	6.803	0.506
28	-267	1.350	85.0	7.407	0.465
35	-240	1.430	90.0	6.993	0.492
42	-289	1.460	80.0	6.849	0.502
49	-291	1.600	93.3	6.250	0.551
56	-273	1.450	88.3	6.897	0.499
63	-258	1.250	86.7	8.000	0.430
70	-246	0.930	100.0	10.753	0.320
77	-232	1.020	83.3	9.804	0.351
84	-219	1.030	73.3	9.709	0.354
91	-224	0.960	90.0	10.417	0.330
98	-234	1.420	100.0	7.042	0.489
106	-215	1.200	88.3	8.333	0.413
112	-187	1.080	93.3	9.259	0.372
119	-198	1.100	96.7	9.091	0.379

TABLA 4.15 EFECTOS DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.65
 0.50% de cloruros como NaCl (ver figura 4.15)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.50% de Cloruros (C. Portland I)

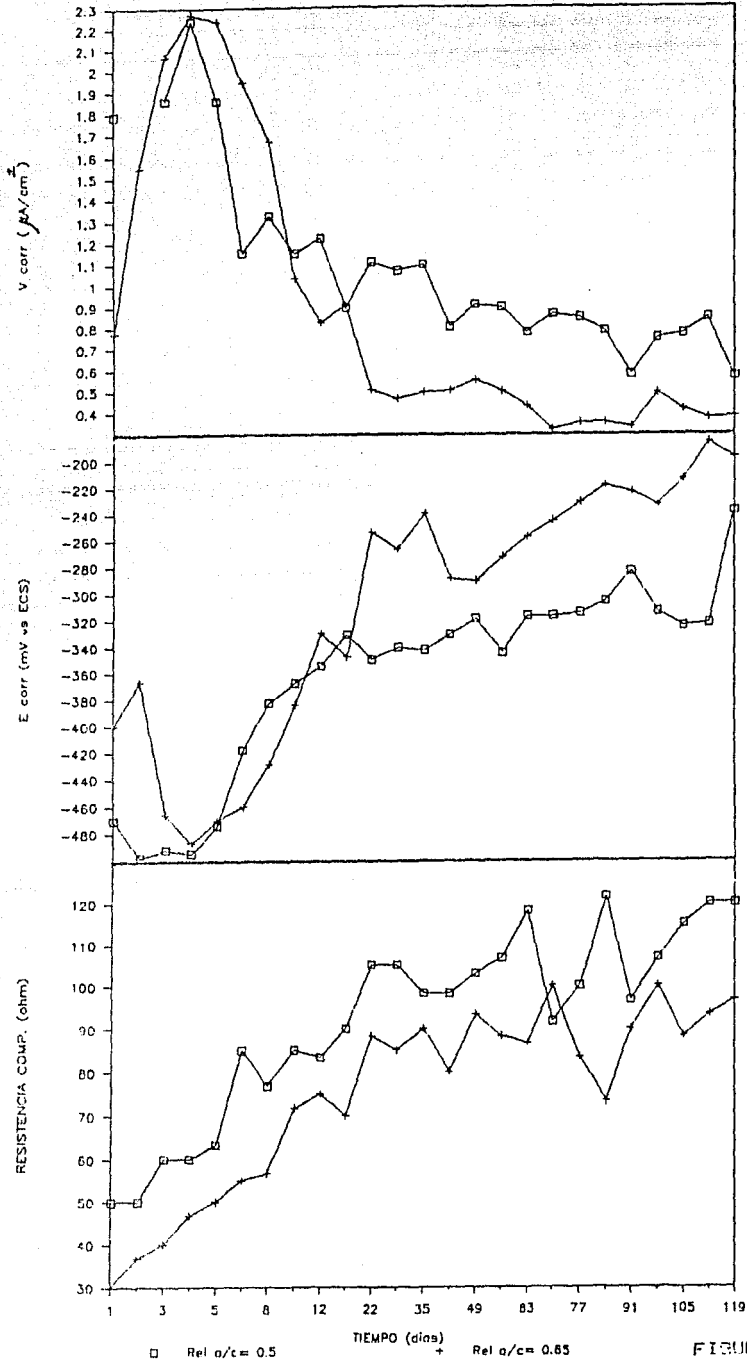


FIGURA 4.15

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

1.00% de Cl⁻ (C. Portland tipo I) RELACION a/c= 0.65

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-448	6.850	30.0	1.460	2.357
2	-491	9.400	40.0	1.064	3.235
4	-516	9.600	40.0	1.042	3.304
5	-512	10.000	45.0	1.000	3.442
6	-526	8.200	45.0	1.220	2.822
7	-505	8.150	53.3	1.227	2.805
9	-514	8.200	58.3	1.220	2.822
13	-496	5.750	60.0	1.739	1.979
15	-465	5.350	65.0	1.575	2.185
16	-416	4.350	67.3	2.299	1.497
23	-342	3.930	81.7	2.545	1.353
27	-365	4.100	78.3	2.439	1.411
34	-344	3.950	78.3	2.532	1.359
41	-327	3.150	68.3	3.175	1.084
48	-346	4.230	85.0	2.364	1.456
55	-333	3.750	78.3	2.667	1.291
62	-338	2.150	76.7	4.651	0.740
69	-258	2.300	83.3	4.348	0.792
76	-248	2.500	76.7	4.000	0.860
83	-254	2.350	73.3	4.255	0.809
90	-269	2.230	86.7	4.484	0.767
97	-263	2.350	86.7	4.255	0.809
111	-273	2.330	90.0	4.292	0.802
118	-267	2.050	93.3	4.878	0.706

TABLA 4.16 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.65
 1.0% de cloruro de sodio NaCl (ver figura 4.16)

EFFECTO DEL ION CLORURO

1.0% de Cloruros (C. Portland I)

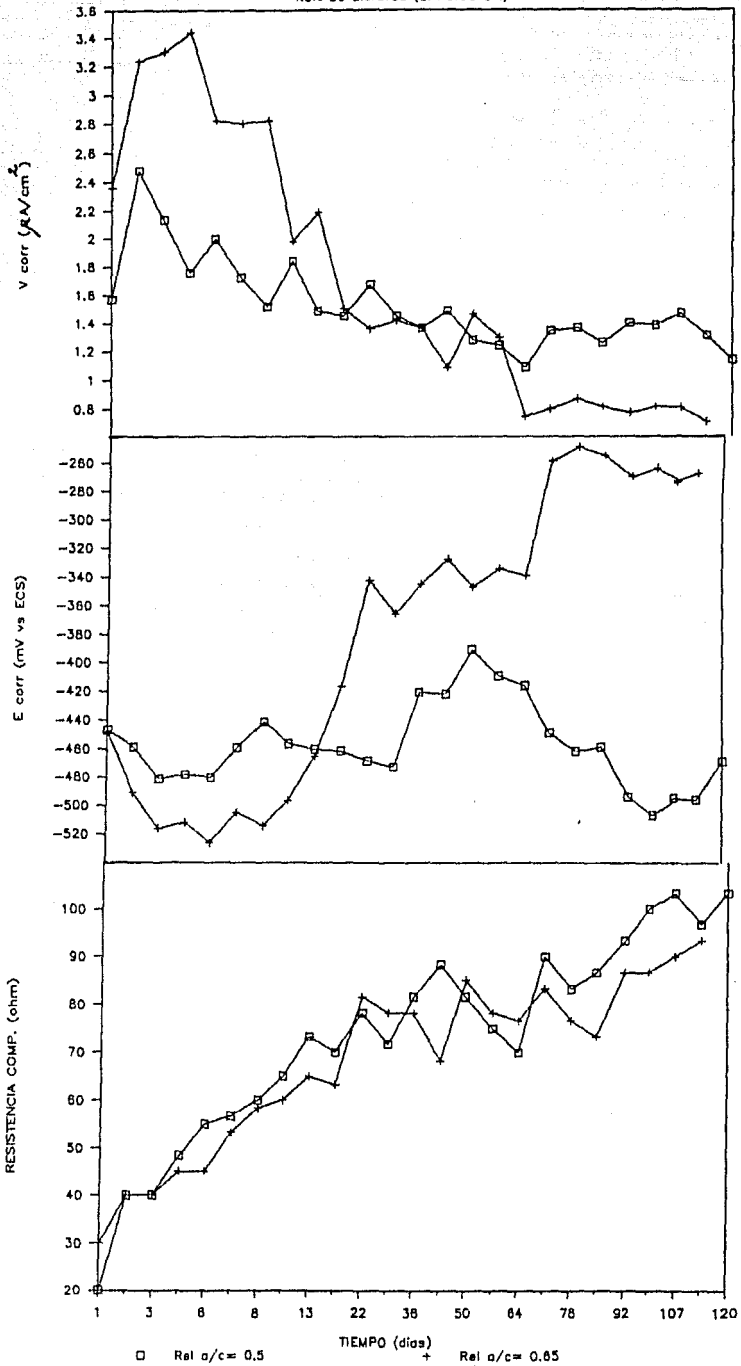


FIGURA 4-12

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

3.00% de Cl⁻ (C. Portland tipo I) RELACION a/c= 0.65

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-491	10.250	26.7	0.976	3.528
2	-533	16.500	23.3	0.606	5.679
4	-545	17.500	23.3	0.571	6.023
5	-542	25.000	33.3	0.400	8.604
6	-542	21.700	26.7	0.461	7.468
7	-541	19.500	45.0	0.513	6.711
9	-548	19.400	36.7	0.515	6.577
13	-548	18.700	41.7	0.535	6.436
15	-548	17.500	43.3	0.571	6.023
16	-550	16.700	43.3	0.599	5.747
23	-556	17.100	46.7	0.585	5.885
27	-560	18.900	51.7	0.529	6.505
34	-526	13.600	50.0	0.735	4.681
41	-519	12.600	50.0	0.794	4.336
49	-519	14.700	63.3	0.680	5.059
55	-593	13.330	63.3	0.750	4.588
62	-522	12.300	63.3	0.813	4.233
69	-533	11.000	45.0	0.909	3.786
76	-510	12.700	51.7	0.787	4.371
83	-530	12.000	51.7	0.833	4.130
90	-490	10.800	65.0	0.926	3.717
97	-457	9.800	76.7	1.020	3.373
111	-425	7.650	66.7	1.307	2.633
118	-406	7.800	60.0	1.282	2.684

TABLA 4.17 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.65
 3.00% de cloruros como NaCl (ver figura 4.17)

EFFECTO DEL ION CLORURO

3.0% de Cloruros (C. Portland I)

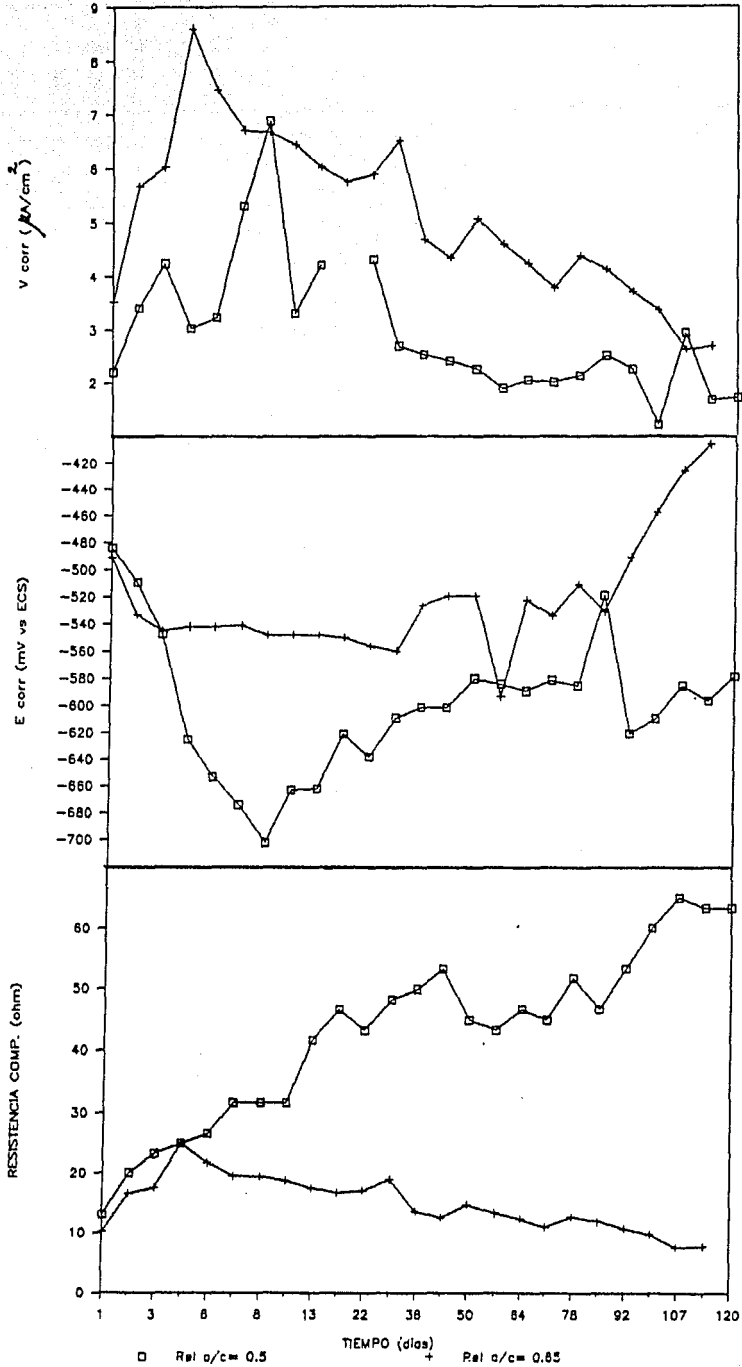


FIGURA 4.17

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

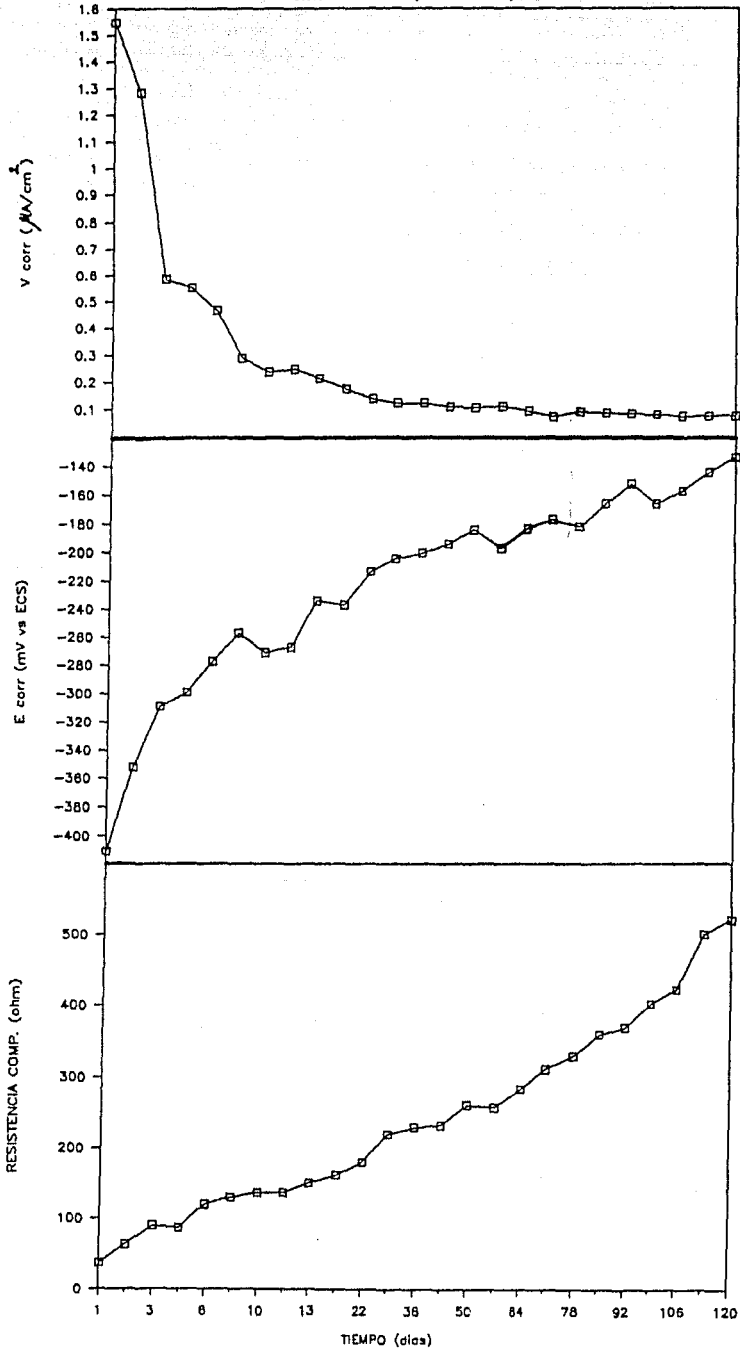
0.0% de Cl⁻ (C. Puzolánico)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-411	4.500	36.7	2.222	1.549
2	-352	3.730	63.3	2.681	1.284
3	-309	1.700	90.0	5.882	0.585
4	-299	1.600	86.7	6.250	0.551
6	-277	1.350	120.0	7.407	0.465
8	-257	0.840	130.0	11.905	0.289
10	-271	0.690	136.7	14.493	0.237
11	-267	0.720	136.7	13.889	0.248
13	-234	0.620	150.0	16.129	0.213
15	-237	0.510	161.7	19.608	0.176
22	-213	0.400	180.0	25.000	0.138
29	-204	0.355	220.0	28.169	0.122
36	-200	0.355	230.0	28.169	0.122
43	-194	0.315	233.3	31.746	0.108
50	-184	0.305	261.7	32.787	0.105
57	-197	0.320	258.3	31.250	0.110
64	-183	0.275	283.3	36.364	0.095
71	-177	0.210	311.7	47.619	0.072
78	-182	0.265	330.0	37.736	0.091
85	-166	0.247	360.0	40.486	0.085
92	-152	0.240	370.0	41.667	0.083
100	-166	0.235	403.3	42.553	0.081
106	-157	0.215	423.3	46.512	0.074
113	-144	0.220	500.0	45.455	0.076
120	-133	0.225	520.0	44.444	0.077

TABLA 4.16 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Puzolánico.
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.0% de cloruros como HCl (ver figura 4.19)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.0% de Cloruro (C. Puzolánico)



E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.25% de Cloruros (C. Puzolánico)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-331	2.170	41.7	4.608	0.747
2	-309	1.400	58.3	7.143	0.482
3	-281	1.090	70.0	9.174	0.375
5	-265	0.650	88.3	15.385	0.224
7	-298	0.900	86.7	11.111	0.310
9	-290	0.760	98.3	13.158	0.262
10	-280	0.670	100.0	14.925	0.231
12	-284	0.815	106.7	12.270	0.280
14	-284	0.580	113.3	14.706	0.234
16	-251	0.580	118.3	17.241	0.200
19	-276	0.490	120.0	20.408	0.169
26	-252	0.555	126.7	18.018	0.191
33	-260	0.490	140.0	20.408	0.169
40	-270	0.570	153.3	17.544	0.196
48	-270	0.575	158.3	17.391	0.198
55	-265	0.625	196.7	16.000	0.215
62	-285	0.600	173.3	16.667	0.206
69	-290	0.710	190.0	14.085	0.244
76	-294	0.580	235.0	17.241	0.200
83	-263	0.530	226.7	18.868	0.182
90	-274	0.530	233.3	18.868	0.182
97	-275	0.560	220.0	17.857	0.193
104	-265	0.550	263.3	18.182	0.189
111	-252	0.510	275.0	19.608	0.176
120	-264	0.515	323.3	19.417	0.177

TABLA 4.19 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Puzolánico
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.25% de cloruros como NaCl (ver figura 4.19)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.25% de Cloruros (C. Puzoiónico)

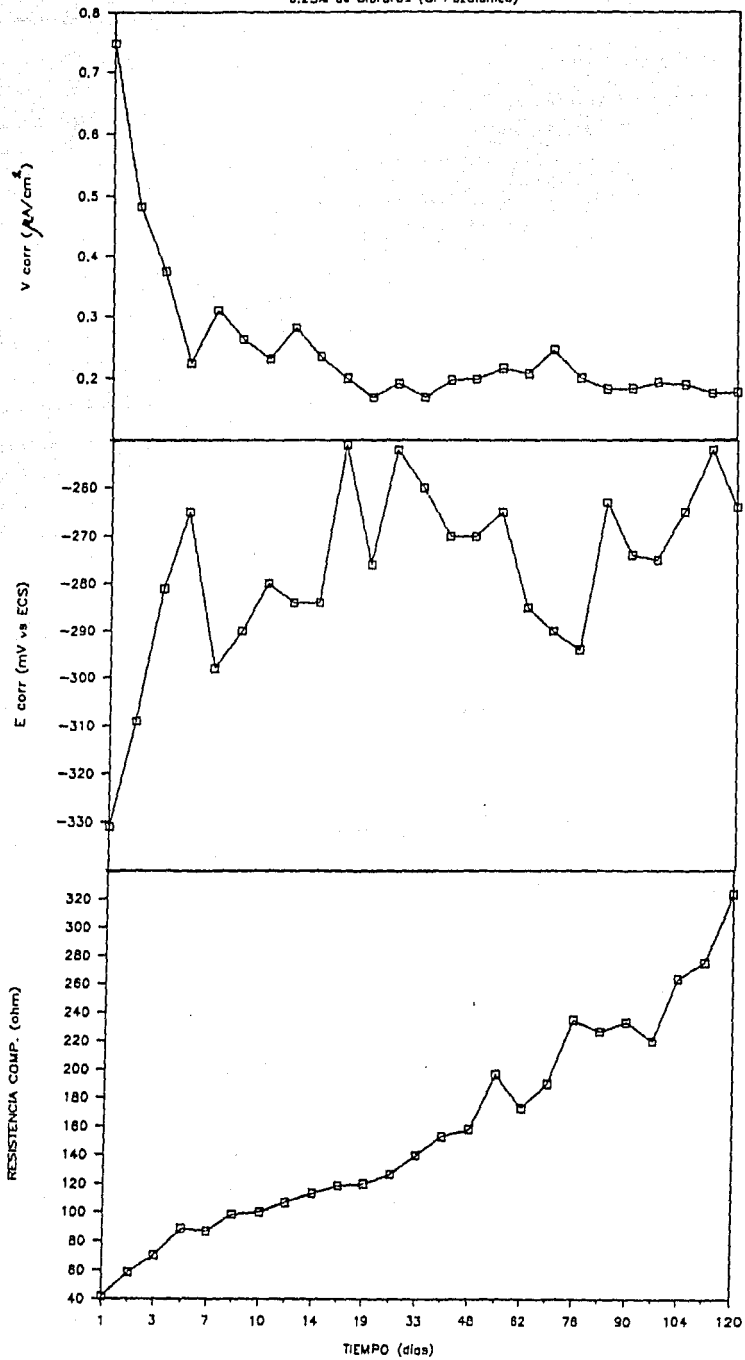


FIGURA 4.19

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.50% de Cloruros (C. Pozolánico)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-448	5.900	40.0	1.695	2.031
2	-440	6.050	53.3	1.653	2.082
3	-417	5.850	65.0	1.709	2.013
5	-391	4.050	81.7	2.469	1.394
7	-393	4.370	80.0	2.288	1.504
9	-381	3.150	86.7	3.175	1.084
10	-363	2.930	85.0	3.413	1.008
12	-329	2.000	100.0	5.000	0.688
14	-343	2.250	115.0	4.444	0.774
16	-348	2.030	113.3	4.926	0.679
19	-365	2.400	120.0	4.167	0.826
26	-344	2.000	116.7	5.000	0.688
33	-350	1.950	130.0	5.128	0.671
40	-323	1.100	153.3	9.091	0.379
48	-340	1.050	150.0	9.524	0.361
55	-328	0.570	178.3	17.544	0.176
62	-309	0.500	173.3	33.333	0.103
69	-325	1.250	176.7	8.000	0.430
76	-303	1.200	221.7	8.333	0.413
83	-319	1.470	206.7	6.993	0.492
90	-330	1.770	226.7	5.550	0.609
97	-345	2.070	217.5	4.831	0.712
104	-313	1.700	250.0	5.982	0.585
111	-309	1.650	276.7	6.061	0.568
120	-304	1.690	310.0	5.917	0.582

TABLA 4.20 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Pozolánico
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.5% de cloruros como NaCl (ver figura 4.20)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.50% de Cloruros (C. Puzolónico)

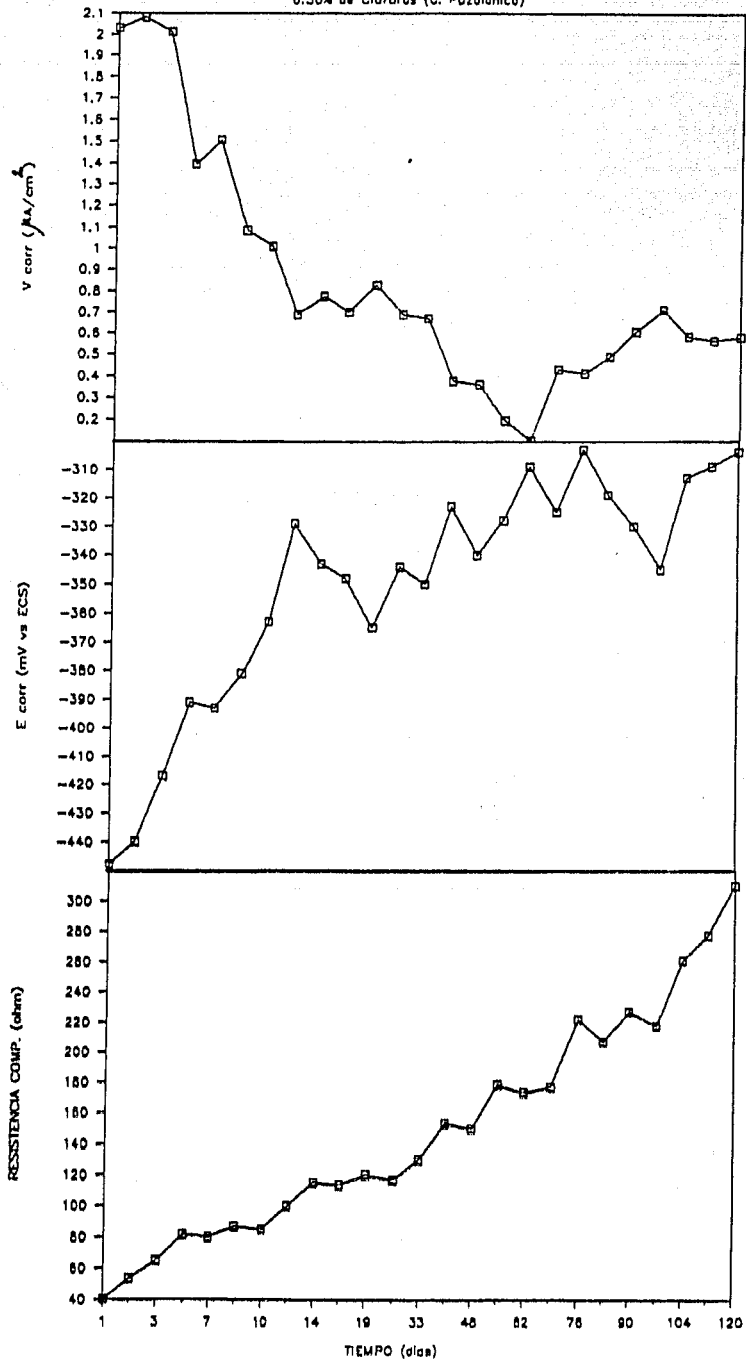


FIGURA 4.20

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

1.00% de Cloruros (C. Pozolánico)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-479	6.550	30.0	1.527	2.254
2	-441	6.500	43.3	1.538	2.237
4	-399	2.770	63.3	3.610	0.953
5	-395	2.500	65.0	4.000	0.860
8	-401	2.350	73.3	4.255	0.809
9	-406	2.220	78.3	4.505	0.764
11	-361	1.650	83.3	6.061	0.568
13	-383	1.550	90.0	6.452	0.533
15	-393	1.710	98.3	5.848	0.589
18	-398	1.840	96.7	5.435	0.633
25	-360	3.400	105.0	2.941	1.170
32	-399	2.100	116.7	4.762	0.723
39	-406	2.600	131.7	3.846	0.895
45	-360	1.500	145.0	6.667	0.516
53	-373	1.770	155.0	5.650	0.509
60	-385	2.000	143.3	5.000	0.688
67	-393	2.400	176.7	4.167	0.826
74	-366	1.950	200.0	5.128	0.671
81	-357	1.900	173.3	5.263	0.654
88	-398	2.850	206.7	3.509	0.981
95	-373	2.230	196.7	4.484	0.757
102	-364	1.800	238.3	5.556	0.619
109	-343	1.470	250.0	6.803	0.506
118	-361	1.580	276.7	6.329	0.544

TABLA 4.21 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Pozolánico
 Pul. cemento:arena = 1/3. Pul. agua:cemento = 0.5
 1.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.21)

EFFECTO DEL ION CLORURO

1.0% de Cloruros (C. Puzolnca)

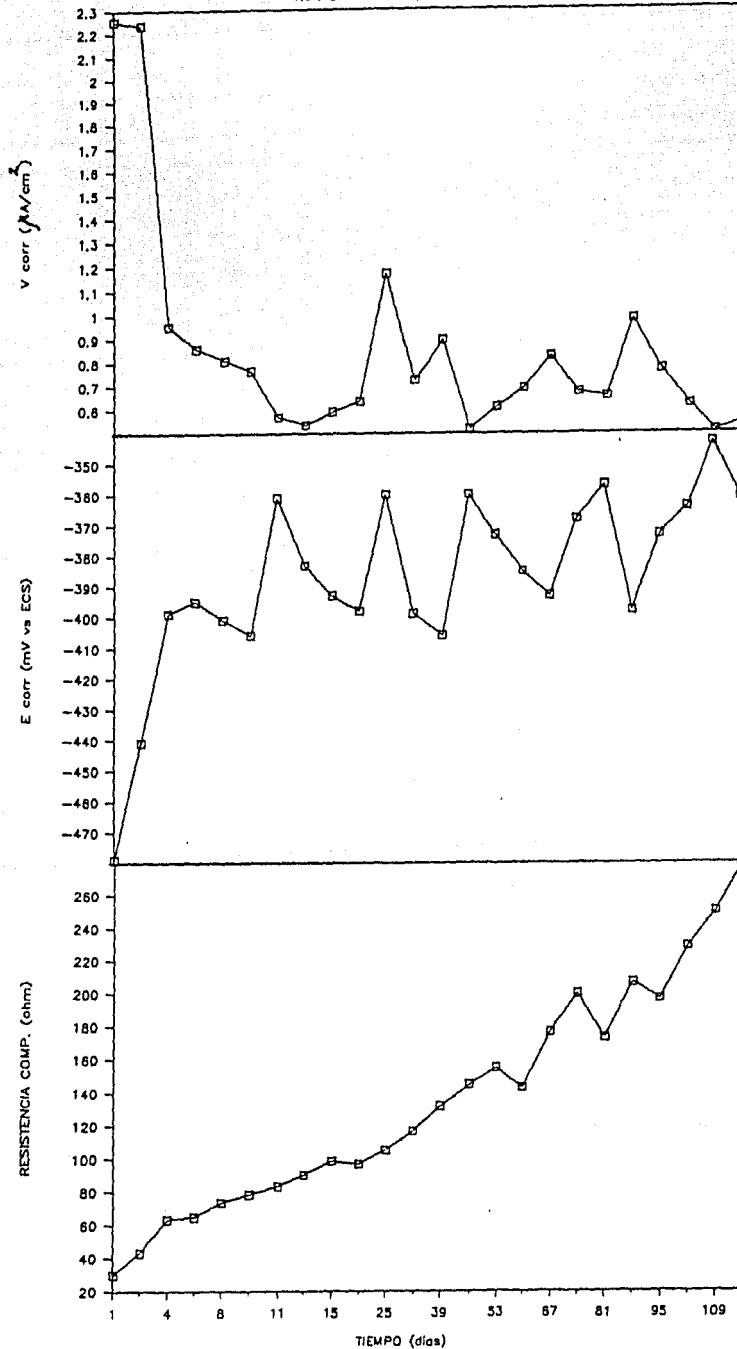


FIGURA 4.21

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

3.00% de Cloruros (C. Puzolánico)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-455	16.000	26.7	0.625	5.507
2	-474	17.000	40.0	0.588	5.851
4	-485	14.400	48.3	0.694	4.956
6	-488	13.100	51.7	0.763	4.508
8	-497	14.500	46.7	0.690	4.990
9	-499	13.300	50.0	0.752	4.577
11	-501	13.700	50.0	0.730	4.715
13	-500	11.300	66.7	0.885	3.889
15	-496	11.000	80.0	0.909	3.786
18	-485	9.500	78.3	1.053	3.269
25	-448	7.750	85.0	1.290	2.667
32	-428	5.430	91.7	1.842	1.869
39	-381	4.650	106.7	2.151	1.600
46	-372	4.250	125.0	2.353	1.463
53	-428	6.150	123.0	1.626	2.117
60	-398	5.300	130.0	1.887	1.824
67	-392	4.500	116.7	2.222	1.549
74	-434	6.100	150.0	1.639	2.099
81	-441	6.300	143.3	1.587	2.168
88	-420	4.950	161.7	2.020	1.704
95	-421	5.200	136.7	1.923	1.790
102	-423	4.750	173.3	2.105	1.635
109	-446	4.950	196.7	2.020	1.704
118	-478	6.500	203.3	1.538	2.237

TABLA 4.22 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Puzolánico
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 3.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.22)

EFFECTO DEL ION CLORURO

3.0% de Cloruros (C. Puzolónico)

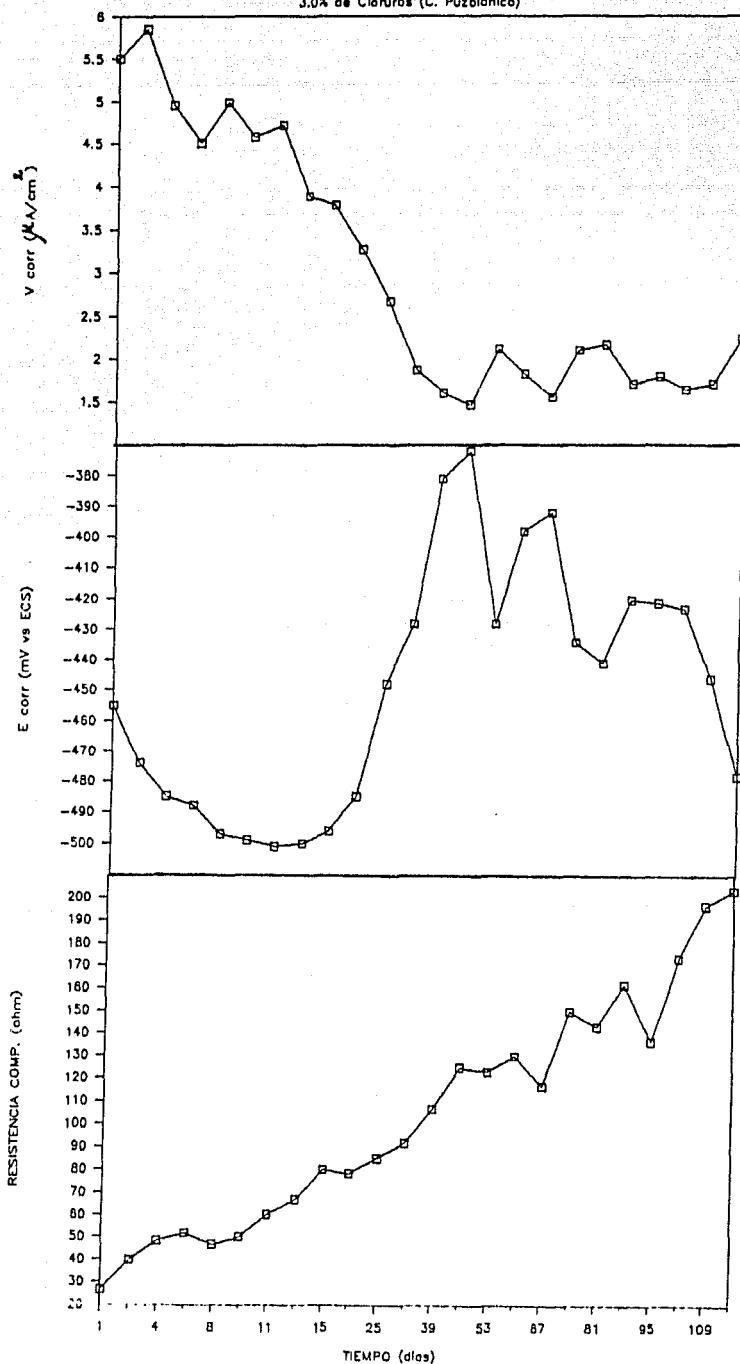


FIGURA 4.22

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.0% de Cl⁻ (C. Portland III)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-260	0.785	48.3	12.739	0.270
2	-226	0.765	73.3	13.072	0.263
3	-222	0.590	95.0	16.949	0.203
4	-193	0.410	96.7	24.390	0.141
5	-191	0.345	110.0	28.986	0.119
7	-177	0.365	116.7	27.397	0.126
8	-171	0.320	118.3	31.250	0.110
11	-171	0.380	120.0	26.316	0.131
14	-149	0.200	136.7	50.000	0.069
16	-150	0.220	146.7	45.455	0.076
21	-160	0.190	141.7	52.632	0.065
28	-166	0.110	148.3	90.909	0.038
35	-169	0.140	165.0	71.429	0.048
42	-163	0.215	145.0	46.512	0.074
49	-167	0.195	140.0	51.282	0.067
56	-172	0.180	171.7	55.556	0.062
63	-178	0.190	156.7	52.632	0.065
70	-176	0.180	156.7	55.556	0.062
77	-176	0.210	145.0	47.619	0.072
84	-166	0.190	163.3	52.632	0.065
91	-158		166.7	ERR	ERR
100	-168	0.175	203.3	57.143	0.060
108	-185	0.190	180.0	52.632	0.065
119	-191	0.220	150.0	45.455	0.076
120		0.200	153.3	50.000	0.069

TABLA 4.23 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo 111
 Rel. cemento/arena = 1/3; Rel. agua/cemento = 0.5
 0.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.23)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.0% de Cloruros (C. Portland tipo III)

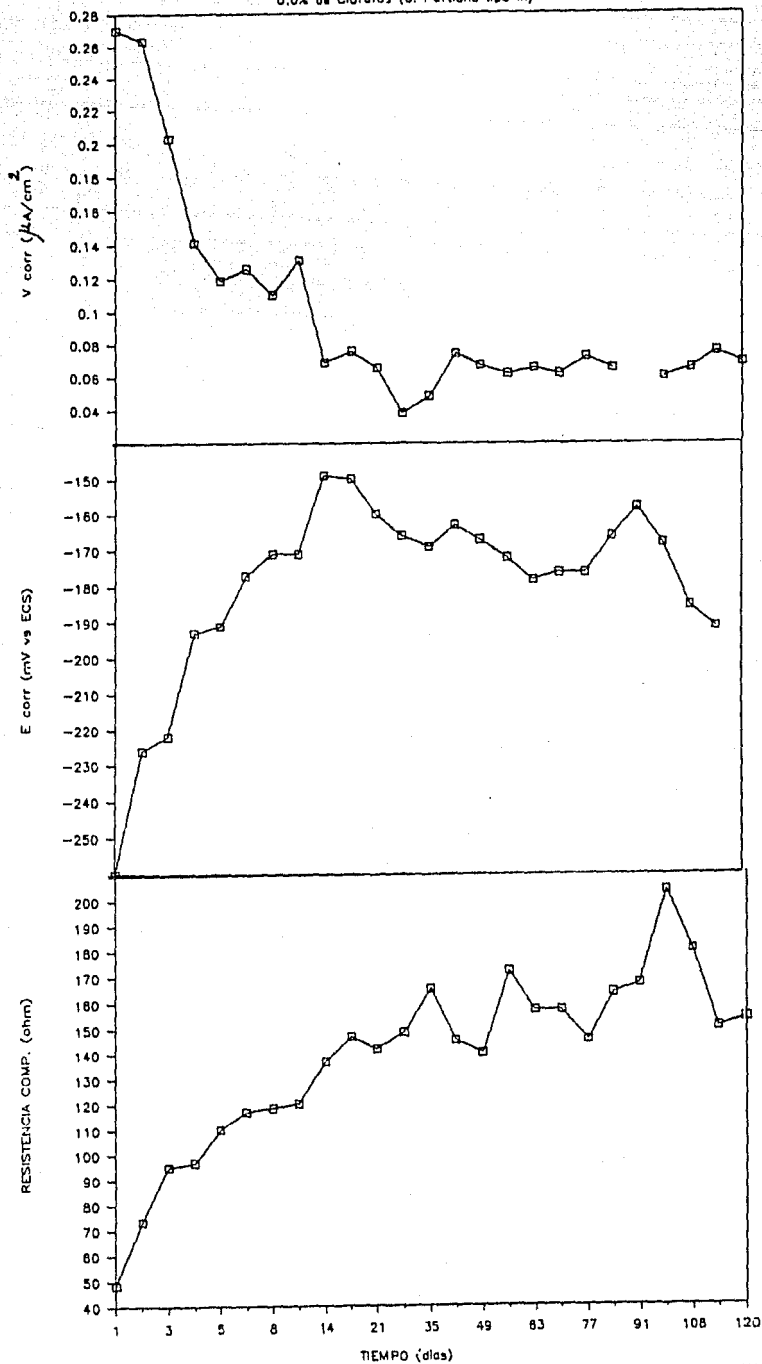


FIGURA 4.27

E F F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.25% de Cloruros (C. Portland tipo III)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-382	9.450	60.0	1.058	3.252
2	-361	4.260	76.7	2.347	1.466
3	-332	2.230	86.7	4.484	0.767
4	-319	1.900	83.3	5.263	0.654
5	-300	1.380	100.0	7.246	0.475
7	-316	1.350	86.7	7.407	0.465
8	-289	1.700	93.3	7.692	0.447
11	-281	0.660	100.0	15.152	0.227
14	-303	0.630	105.0	15.873	0.217
16	-285	0.630	101.7	15.873	0.217
21	-274	0.440	111.7	22.727	0.151
28	-253	0.295	116.7	33.898	0.102
35	-226	0.200	131.7	50.000	0.069
42	-237	0.270	101.7	34.483	0.100
49	-249	0.285	123.3	35.088	0.098
53	-257	0.300	138.7	33.333	0.103
60	-251	0.255	125.0	39.216	0.088
67	-247	0.225	133.3	44.444	0.077
74	-259	0.290	123.3	34.483	0.100
91	-221	0.190	146.7	52.632	0.065
87	-226	0.210	146.7	47.619	0.072
96	-253	0.245	150.0	40.816	0.084
104	-251	0.250	126.7	40.000	0.086
115	-246	0.270	133.3	37.037	0.093
116	-250	0.325	130.0	30.769	0.112

TABLA 4.24 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo III
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.25% de cloruros como NaCl (ver figura 4.24)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.25% de Cloruros (C. Portland III)

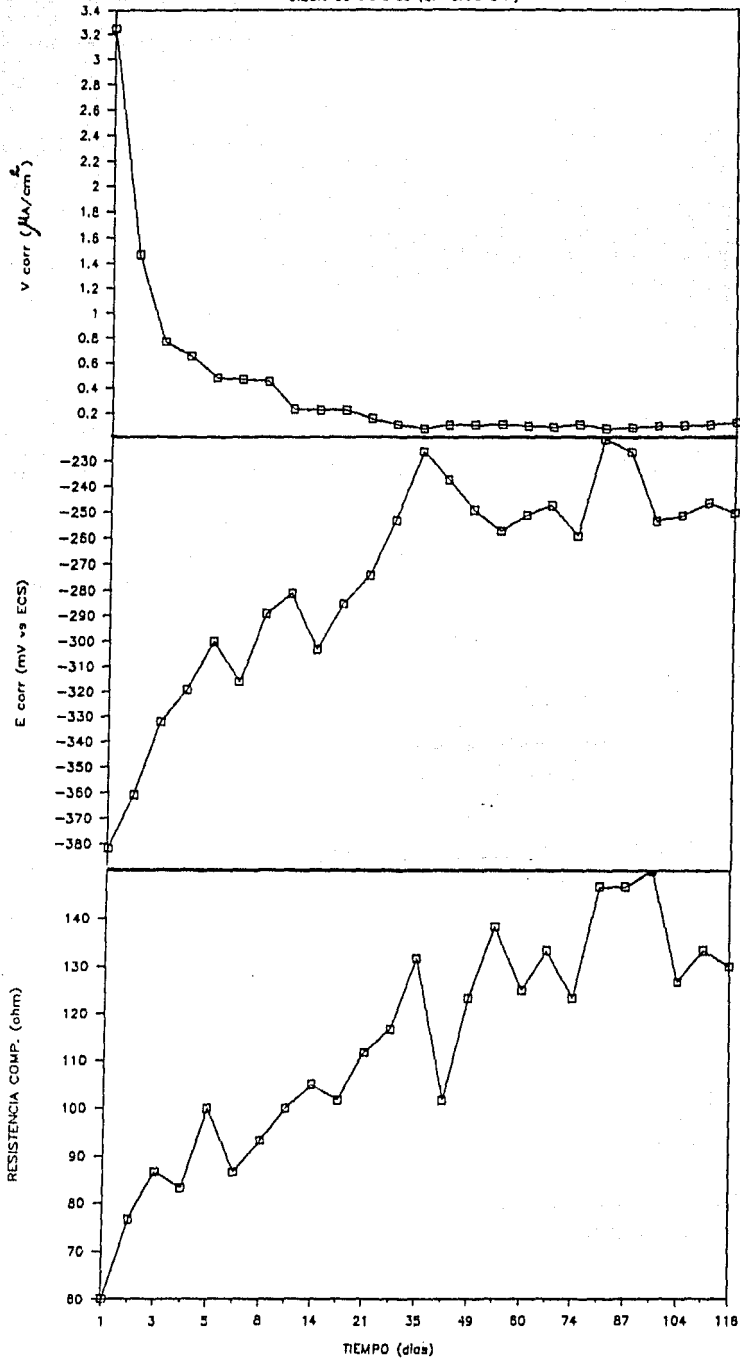


FIGURA 4.24

E F E C T O D E L I O N C L O R U R O

0.50% de Cloruros (C. Portland tipo III)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-352	8.550	48.3	1.170	2.943
2	-304	1.730	71.7	5.780	0.595
3	-310	1.390	76.7	7.194	0.478
4	-319	1.230	88.3	8.130	0.423
6	-338	1.740	80.0	5.747	0.599
7	-323	1.490	85.0	6.711	0.513
8	-310	1.030	95.0	9.709	0.354
10	-308	0.710	90.0	14.085	0.244
13	-251	0.410	93.3	24.390	0.141
15	-262	0.490	83.3	20.408	0.169
20	-272	0.300	105.0	33.333	0.103
27	-292	0.475	123.3	21.053	0.163
34	-318	0.530	126.7	18.868	0.182
41	-331	0.790	108.3	12.658	0.272
48	-319	0.780	112.5	12.821	0.268
55	-316	0.670	126.7	14.925	0.231
62	-305	0.765	110.0	13.072	0.263
69	-289	0.600	126.7	16.667	0.205
76	-298	0.715	120.0	13.986	0.246
83	-305	0.750	130.0	13.333	0.258
90	-316	0.850	143.3	11.765	0.293
99	-295	0.645	150.0	15.504	0.222
107	-303	0.670	136.7	14.925	0.231
118	-325	1.000	130.0	10.000	0.344
123	-317	0.935	160.0	10.695	0.322

TABLA 4.25 EFECTOS DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo III
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 0.5% de cloruros como NaCl (ver figura 4.25)

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.50% de Cloruros (C. Portland III)

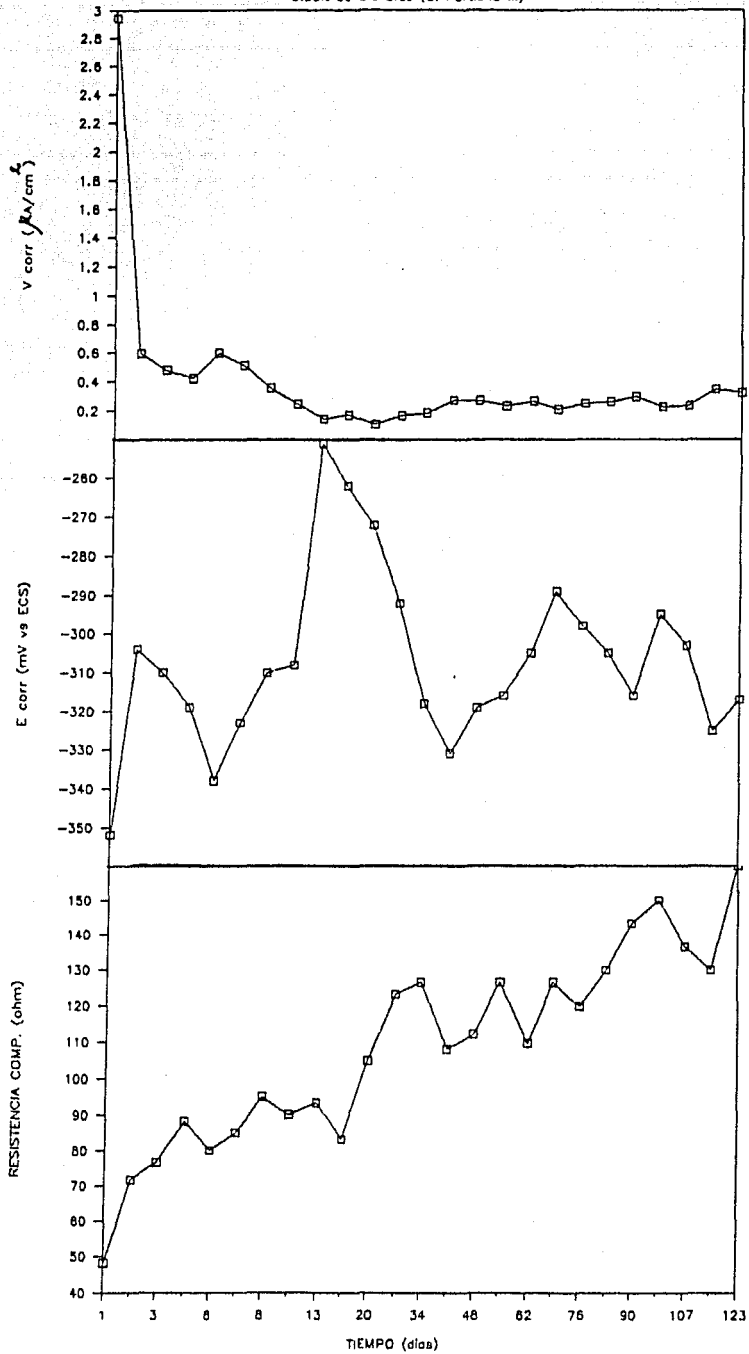


FIGURA 4.25

EFECTO DEL ION CLORURO

1.00% de Cloruros (C. Portland tipo III)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-432	4.800	143.3	2.083	1.652
2	-382	3.700	68.3	2.703	1.273
3	-360	2.100	75.0	4.762	0.723
4	-350	2.330	85.0	4.292	0.802
5	-359	1.950	86.7	5.128	0.671
7	-365	1.770	83.3	5.650	0.609
8	-365	2.350	83.3	4.255	0.809
10	-367	1.950	90.0	5.128	0.671
13	-362	1.830	88.3	5.464	0.630
15	-357	2.080	90.0	4.808	0.716
20	-361	1.850	105.0	5.405	0.637
27	-338	1.120	120.0	8.929	0.385
34	-343	1.160	116.7	8.621	0.399
41	-367	1.850	120.0	5.405	0.637
48	-359	1.730	103.3	5.780	0.595
55	-347	1.520	135.0	6.579	0.523
62	-334	1.190	110.0	8.403	0.410
69	-342	1.580	123.3	6.329	0.544
76	-358	2.000	113.3	5.000	0.688
83	-337	1.550	126.7	6.452	0.533
90	-330	1.410	140.0	7.092	0.485
99	-290	0.920	143.3	10.870	0.317
107	-296		143.3	ERR	ERR
118	-294	0.800	136.7	12.500	0.275
123	-289	0.690	156.7	14.493	0.237

TABLA 4.26 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo III
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 1.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.26)

EFFECTO DEL ION CLORURO

1.0% de Cloruro (C. Portland III)

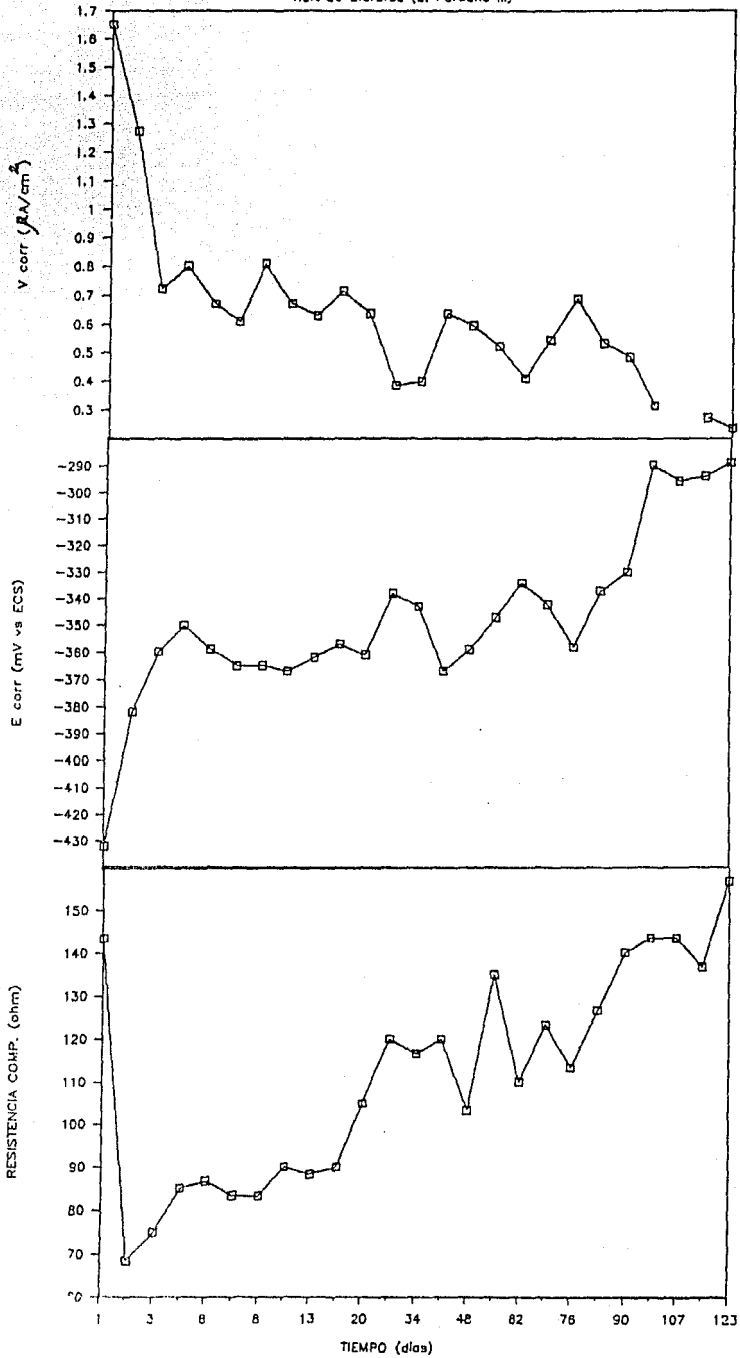


FIGURA 4.24

EFECTO DEL ION CLORURO

3.00% de Cloruros (C. Portland tipo III)

TIEMPO (días)	E corr (mV)	I (μ A)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr (μ A/cm ²)
1	-466	9.100	48.3	1.099	3.132
2	-476	9.100	53.3	1.099	3.132
3	-464	9.600	68.3	1.042	3.304
5	-470	8.200	60.0	1.220	2.822
6	-474	8.360	68.3	1.196	2.877
7	-475	6.800	73.3	1.471	2.340
9	-491	8.700	73.3	1.149	2.994
10	-473	9.000	78.3	1.111	3.097
12	-500	10.100	73.3	0.990	3.476
14	-491	10.100	73.3	0.990	3.476
16	-473	10.400	88.3	0.962	3.579
23	-547	12.500	88.3	0.800	4.302
30	-558	9.300	78.3	1.075	3.201
36	-562	9.400	70.0	1.064	3.235
44	-601	13.300	80.0	0.752	4.577
51	-596	10.600	96.7	0.943	3.648
58	-609	11.050	86.7	0.905	3.803
65	-604	10.050	90.0	0.995	3.459
72	-620	11.700	90.0	0.855	4.027
79	-604	10.800	80.0	0.926	3.717
86	-584	12.200	93.3	0.820	4.199
98	-599	12.000	103.3	0.833	4.130
106	-590	9.600	93.3	1.042	3.304
117	-582	10.600	90.0	0.943	3.648
122	-567	8.800	113.3	1.136	3.029

TABLA 4.27 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland Tipo III
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 3.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.27)

EFFECTO DEL ION CLORURO

3.0% de Cloruro (C. Portland II)

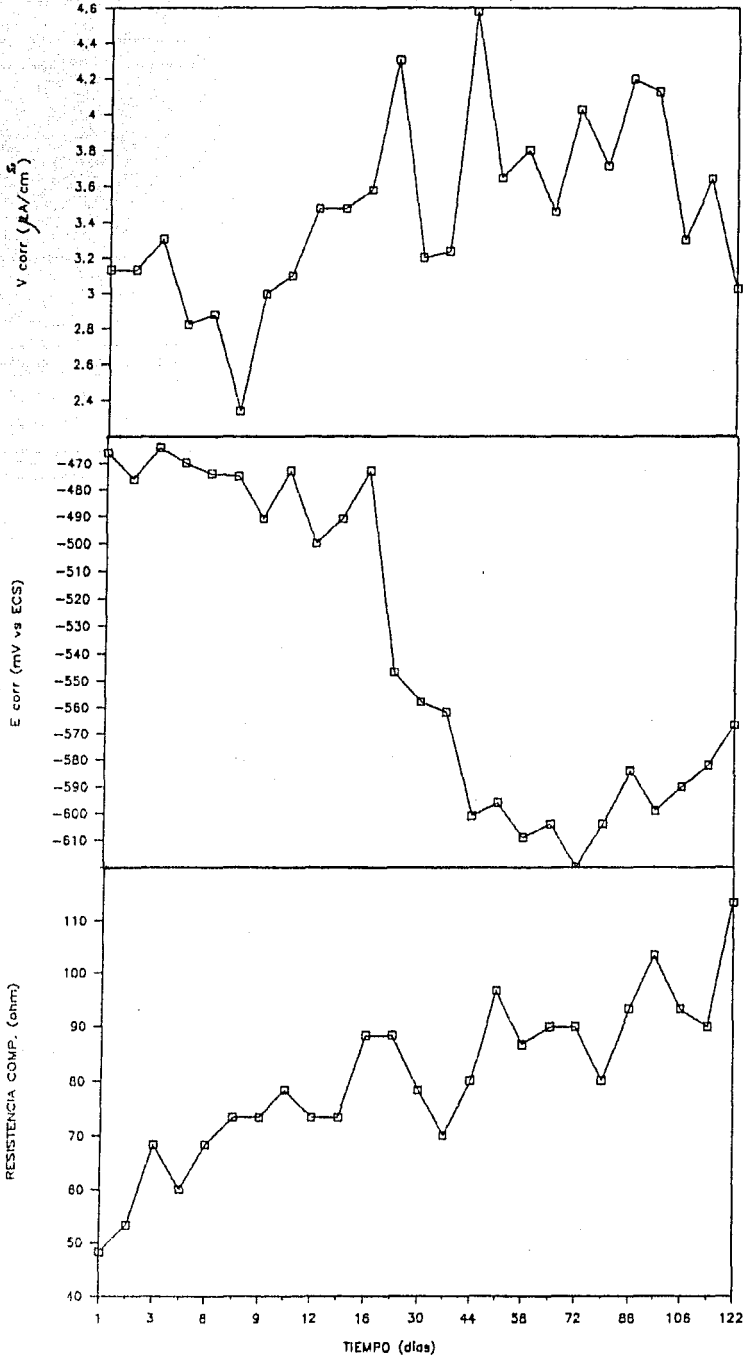


FIGURA 4.27

E F E C T O D E L T I P O D E C A T I O N

3.00% de Cl⁻ como NaCl (C. Portland I)

TIEMPO (días)	E _{corr} (mV)	I (μ A)	R (ohm)	R _p (K ohm)	V _{corr} (μ A/cm ²)
1	-484	6.400	13.0	1.563	2.203
2	-509	9.900	20.0	1.010	3.407
3	-547	12.300	23.3	0.813	4.233
4	-625	8.800	25.0	1.136	3.029
6	-653	9.400	26.7	1.064	3.235
7	-674	15.400	31.7	0.649	5.300
8	-702	20.000	31.7	0.500	6.883
10	-662	9.600	31.7	1.042	3.304
13	-662	12.200	41.7	0.820	4.199
15	-621		46.7	ERR	ERR
22	-638	12.500	43.3	0.800	4.302
29	-609	7.800	48.3	1.282	2.684
36	-601	7.350	50.0	1.361	2.530
43	-601	7.000	53.3	1.429	2.409
50	-580	6.550	45.0	1.527	2.254
57	-584	5.500	43.3	1.818	1.893
64	-589	5.950	46.7	1.681	2.048
71	-581	5.850	45.0	1.709	2.013
78	-585	6.200	51.7	1.613	2.134
85	-518	7.300	46.7	1.370	2.512
92	-620	6.550	53.3	1.527	2.254
99	-609	3.500	60.0	2.857	1.205
107	-585	6.550	65.0	1.170	2.943
113	-596	4.850	63.3	2.062	1.669
120	-578	5.000	63.3	2.000	1.721

TAPLA 4.28 EFECTO DEL TIPO DE CATION. Cemento Portland tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 3.0% de cloruros como NaCl (ver figura 4.28)

EFFECTO DEL TIPO DE CATION

NaCl (C. Portland Tipo I)

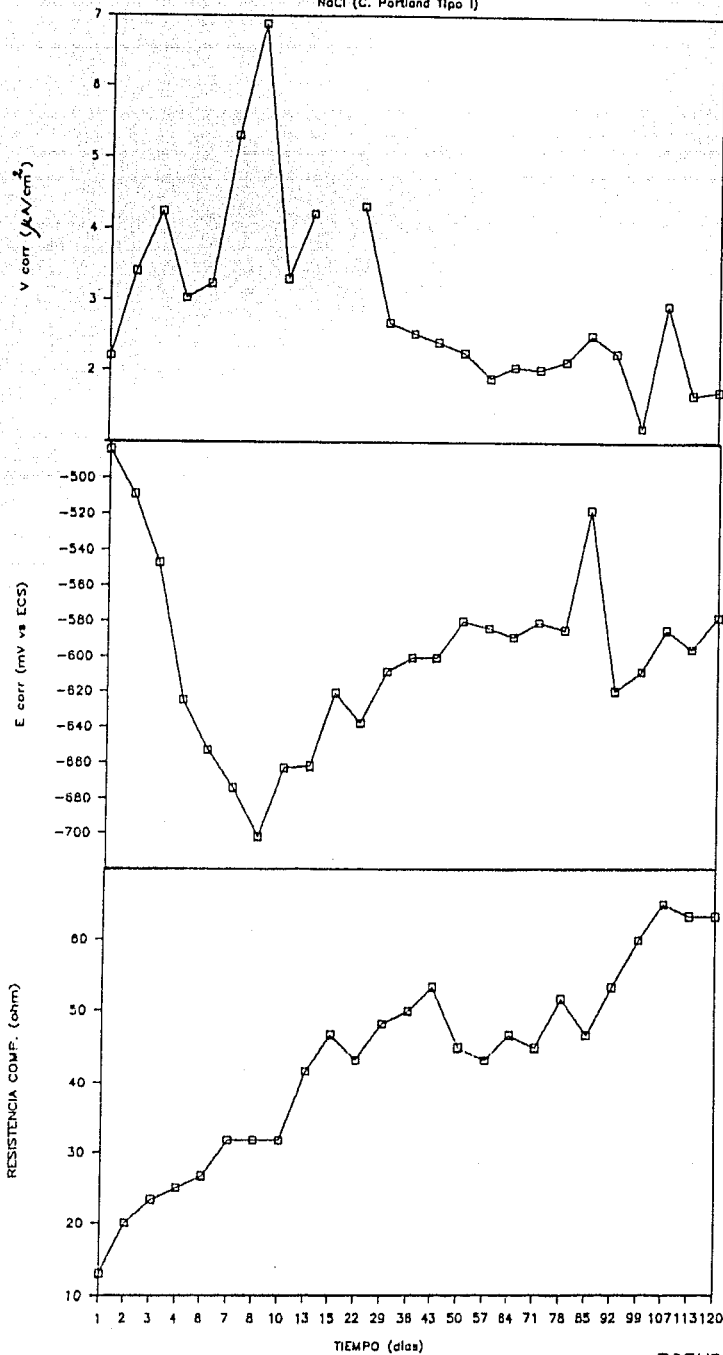


FIGURA 4.2B

E F E C T O D E L T I P O D E C A T I O N

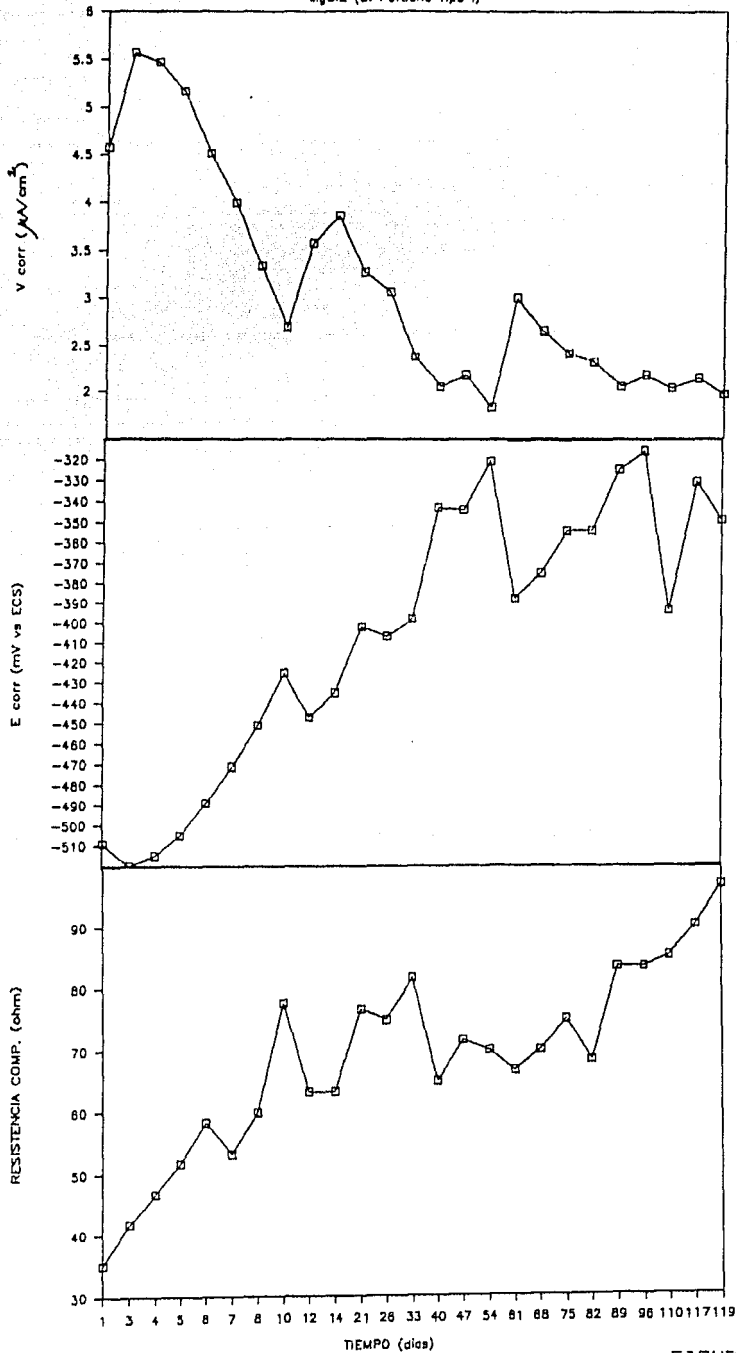
3.00% de Cl⁻ como MgCl₂ (C. Portland I)

TIEMPO (días)	E _{corr} (mV)	I (μA)	R (ohm)	R _p (K ohm)	V _{corr} (μA/cm ²)
1	-509	13.300	35.0	0.752	4.577
3	-520	16.200	41.7	0.617	5.575
4	-515	15.900	46.7	0.629	5.472
5	-505	15.000	51.7	0.567	5.162
6	-489	13.100	58.3	0.763	4.508
7	-471	11.600	53.3	0.862	3.992
8	-451	9.700	60.0	1.031	3.338
10	-425	7.850	77.7	1.274	2.702
12	-447	10.400	63.3	0.962	3.579
14	-435	11.200	63.3	0.893	3.855
21	-402	9.500	76.7	1.053	3.269
26	-407	8.900	75.0	1.124	3.063
33	-398	6.900	91.7	1.449	2.375
40	-343	5.950	65.0	1.681	2.048
47	-344	6.300	71.7	1.587	2.168
54	-321	5.300	70.0	1.887	1.824
61	-388	6.700	56.7	1.149	2.994
68	-375	7.700	70.0	1.299	2.650
75	-354	7.000	75.0	1.429	2.409
82	-354	6.700	68.3	1.493	2.306
89	-325	5.950	83.3	1.681	2.048
96	-316	6.300	83.3	1.587	2.168
110	-394	5.900	85.0	1.695	2.031
117	-331	6.200	90.0	1.613	2.134
119	-349	5.700	96.7	1.754	1.922

TABLA 4.29 EFECTO DEL TIPO DE CATION. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 3.0% de cloruros como MgCl₂ (ver figura 4.29)

EFEECTO DEL TIPO DE CATION

MgCl₂ (C. Portland Tipo I)



E F E C T O D E L T I P O D E C A T I O N

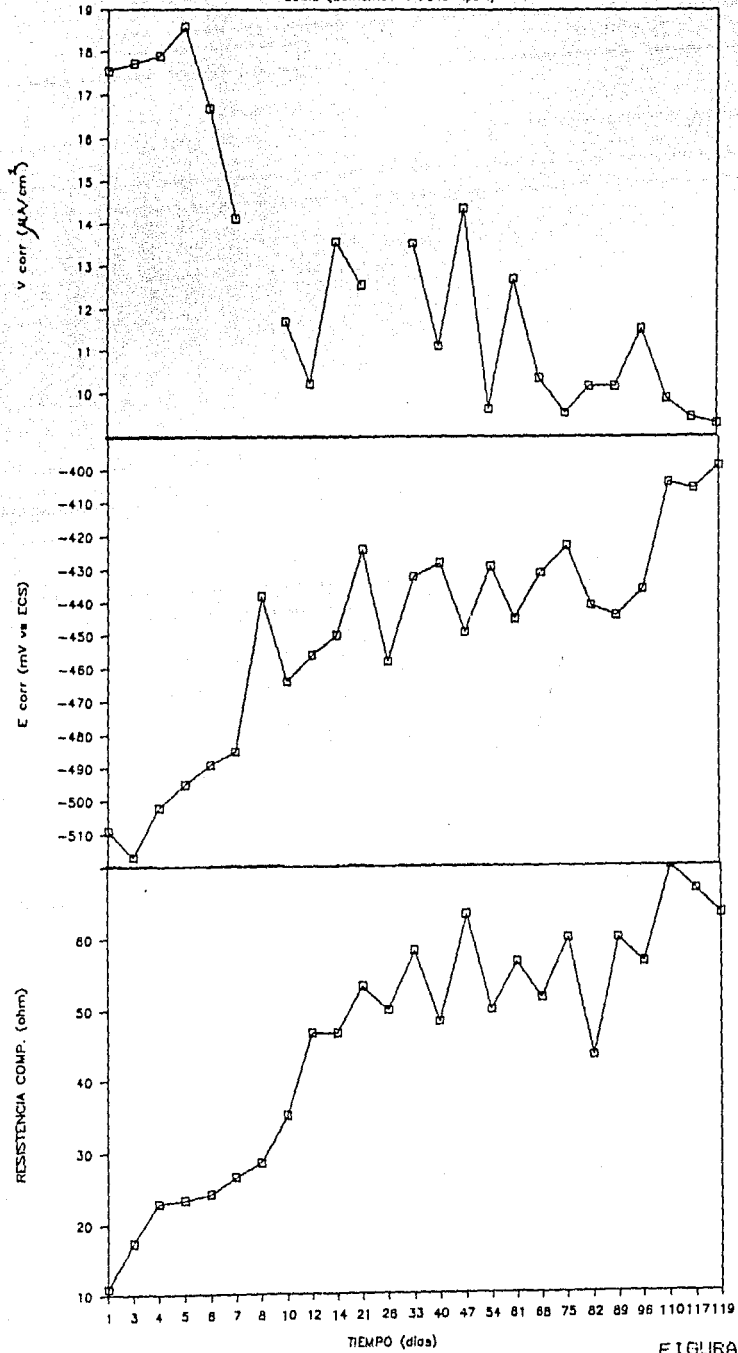
3.00% de Cl^- como $CaCl_2$ (C. Portland I)

TIEMPO (dias)	Ecorr (mV)	I (μA)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr ($\mu A/cm^2$)
1	-509	51.000	10.8	0.196	17.552
3	-517	51.500	17.5	0.194	17.724
4	-502	52.000	22.9	0.192	17.896
5	-495	54.000	23.3	0.185	18.584
6	-489	48.500	24.2	0.206	16.692
7	-485	41.000	26.6	0.244	14.110
8	-438		28.6	ERR	ERR
10	-464	34.000	35.1	0.294	11.701
12	-456	29.700	46.7	0.337	10.221
14	-450	39.400	46.7	0.254	13.560
21	-424	36.500	53.3	0.274	12.562
26	-458		50.0	ERR	ERR
33	-432	39.300	58.3	0.254	13.525
40	-428	32.300	48.3	0.310	11.116
47	-449	41.700	63.3	0.240	14.351
54	-429	28.000	50.0	0.357	9.636
61	-445	36.900	56.7	0.271	12.699
68	-431	30.050	51.7	0.333	10.342
75	-423	27.700	60.0	0.361	9.533
92	-441	29.500	43.3	0.339	10.153
89	-444	29.500	60.0	0.339	10.153
96	-436	33.500	56.7	0.299	11.529
110	-404	28.700	70.0	0.348	9.877
117	-406	27.400	66.7	0.365	9.430
119	-399	27.000	63.3	0.370	9.292

TABLA 4.30 EFECTO DEL TIPO DE CATION. Cemento Portland Tipo I
 Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 3.0% de cloruros como $CaCl_2$ (ver figura 4.30)

EFFECTO DEL TIPO DE CATION

CaCl₂ (Cemento Portland Tipo I)



147

FIGURA 4.30

E F E C T O D E A D I T I V O S

3.00% de Cl⁻ y 2.00% de NO₂⁻ como NaNO₂
(C. Portland Tipo III)

TIEMPO (días)	E _{corr} (mV)	I (μ A)	R (ohm)	R _p (K ohm)	V _{corr} (μ A/cm ²)
1	-299	0.520	43.3	19.231	0.179
2	-323	0.900	66.7	11.111	0.310
4	-425	2.900	63.3	3.448	0.996
5	-416	2.600	70.0	3.846	0.895
6	-413	2.100	76.7	4.762	0.723
8	-400	1.550	73.3	6.452	0.533
9	-373	1.300	86.7	7.692	0.447
11	-397	1.400	76.7	7.143	0.482
13	-398	1.270	81.7	7.874	0.437
15	-433	2.550	90.0	3.922	0.878
22	-449	2.100	103.3	4.762	0.723
30	-488	2.030	86.7	4.115	0.836
36	-497	2.800	83.3	3.571	0.964
44	-491	2.230	86.7	4.484	0.767
51	-529	3.170	100.0	3.155	1.091
58	-530	3.200	93.3	3.125	1.101
65	-544	3.270	93.3	3.058	1.125
72	-544	3.160	100.0	3.165	1.088
79	-558	3.230	103.3	3.096	1.112
86	-525	2.850	106.7	3.509	0.981
98	-576	3.370	126.7	2.967	1.160
106	-572	3.700	116.7	2.703	1.273
117	-559	3.670	106.7	2.725	1.263
123	-551	3.150	133.3	3.175	1.084

TABLA 4.31 EFECTO DE ADITIVOS, Cemento Portland Tipo III
Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
3.0% de cloruros como NaCl y 2.0% de nitritos
como NaNO₂ (ver figura 4.31)

EFFECTO DE ADITIVOS

(Cemento Portland Tipo II)

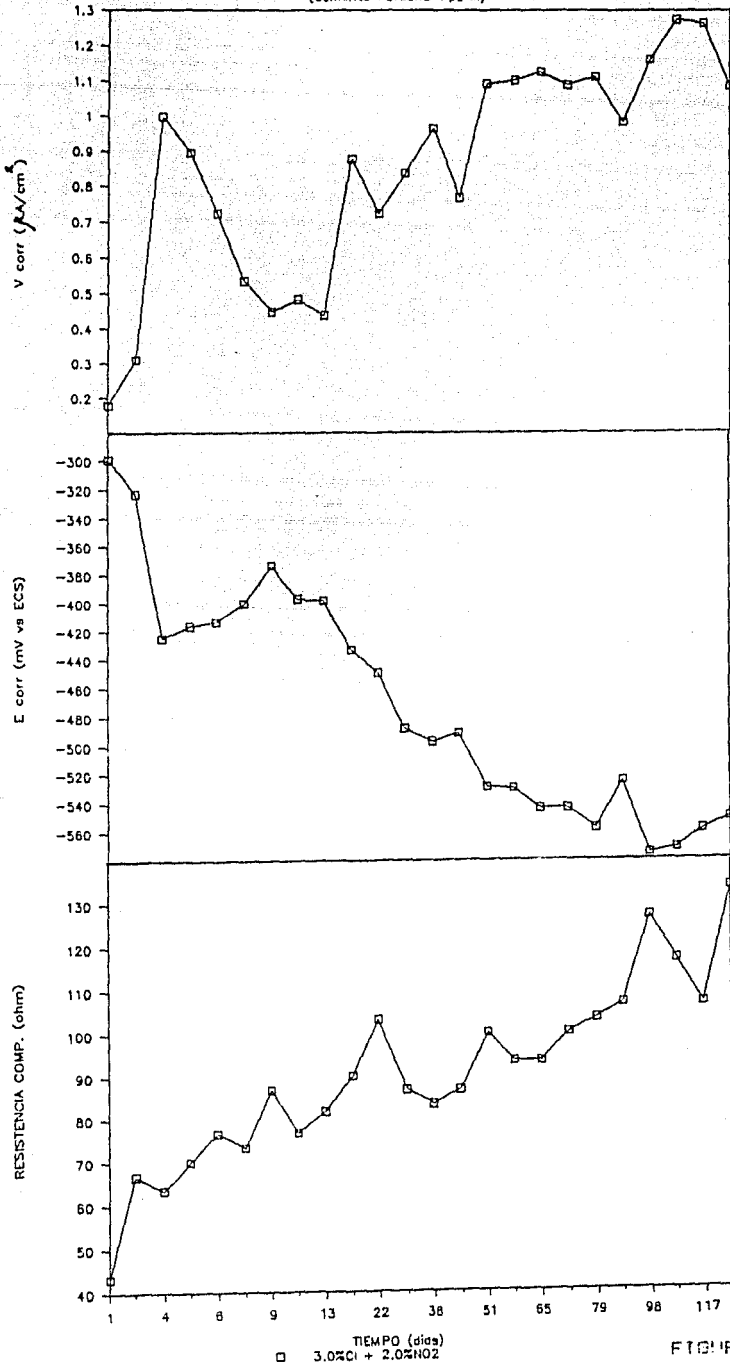


FIGURA 1.31

E F E C T O D E A D I T I V O S

3.00% de Cl⁻ y 3.00% de NO₂⁻ como NaNO₂
(C. Portland Tipo III)

TIEMPO (días)	E _{corr} (mV)	I (μ A)	R (ohm)	R _p (K ohm)	V _{corr} (μ A/cm ²)
1	-367	2.730	41.7	3.663	0.940
2	-375	2.700	65.0	3.704	0.929
4	-412	3.650	73.3	2.740	1.256
5	-443	4.500	73.3	2.222	1.549
6	-451	4.600	78.3	2.174	1.583
8	-462	4.400	85.0	2.273	1.514
9	-453	4.500	85.0	2.222	1.549
11	-470	4.800	80.0	2.083	1.652
13	-466	4.050	80.0	2.469	1.394
15	-459	4.250	93.3	2.353	1.463
22	-462	3.950	105.0	2.532	1.359
30	-443	4.020	80.0	2.488	1.384
36	-420	2.650	70.0	3.774	0.912
44	-451	2.700	78.3	3.704	0.929
51	-496	3.350	86.7	2.985	1.153
58	-455	3.050	80.0	3.279	1.050
65	-482	3.550	86.7	2.817	1.222
72	-494	2.650	90.0	3.774	0.912
79	-496	3.870	90.0	2.584	1.332
86	-500	3.780	103.3	2.646	1.301
98	-493	4.000	110.0	2.500	1.377
106	-485	3.400	103.3	2.941	1.170
117	-471	3.250	96.7	3.077	1.119
123	-444	2.505	116.7	3.992	0.862

TABLA 4.32 EFECTO DE ADITIVOS. Cemento Portland Tipo III
Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
3.0% de cloruros como NaCl y 3.0% de nitritos
como NaNO₂ (ver figura 4.32)

EFFECTO DE ADITIVOS

(Cemento Portland Tipo III)

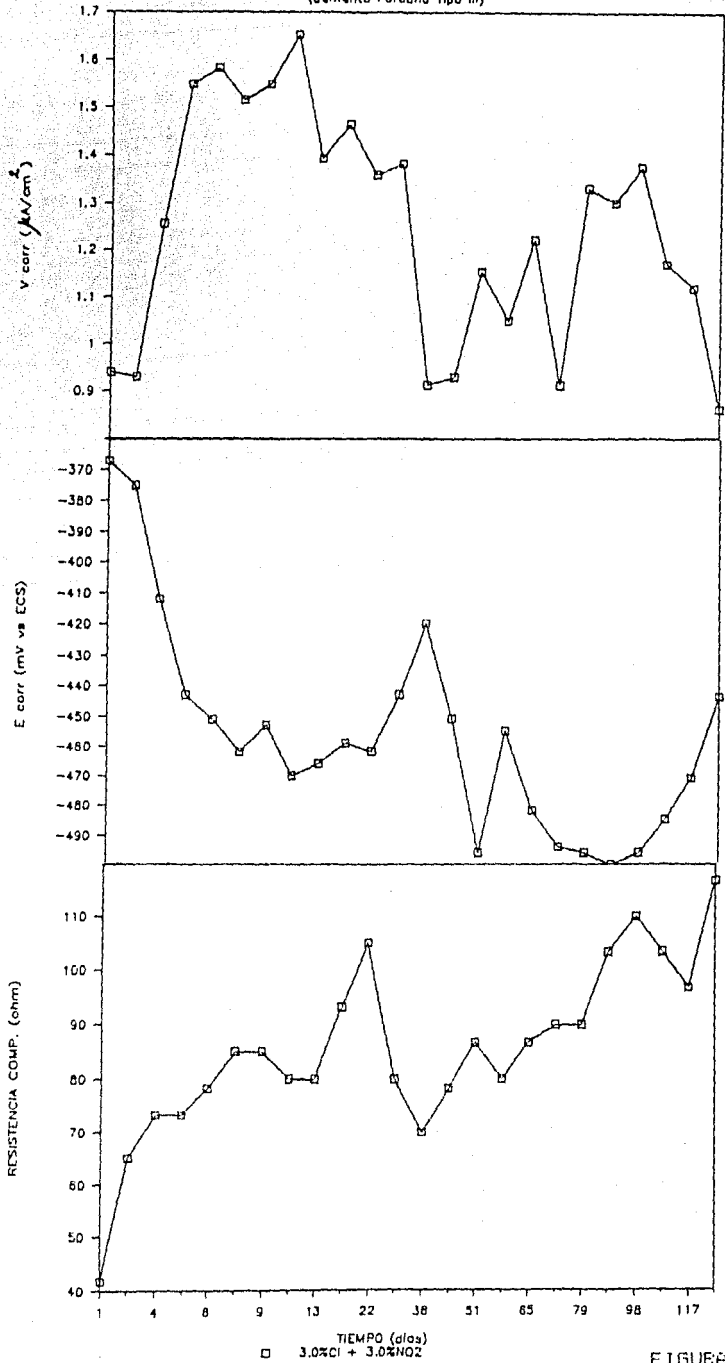


FIGURA 4.32

E F E C T O D E A D I T I V O S

3.00% de Cl^- y 0.10% de Lignosulfonato de Calcio
(C. Portland Tipo III)

TIEMPO (días)	Ecorr (mV)	I (μA)	R (ohm)	Rp (K ohm)	Vcorr ($\mu A/cm^2$)
1	-456	7.800	56.7	1.282	2.684
2	-471	9.300	56.7	1.075	3.201
3	-463	11.100	78.3	0.901	3.820
5	-468	8.200	78.3	1.220	2.822
6	-461	8.850	81.7	1.130	3.048
7	-468	7.550	95.0	1.325	2.598
9	-464	8.350	91.7	1.198	2.874
10	-455	8.350	86.7	1.198	2.874
12	-470	7.900	93.3	1.266	2.719
14	-461	7.100	96.7	1.408	2.444
16	-460	8.000	106.7	1.250	2.752
22	-464	8.580	123.3	1.166	2.953
30	-480	8.450	113.3	1.183	2.908
36	-488	9.000	116.7	1.111	3.097
44	-496	11.100	116.7	0.901	3.820
51	-499	10.500	138.3	0.952	3.614
58	-516	10.400	125.0	0.962	3.579
65	-511	12.000	150.0	0.833	4.130
72	-534	12.600	125.0	0.794	4.336
79	-603	17.800	140.0	0.562	6.126
86	-505	11.000	156.7	0.909	3.786
98	-514	10.600	180.0	0.943	3.648
106	-684	22.000	173.3	0.455	7.571
117	-632	25.300	143.3	0.395	8.707
122	-601	27.300	183.3	0.366	9.395

TABLA 4.33 EFECTO DE ADITIVOS. Cemento Portland Tipo III
Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
3.0% de cloruros como NaCl y 0.1% de lignosulfonato
de calcio (ver figura 4.33)

EFFECTO DE ADITIVOS

(Cemento Portland Tipo II)

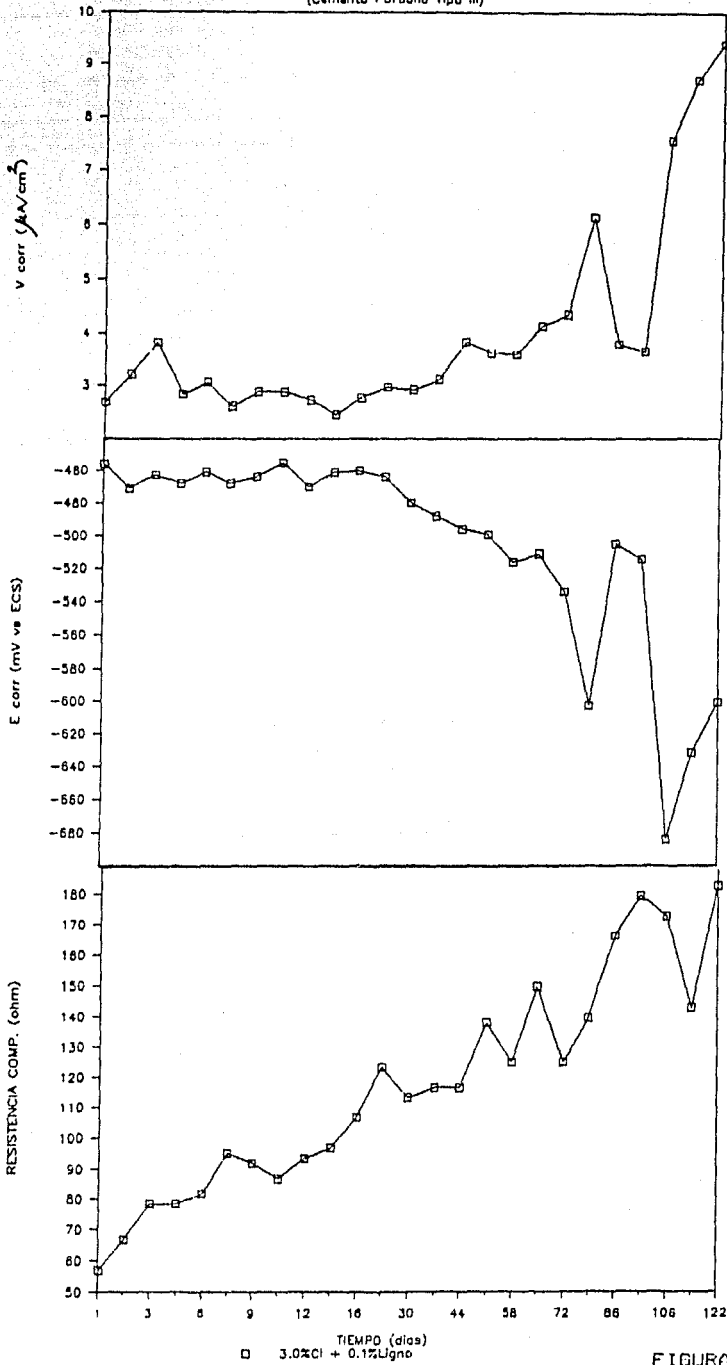


FIGURA 4.23

E F E C T O D E A D I T I V O S

3.00% de Cl⁻ y 1.00% de Estearato de Calcio
(C. Portland Tipo III)

TIEMPO (días)	E _{corr} (mV)	I (μ A)	R (ohm)	R _p (K ohm)	V _{corr} (μ A/cm ²)
1				ERR	ERR
3	-452	6.150	53.3	1.626	2.117
4	-424	4.300	65.0	2.326	1.480
5	-433	4.550	68.3	2.198	1.565
7	-455	5.450	73.3	1.835	1.876
8	-443	5.400	73.3	1.852	1.858
10	-442	4.270	60.0	2.342	1.470
12	-426	3.800	73.3	2.632	1.308
14	-440	4.700	86.7	2.128	1.618
17	-442	4.850	91.7	2.062	1.669
18	-417	5.250	78.3	1.905	1.807
21	-445	5.450	100.0	1.835	1.876
28	-425	3.800	85.0	2.632	1.308
34	-450	3.850	96.7	2.597	1.325
42	-473	6.200	96.7	1.613	2.134
49	-474	6.100	108.3	1.639	2.099
56	-480	7.350	100.0	1.361	2.530
63	-499	6.000	110.0	1.667	2.065
70	-492	8.200	111.7	1.220	2.822
77	-497	9.550	110.0	1.047	3.287
84	-475	7.900	126.7	1.266	2.719
96	-459	7.550	136.7	1.325	2.598
115	-485	10.400	110.0	0.962	3.579
120	-495	8.500	133.3	1.176	2.925

TABLA 4.34 EFECTO DE ADITIVOS. Cemento Portland Tipo III
Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
3.0% de cloruros como NaCl y 1.0% de estearato
de calcio (ver figura 4.34)

EFFECTO DE ADITIVOS

(Cemento Portland Tipo III)

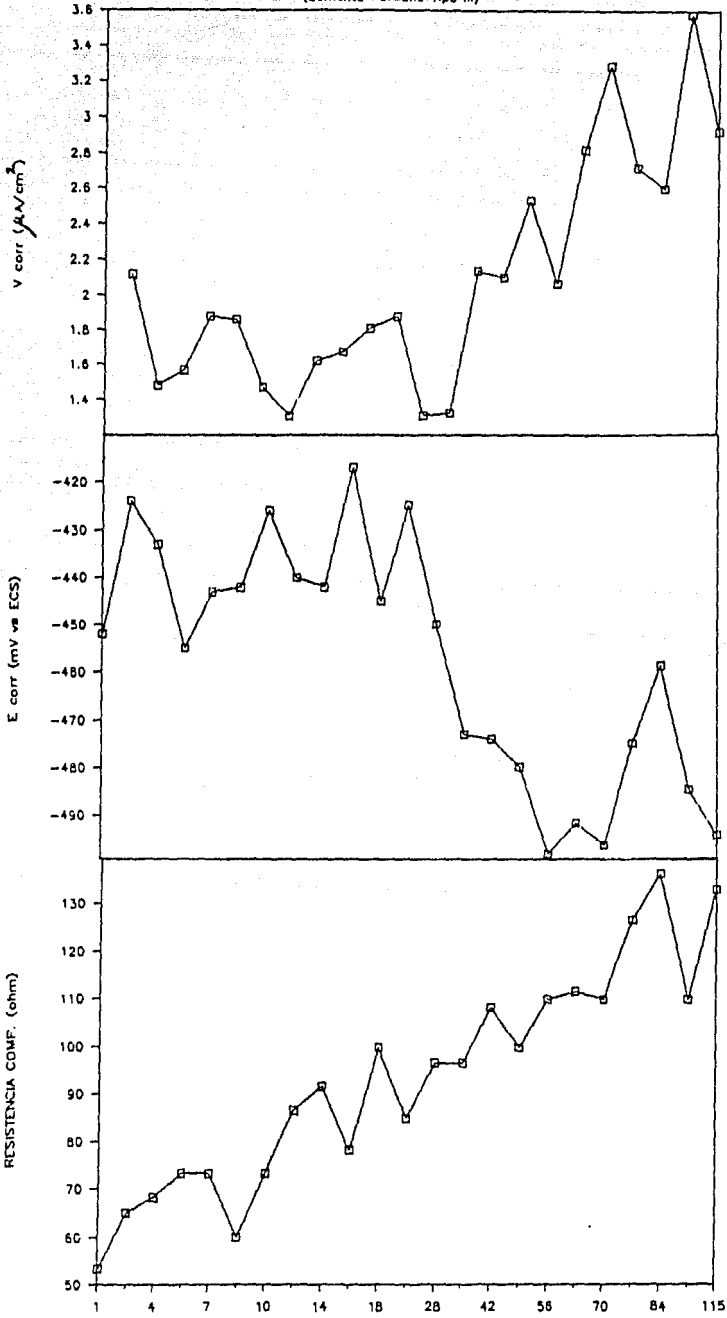


FIGURA 4.34

□ 3.0%Cl + 1.0%Eatec

IV.2) ENSAYO DE DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRATACION DEL CEMENTO.

Los resultados presentados de la determinación del % de CaO liberado durante la hidratación de los cementos en presencia de las sustancias elegidas para probar su efecto sobre la velocidad de corrosión del refuerzo de acero, se presentan en forma comparativa en tablas y gráficas.

EFEECTO DEL TIPO DE CEMENTO

C. Portland Tipo I		C. Puzolánico		C. Portland Tipo III	
TIEMPO:CaO libre (días)	(%)	TIEMPO:CaO libre (días)	(%)	TIEMPO:CaO libre (días)	(%)
15	20.00	21	14.78	14	20.16
28	18.69	28	15.79	28	21.06
60	23.52	62	17.64	60	21.67
90	22.30	91	17.61	120	20.50

TABLA 4.35 EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO EN EL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRATACION. Cementos Portland I, Puzolánico y Portland III. Rel. cemento/arena = 1/2, Rel. agua/cemento = 0.5 (ver figura 4.35)

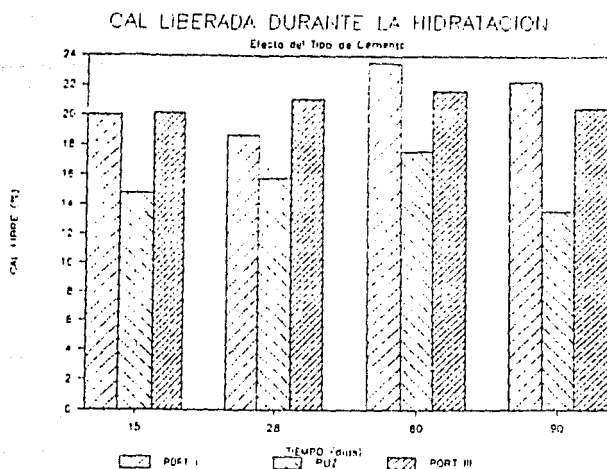


FIGURA 4.35

EFFECTO DEL ION CLORURO

C. Portland Tipo I
(3.0% de Cl)

C. Pozolánico
(3.0% de Cl)

C. Portland tipo III
(3.0% de Cl)

TIEMPO (días)	CaO Libre (%)
14	21.34
28	21.42
60	23.18
90	23.18

TIEMPO (días)	CaO Libre (%)
14	18.86
29	17.89
60	18.40
90	22.12

TIEMPO (días)	CaO Libre (%)
14	22.93
28	23.75
60	25.23
120	24.53

TABLE 4.36 EFFECTO DEL ION CLORURO EN EL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRATACION. Cementos Portland I, Pozolánico, Portland III. Rel. cemento/arena = 1:3, Rel. agua/cemento = 0.5 a concentraciones de Cl⁻ como (HCl) de: 3.0%, 3.0% (ver figura 4.36)

CAL LIBERADA DURANTE LA HIDRATACION

Efecto del Ion Cloruro

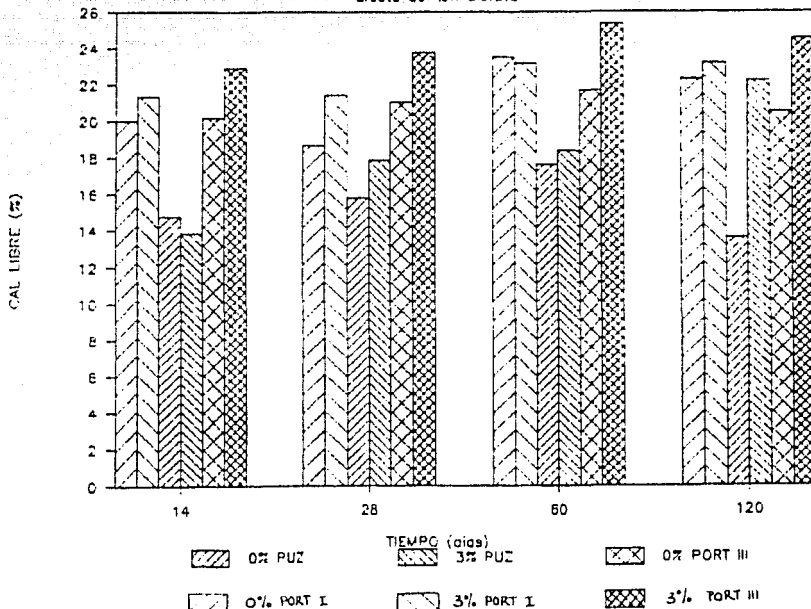


FIGURA 4.36

EFEECTO DEL TIPO DE CATION

3.0%Cl ⁻ (NaCl)		3.0%Cl ⁻ (MgCl ₂)		3.0%Cl ⁻ (CaCl ₂)	
TIEMPO:CaO libre (días)	(%)	TIEMPO:CaO libre (días)	(%)	TIEMPO:CaO libre (días)	(%)
14	21.34	14	19.11	14	18.23
28	21.42	28	16.72	28	19.99
60	23.18	60	22.89	60	21.21
90	23.18	90	20.45	90	22.68

TABLA 4.37 EFECTO DEL TIPO DE CATION EN EL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRATACION.
 Cemento Portland Tipo I. Rel. cemento/arena = 1/3,
 Rel. agua/cemento = 0.5
 Patrón = 0.0% Cl⁻. Los cationes se introdujeron a una concentración de Cl⁻ del 3.0% (ver figura 4.37)

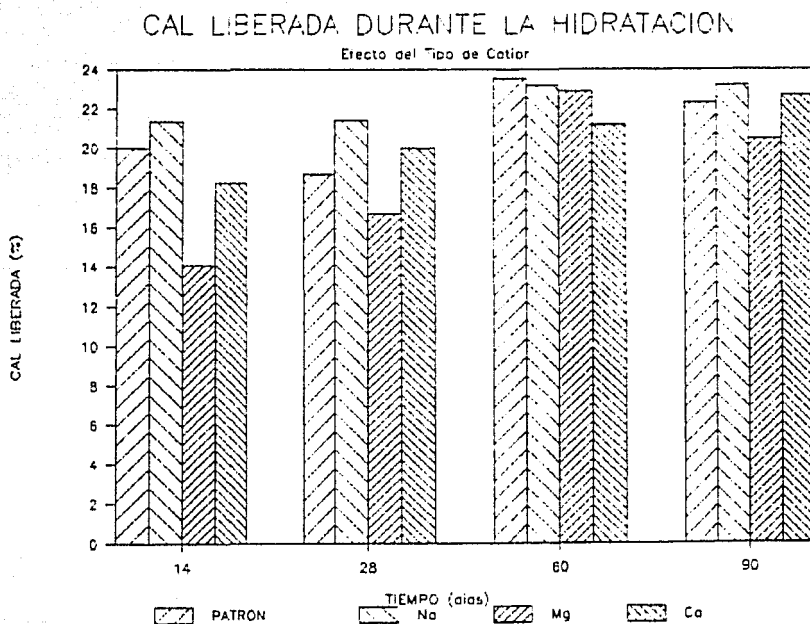


FIGURA 4.37

EFFECTO DEL ION NITRITO

3.0%Cl⁻ + 2.0% NO₂⁻

3.0%Cl⁻ + 3.0% NO₂⁻

TIEMPO:CaO libre (dias)	(%)
15	19.40
28	20.37
61	23.65
124	18.84

TIEMPO:CaO libre (dias)	(%)
15	18.86
28	17.35
61	23.73
124	18.54

TABLA 4.38 EFECTO DEL ION NITRITO EN EL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRATACION.
 Cemento Portland Tipo III. Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 Patrón = 0.0% Cl⁻. El ion nitrito se introdujo como NaNO₂ en presencia de una concentracion de Cl⁻ del 3.0% (ver figura 4.38)

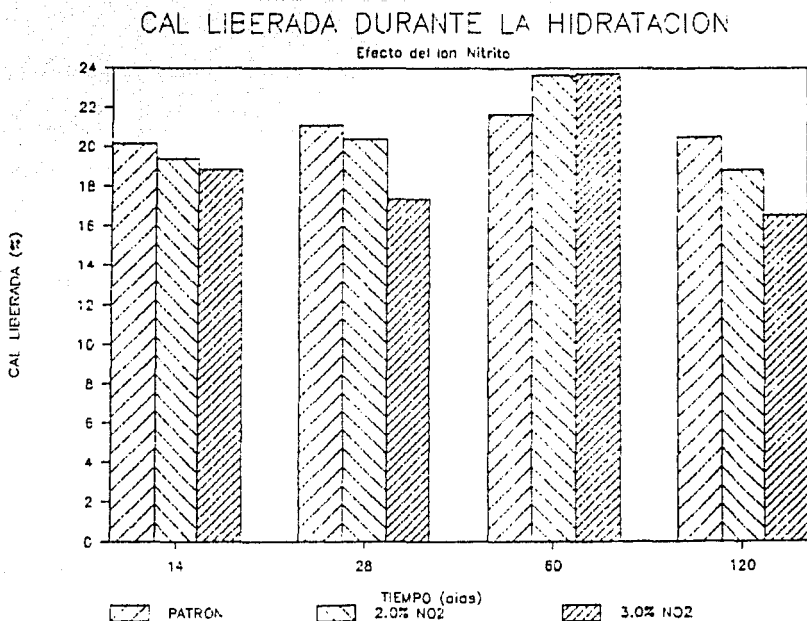


FIGURA 4.38

EFFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS

3.0%Cl⁻ + 0.1% Ligno

TIEMPO:CaO libre :	
(dias):	(%)
14	22.93
28	22.55
61	23.10
120	18.27

3.0%Cl⁻ + 1.0% Estea

TIEMPO:CaO libre :	
(dias):	(%)
14	19.66
28	24.02
61	25.28
123	*****

TABLA 4.39 EFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS EN EL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRATACION.
 Cemento Portland Tipo III. Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 Patrón = 0.0% Cl⁻. 1.0% de Lignosulfonato de calcio y 1.0% de estearato de calcio en presencia de una concentración de Cl⁻ del 3.0% (ver figura 4.39)

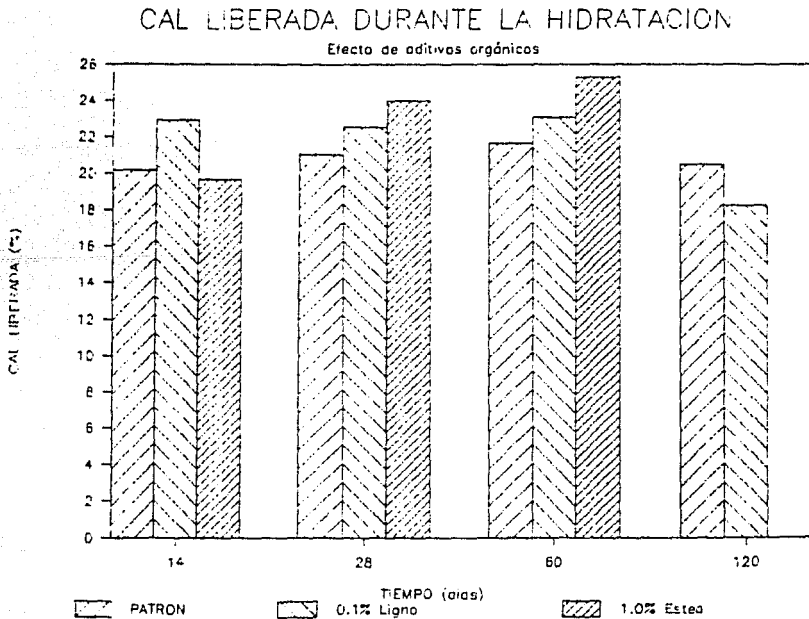


FIGURA 4.39

IV.3/ ENSAYO DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CEMENTO.

Estos resultados se presentan en forma numérica y gráfica y son los siguientes:

EFEECTO DEL TIPO DE CEMENTO (Rel. a/c=0.5)

C. Portland I			C. Pozzolánico			C. Portland III		
TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	1530	325	21	870	396	14	2630	226
29	890	297	28	2370	71	32	2405	247
64	2150	354	62	2225	219	60	2295	1054
90	1980	622	91	2238	124	120	2788	725

TABLA 4.40 EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
Cementos Portland I, Pozzolánico y Portland III
Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
(ver figura 4.40)

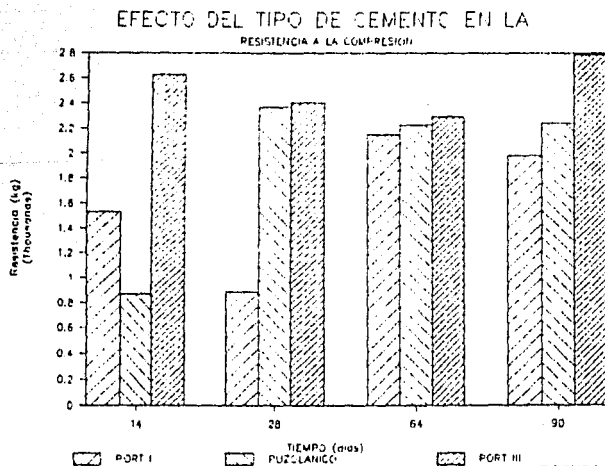


FIGURA 4.40

EFFECTO DE LA RELACION A/C (C. Portland Tipo I)

Relación a/c=0.4

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	1300	57
29	590	127
64	1180	57
90	1380	184

Relación a/c=0.5

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	1530	325
29	890	297
64	2150	354
90	1980	622

Relación a/c=0.6

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	1640	198
28	1085	92
63	2235	290
89	2140	283

Relación a/c=0.65

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	905	488
28	800	198
63	1715	262
89	1510	438

TABLA 4.41 EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
 Cemento Portland I, Rel. cemento/arena = 1/3,
 Rel. agua/cemento = 0.4, 0.5, 0.6 y 0.65
 (ver figura 4.41)

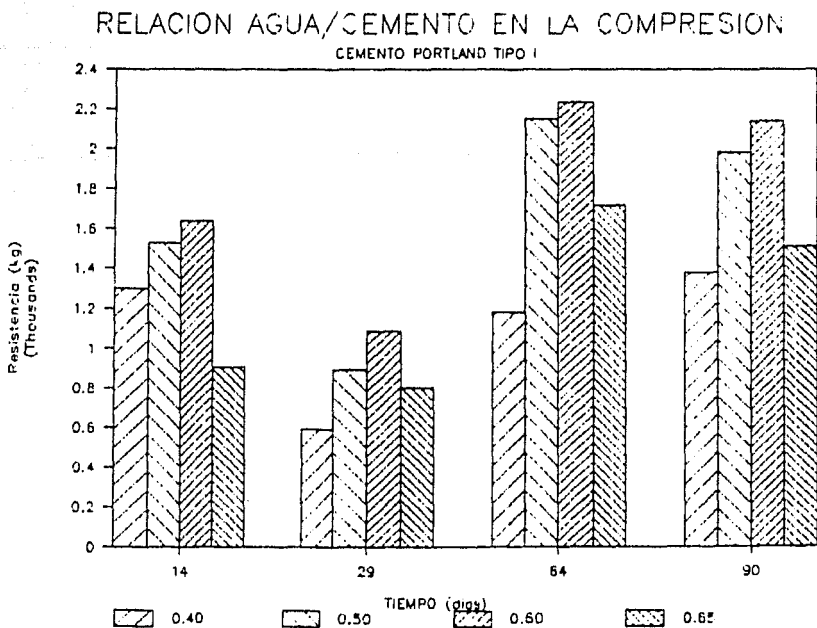


FIGURA 4.41

EFFECTO DEL ION CLORURO (C. Portland I, Rel a/c=0.5)

0.0% de Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	s
14	1530	325
29	890	297
64	2150	354
90	1980	622

0.25% de Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	s
14	1790	14
29	860	311
60	2020	566
88	1240	651

0.5% de Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	s
14	1525	361
29	1240	85
60	3195	78
88	2555	1209

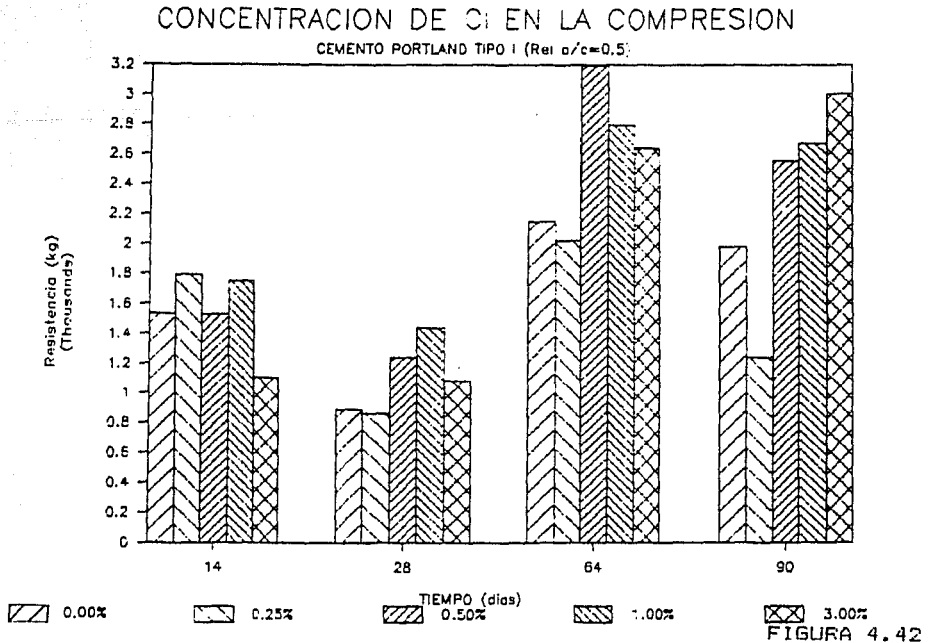
1.0% de Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	s
15	1750	636
28	1440	85
59	2795	247
90	2670	438

3.0% de Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	s
15	1100	0
28	1080	***
59	2640	113
90	3005	276

TABLA 4.42 EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE CLORUROS EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
 Cemento Portland I, Rel. cemento/arena = 1/3,
 Rel. agua/cemento = 0.5
 Concentración de Cl⁻ (como NaCl) = 0.00%, 0.25%,
 0.50%, 1.00% y 3.00% (ver figura 4.42)



EFFECTO DEL ION CLORURO (C. Pulolánico, Rel. a/c=0.5)

0.0% de Cl ⁻			0.25% de Cl ⁻			0.5% de Cl ⁻		
TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	σ	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	σ	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	σ
21	870	796	15	630	71	15	1075	163
28	2370	71	29	2600	28	28	2670	42
42	2225	219	61	3000	383	61	2795	177
91	2228	124	90	3100	71	90	2900	141

1.0% de Cl ⁻			3.0% de Cl ⁻		
TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	σ	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	σ
15	975	35	15	400	28
29	2185	262	29	2155	544
60	2660	85	60	2385	167
90	3015	167	90	2485	421

TABLA 4.43 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE CLORUROS EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
 Cemento Pulolánico, Rel. cemento/arena = 1/3,
 Rel. agua/cemento = 0.5
 Concentración de Cl⁻ (como NaCl) = 0.00%, 0.25%, 0.50%, 1.00% y 3.00% (ver figura 4.43)

CONCENTRACION DE Cl EN LA COMPRESION

CEMENTO PUZOLANICO (Rel. a/c=0.5)

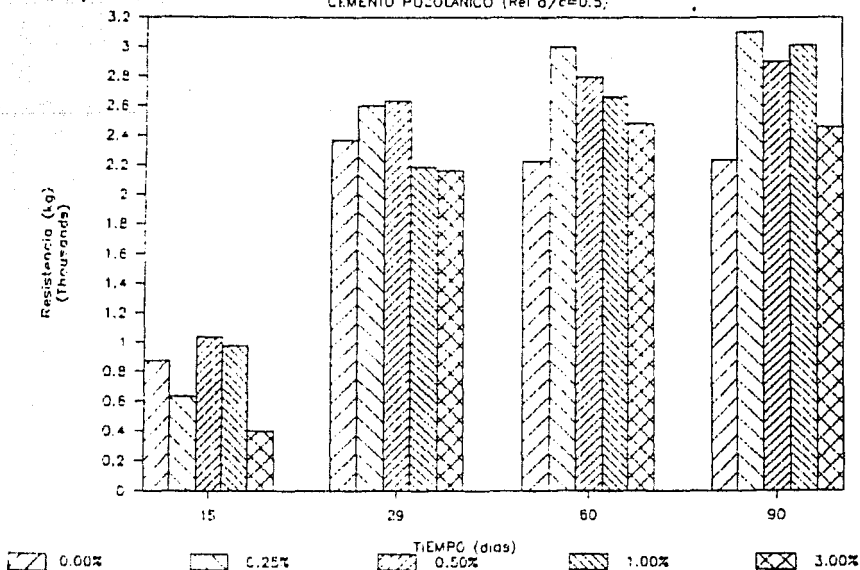


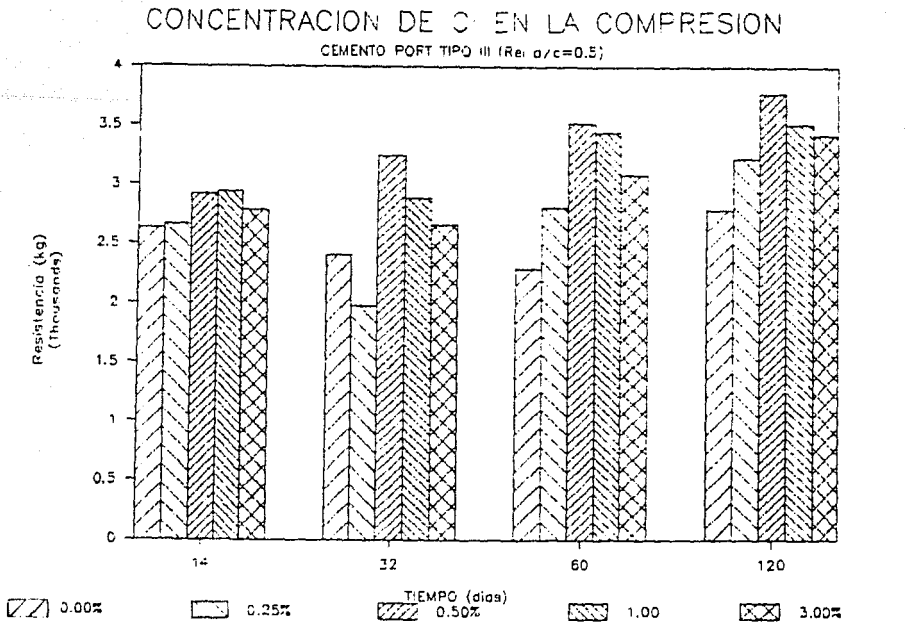
FIGURA 4.43

EFFECTO DEL ION CLORURO (C. Portland III, Rel a/c=0.5)

0.0% de Cl ⁻			0.25% de Cl ⁻			0.5% de Cl ⁻		
TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	2630	226	14	2665	49	15	2920	354
32	2405	247	32	1975	672	31	3245	134
60	2295	1054	60	2810	156	59	3520	***
120	2788	725	120	3225	177	121	3775	106

1.0% de Cl ⁻			3.0% de Cl ⁻		
TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s	TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
15	2940	339	14	2785	304
31	2885	134	30	2660	127
59	3445	558	58	3085	49
121	3515	371	120	3425	0

TABLA 4.44 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE CLORUROS EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION. Cemento Portland III, Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5. Concentración de Cl⁻ (comp NaCl) = 0.00%, 0.25%, 0.50%, 1.00% y 3.00% (ver figura 4.44)



EFECCIO DE TIPO DE CATION (C. Portland Tipo I)

0.0% Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	1530	325
28	890	297
54	2150	354
90	1980	622

3.0% Cl⁻ (NaCl)

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
15	1100	0
28	1080	44
54	2640	113
90	3005	275

3.0% Cl⁻ (MgCl₂)

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	1000	170
28	2060	395
50	1990	254
90	2060	225

3.0% Cl⁻ (CaCl₂)

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	1910	580
28	1600	21
50	2580	111
90	2650	110

TABLA 4.45 EFECTO DEL TIPO DE CATION EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
 Cemento Portland Tipo I. Rel. cemento/arena = 1/3, Rel. agua/cemento = 0.5
 Patrón = 0.0% Cl⁻. Los cationes se introdujeron a una concentración de Cl⁻ del 3.0% (ver figura 4.45)

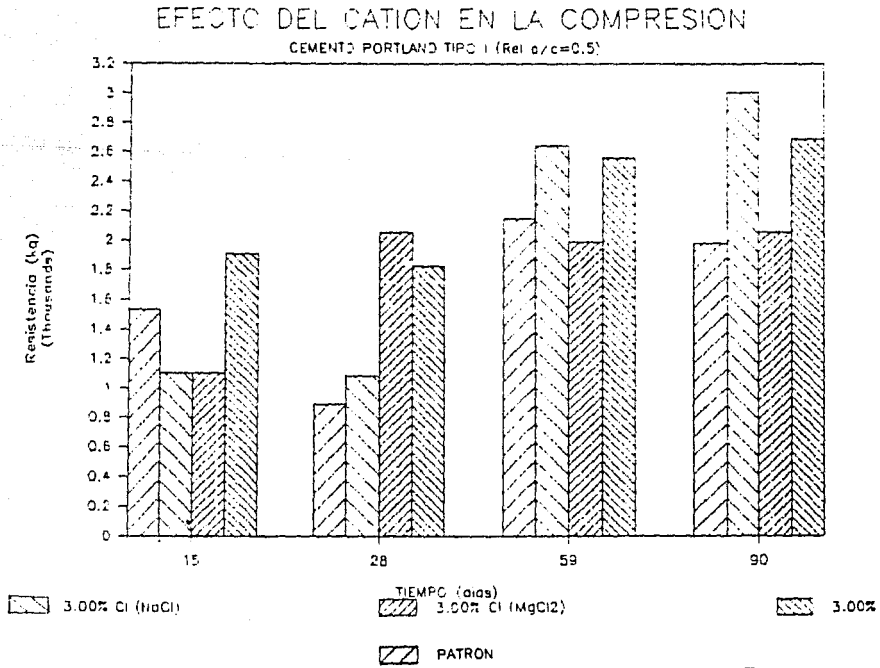


FIGURA 4.45

EFEECTO DEL ION NITRITO (C. Portland Tipo III)

0.0% Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	2630	226
32	2405	247
60	2295	1054
120	2788	725

3.0% Cl⁻ (NaCl)

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
14	2785	304
30	2660	127
58	3085	49
120	3425	0

3.0% Cl⁻ + 2.0% NO₂⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
15	1920	453
29	1550	396
61	2630	99
124	2863	57

3.0% Cl⁻ + 3.0% NO₂⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (kg)	s
15	1915	474
29	1725	613
51	2085	445
124	2838	18

TABLA 4.46 EFECTO DEL ION NITRITO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
 Cemento Portland Tipo III. Rel. cemento/arena = 1/3,
 Rel. agua/cemento = 0.5
 Patrón = 0.0% Cl⁻. El ion nitrato se introdujo como NaNO₂ en presencia de una concentración de Cl⁻ del 3.0% (ver figura 4.46)

EFEECTO DEL ION NITRITO EN LA COMPRESION

CEMENTO PORTLAND TIPO III (Rel a/c=0.5)

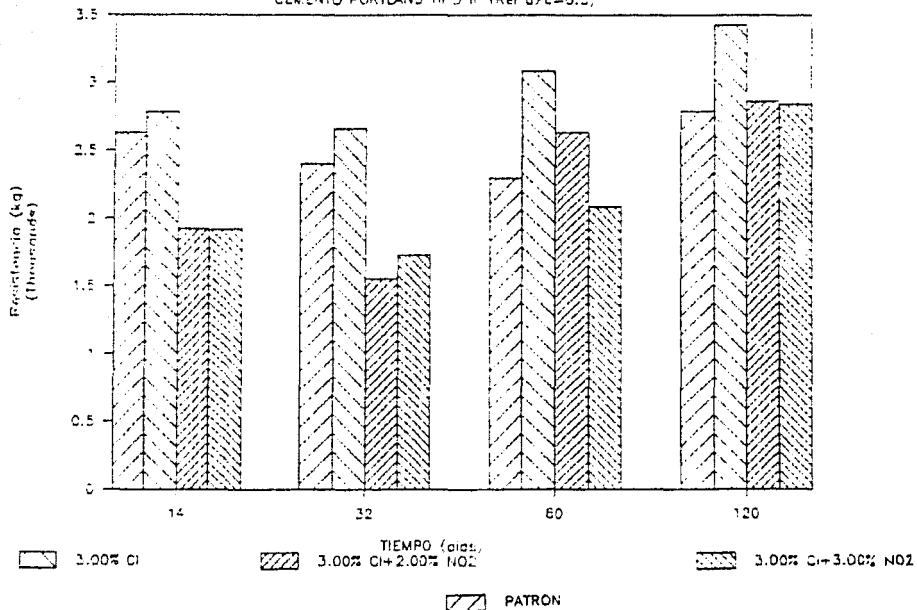


FIGURA 4.46

EFFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS (C. Portland Tipo III)

0.0% Cl⁻

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	2630	226
32	2405	247
60	2295	1054
120	2788	725

3.0% Cl⁻ (NaCl)

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	2785	304
30	2660	127
58	3085	49
120	3425	0

3.0% Cl⁻ + 1.0% ESTEA

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	2085	163
28	2265	49
61	3000	85
123	2900	566

3.0% Cl⁻ + 0.1% LIGNO

TIEMPO (días)	RESIST. (Kg)	+ s
14	1445	78
30	1135	191
61	1660	481
120	1538	124

TABLA 4.47 EFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION.
 Cemento Portland Tipo III. Rel. cemento/arena = 1/3,
 Rel. agua/cemento = 0.5
 Patrón = 0.0% Cl⁻. 1.0% de Lignosulfonato de calcio
 y 1.0% de estearato de calcio en presencia de una
 concentración de Cl⁻ del 3.0% (ver figura 4.47)

ADITIVOS ORGANICOS EN LA COMPRESION

CEMENTO PORTLAND TIPO III (Rel a/c=0.5)

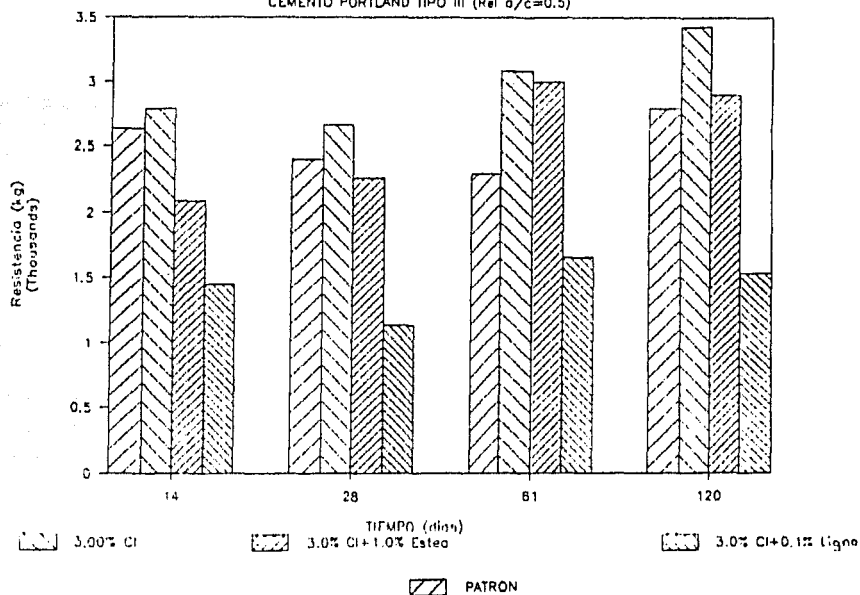


FIGURA 4.47

IV.4) ENSAYO DE DETERMINACION DE Cl^- SOLUBLES EN ACIDO Y Cl^- SOLUBLES EN AGUA.

Estos resultados se presentan en una s6la tabla que reúne los resultados obtenidos del % Cl^- solubles en ácido, Cl^- solubles en agua y la diferencia entre estos valores que es el % Cl^- que reaccionaron con los compuestos del cemento.

# Probeta	Tipo de cemento	Cl^- sol. en ácido (%)	Cl^- sol. en agua (%)	Cl^- ácido = Cl^- agua (%)
29	Porland III	1,07 ± 0,13	2,64 ± 0,06	0,56
25	Porland III	1,27 ± 0,07	2,70 ± 0,05	0,53
36	Porland I	2,93 ± 0,10	2,70 ± 0,06	0,16
23	Porland I	2,92 ± 0,05	1,64 ± 0,09	1,56
21	Porland I	2,92 ± 0,02	1,10 ± 0,00	1,62
16	Porland I	2,46 ± 0,08	2,52 ± 0,05	0,09
9	Porland I	0,87 ± 0,01	0,91 ± 0,00	0,06
8	Porland I	0,66 ± 0,06	0,39 ± 0,00	0,97
7	Porland I	0,22 ± 0,03	0,15 ± 0,00	0,09
1	Porland I	0*	0,01 ± 0,00	-0,01
18	Puzol6nico	2,66 ± 0,10	2,53 ± 0,05	0,11
17	Puzol6nico	0,89 ± 0,00	0,87 ± 0,01	0,02
16	Puzol6nico	0,63 ± 0,00	0,51 ± 0,09	0,02
15	Puzol6nico	0,22 ± 0,01	0,22 ± 0,00	0,00
2	Puzol6nico	0*	0,01 ± 0,00	-0,01

TABLA 4.48 DETERMINACION DE CLORUROS SOLUBLES EN ACIDO Y CLORUROS SOLUBLES EN AGUA.
Ensayo sobre mortero con relación agua/cemento = 1/3

IV.5) ENSAYO DE CORRELACION DE PERDIDAS DE PESO GRAVIMETRICAS Y ELECTROQUIMICAS.

Los resultados de correlación entre pérdidas de peso se presentar en forma tabulada y gráfica a continuación:

ENSAYOS DE CORRELACION DE PERDIDA DE PESO

Perdida de peso electroquímica (mg Fe)	Perdida de peso gravimétrica (mg Fe)
0.0303	0.0445
0.058	0.0292
0.0421	0.055
0.0508	0.047
0.2286	0.2658
0.2166	0.2552
0.261	0.2842
0.1048	0.0775
0.0552	0.0772
0.0417	0.0598
0.0448	0.0204

TAULA 4.49 Correlación de pérdidas de peso gravimétricas y electroquímicas (ver figura 4.49)

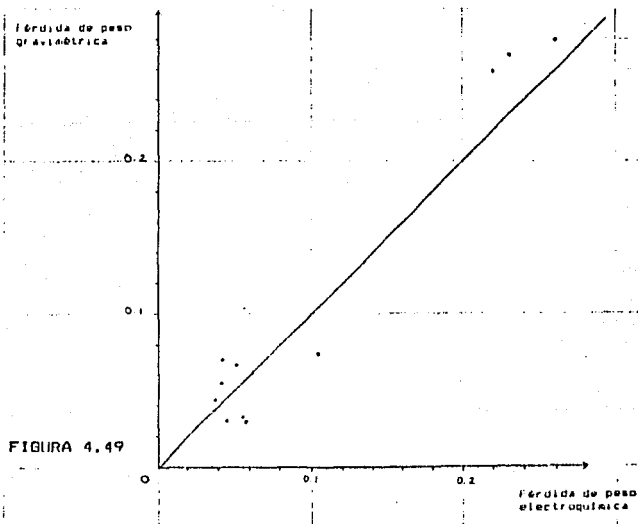


FIGURA 4.49

CAPITULO V

DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CAPITULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos y no electroquímicos realizados a cada muestra, con la idea de utilizarlos en forma conjunta para explicar la acción de cada uno de los factores investigados sobre el proceso de corrosión del refuerzo de acero embebido en concreto desde una óptica global de lo que sucede en el sistema acero/concreto/medio ambiente y no sólo en la interfase metal/concreto, ya que se piensa que el fenómeno de corrosión de los refuerzos metálicos en las estructuras de concreto debe contemplarse con esta visión global y reconocer que el concreto es finalmente un sistema químico en el que pueden llevarse a cabo reacciones químicas o fisicoquímicas con el medio ambiente o con los nuevos compuestos agregados como aditivos y que influyen en mayor o menor grado en lo que ocurre en la interfase metal/concreto. Pero antes de entrar de lleno a la discusión, es conveniente que recordemos el tipo de información proporcionada por cada técnica empleada.

Los ensayos electroquímicos consistieron en la medición continua de la velocidad de corrosión instantánea, el potencial de corrosión y la resistencia óhmica compensada electrónicamente por el potencióstato.

El seguimiento de velocidades de corrosión instantáneas por el método de Resistencia de Polarización (R_p) proporciona una información muy valiosa para seguir el comportamiento de la

corrosión del acero en el concreto en función del tiempo y no sólo como una estimación promedio de esta velocidad, lo cual es de suma importancia porque con la Resistencia de Polarización es posible seguir las tendencias y los cambios en la velocidad de corrosión bajo diferentes condiciones de experimentación.

En estudios realizados por otros investigadores en este campo (54), se considera que el rango entre 0.1 y $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, equivalente a 1.1 y $2.2 \mu\text{m}/\text{año}$ de penetración de ataque respectivamente, representa el límite entre la pasividad y el estado activo del sistema acero/concreto que se presenta por encima de estos valores.

Ese mismo criterio para diferenciar el estado activo y pasivo del acero embebido en concreto se utiliza en este trabajo.

La medición del potencial de corrosión en función del tiempo es importante, ya que esta técnica es muy versátil y ampliamente utilizada en el campo como indicador del estado superficial de un material metálico en un medio dado.

Es bien sabido que no se pueden hacer inferencias sobre la velocidad de corrosión de un material por el sólo hecho de medir su potencial de corrosión, pero es importante comparar las tendencias del potencial de corrosión (E_{corr}) y la velocidad de corrosión (V_{corr}) en diferentes condiciones y medios ambientes que simulen las condiciones reales del medio de servicio en que se encuentran las estructuras de concreto armado, para contar con criterios más sólidos acerca de los rangos de E_{corr} que permitan hacer estimaciones más precisas

acerca del estado de los refuerzos metálicos en las estructuras de concreto.

La resistencia óhmica compensada electrónicamente (RESISTENCIA COMP.), se incluye en los resultados, ya que la misma es una de las condiciones necesarias para la aplicación del método de Resistencia de Polarización y evaluar correctamente la velocidad de corrosión instantánea.

Además, ya que se compensa la caída de potencial por la resistencia del medio entre el electrodo de trabajo y el de referencia (que se colocó externamente sobre cada electrodo de la probeta), la resistencia compensada depende predominantemente del espesor del recubrimiento de mortero sobre las varillas, y como es el mismo en todos los casos por el diseño del molde, este valor depende primordialmente de la cantidad de iones y humedad presentes en la solución acuosa contenida en los poros de la masa de mortero y de la resistencia de los productos de hidratación del cemento y de los agregados.

Al registrar la variación de la resistencia óhmica compensada en función del tiempo, se obtiene información de la variación de la resistencia del concreto por la hidratación del cemento y de la influencia de las sustancias agregadas a éste, ó los cambios en el medio ambiente sobre la conductancia de éste.

Los ensayos no electroquímicos consistieron en la determinación de la cantidad de Ca(OH)_2 (expresado como CaO) liberado al hidratarse el cemento y la medición de la resistencia a la compresión desarrollada por las fases

hidratadas del cemento a los 14,28,60,90 y 120 días.

Asimismo, al término de los ensayos electroquímicos se fracturaron algunas de las probetas para determinar la cantidad de cloruros totales y cloruros solubles presentes en la masa de mortero, así como la pérdida de peso sufrida por algunas de las varillas durante el tiempo de duración de los ensayos.

La determinación del CaO liberado al hidratarse el cemento es una de las técnicas empleadas para estudiar la cinética de hidratación del cemento Portland y determinar la influencia de adiciones o aditivos en el mecanismo de hidratación del cemento.

El objetivo de este trabajo, no es el de estudiar la cinética de hidratación de los cementos, sino de obtener la información necesaria para hacer comparaciones entre el porcentaje de CaO liberado en presencia y ausencia de las sustancias elegidas para probar su influencia sobre la velocidad de corrosión y tener idea de su acción acelerante o retardante de las reacciones de hidratación del cemento. Y en el caso de los cementos sin aditivos, poder determinar la reserva alcalina de cada uno.

La prueba de resistencia a la compresión desarrollada por los cementos a los 28 días es un parámetro muy usado en la industria de la construcción para especificar la calidad de un concreto. Esta prueba proporciona muy poca información acerca de la durabilidad del concreto y mucho menos, de la influencia de los aditivos y los parámetros del diseño de la

mezcla sobre la velocidad de corrosión del refuerzo metálico. La idea de realizar este tipo de pruebas, fue primeramente para contar con información del efecto de los aditivos inhibidores de la corrosión sobre la resistencia a la compresión de los cementos de fabricación nacional, y por otra parte contar con pruebas fehacientes de interés para la industria de la construcción acerca de la necesidad de realizar también ensayos que sí proporcionen información sobre la velocidad de corrosión del refuerzo metálico, y que permitan clasificar y normalizar a los distintos cementos y aditivos para su uso en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de riesgo de corrosión.

La determinación de cloruros solubles en ácido (Cl^- totales) y cloruros solubles en agua (Cl^- libres), proporciona información valiosa acerca de la cantidad de cloruros que reaccionan con los compuestos del cemento. Esto es de suma importancia, ya que la cantidad de cloruros que reaccionan químicamente con el cemento, puede modificar el grado de protección conferido por los diferentes cementos al acero.

Por último, se realizaron determinaciones de las pérdidas de peso de algunas de la varillas embebidas en las probetas ensayadas, para correlacionarlas con las pérdidas de peso obtenidas electroquímicamente por medio de la integración del área bajo la curva de V_{corr} vs. tiempo y así ratificar la información de los resultados de velocidad de corrosión obtenidos electroquímicamente.

V.1) EFECTO DEL TIPO DE CEMENTO

La mayoría de los investigadores (55,56,57) que se dedican al estudio de la corrosión del refuerzo metálico en las estructuras de concreto están de acuerdo en que no todos los tipos de cemento confieren el mismo grado de protección al acero embebido en el concreto cuando existen condiciones de agresividad.

Es más, Andrade, C. y González J.A. (58), después de constatar que no todos los cementos confieren un mismo nivel de protección al acero, plantean la necesidad de la creación de índices que permitan clasificar los cementos y delimitar su campo de aplicación en función del grado de agresividad del ambiente.

Es en este contexto que resulta de gran importancia caracterizar el grado de protección al acero conferido por los diferentes tipos de cementos fabricados con materia prima nacional.

En las figuras 4.1,4.2 y 4.3 se observa que la velocidad de corrosión del acero en los tres cementos exhibe un periodo inicial que va de 1 a 3 días, donde la corrosión es elevada y luego decrece bruscamente hasta valores que rebasan el rango de 0.2 y 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y marcan los límites entre los estados activo y pasivo del acero.

Los resultados mostrados en las figuras 4.1,4.2 y 4.3 se presentan en forma conjunta en la figura 5.1, de donde se puede observar que en el periodo inicial de corrosión

elevada, ésta es mayor para el cemento puzolánico que para los cementos Portland tipos I y III.

En esta figura también se observa que para los tres tipos de cemento la tendencia del E corr es a elevarse rápidamente en los primeros días y luego tender a estabilizarse.

De las figuras 4.1 a 4.3 se obtuvo la siguiente información del E corr al interpolar los valores de la V corr al cruzar los límites de 0.2 y 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ hacia las gráficas correspondientes del E corr vs. tiempo:

TIPO DE CEMENTO	REBASA 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	E REBASO (mV vs ECS)	REBASA 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	E REBASO (mV vs ECS)
PORT I	SI	-140	SI	-220
PUZ	SI	-190	SI	-240
PORT III	SI	-160	SI	-210

TABLA 5.1 Potenciales de corrosión obtenidos al interpolar los valores de la velocidad de corrosión al cruzar los límites de 0.1 y 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para los tres tipos de cemento ensayados.

En las figuras 4.1 a 4.3 se observa que la tendencia de la resistencia óhmica compensada para los cementos Portland I y III es la de aumentar en los primeros días para estabilizarse después, en cambio para el cemento puzolánico, como puede verse en la figura 4.2, la tendencia es la de aumentar sin estabilizarse durante los 120 días de los ensayos.

El comportamiento de la velocidad de corrosión descrito para los tres cementos anteriormente, ha sido el mismo encontrado por otros

investigadores (58,59). Y este comportamiento es adjudicado a que en los primeros días del colado, el acero se corroe rápidamente por la presencia del agua de amasado y la baja resistencia presentada por el concreto.

Al transcurrir el tiempo, el valor del pH se incrementa como consecuencia de las reacciones de hidratación del cemento, por lo que la velocidad de corrosión disminuye gradualmente hasta lograrse la pasivación del acero, además de que la resistencia eléctrica del concreto va aumentando con el tiempo y dificultando la movilidad de los iones en la disolución acuosa contenida en los poros del concreto.

La pasivación del acero puede inferirse del aumento del E_{corr} al transcurrir el tiempo. Y el aumento de la resistencia eléctrica del concreto se observa en las gráficas de resistencia óhmica compensada de las figuras 4.1 a 4.3.

La mayor velocidad de corrosión exhibida por el cemento puzolánico en los primeros días después del colado, puede ser debida a que el $Ca(OH)_2$ es consumido por la puzolana para la formación de compuestos cementantes (60), y al hecho de que como es un cemento mezclado, contiene menor cantidad de $3CaO.SiO_2$ y $2CaO.SiO_2$, que son las fases que al hidratarse proporcionan el $Ca(OH)_2$. Esto puede observarse claramente en la figura 4.35, donde se muestra que el cemento puzolánico es el que menor cantidad de reserva alcalina posee y por lo tanto tarda más tiempo en pasivar al acero.

EN CONCLUSION, de los resultados obtenidos en este apartado puede decirse que en ausencia de iones agresivos, se logra con el tiempo la pasivación del acero embebido en concretos fabricados con cada uno de los 3 tipos de cementos mexicanos ensayados, y que no existe dependencia significativa en la pasivación respecto al tipo de cemento utilizado.

V.2) EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO

González J. A. y Andrade, C. (54) mencionan que la resistividad del concreto puede, bajo ciertas circunstancias, controlar el proceso de corrosión del acero. En ensayos realizados en probetas de mortero a diferentes condiciones de humedad relativa se ha reportado que:

- 1) La velocidad del proceso de corrosión de las estructuras de concreto con refuerzo de acero es controlada anódicamente por la pasivación del acero.
- 2) Cuando los cloruros o la carbonatación destruyen la pasividad, la resistividad del concreto es el paso que controla el proceso, y básicamente depende de la humedad y en menor medida de la presencia de cloruros y carbonatación.
- 3) Cuando la velocidad de corrosión es menor que la indicada para la resistividad del medio, indica la formación de capas protectoras de productos de corrosión.

Como vemos, es importante no sólo estudiar el efecto de la composición química de los cementos en el grado de protección conferido al acero, sino también la influencia que tienen los parámetros de diseño de la mezcla, como la relación agua/cemento, y las distintas condiciones del medio de servicio sobre la velocidad de corrosión del acero embebido en el concreto.

Así, los resultados mostrados en las figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se condensan en la figura 5.2, donde se observa que a H.R. = 100%, las tendencias en la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistencia óhmica compensada son similares a los obtenidos en la apartado anterior.

De la gráfica de V_{corr} en la misma figura 5.2, se puede notar que

la magnitud de la velocidad de corrosión es mayor para la relación $a/c = 0.65$ que para las demás relaciones ensayadas, teniendo todas ellas valores de V_{corr} muy semejantes.

De la gráfica de E_{corr} se observa que los valores de éste son similares para todas las relaciones a/c .

La gráfica de resistencia óhmica compensada muestra valores similares para las relaciones $a/c = 0.5, 0.6$ y 0.65 , siendo mayores los mostrados para la relación $a/c = 0.4$.

Cabe hacer notar de las figuras 4.4 a 4.7 que las relaciones $a/c = 0.4, 0.5$ y 0.6 rebasan el límite de pasivación de $0.2 \mu A/cm^2$, no así la relación 0.65 .

Pero el comportamiento anterior cambió radicalmente, cuando las mismas probetas, se sumergieron completamente en una solución al 3% de cloruros (como $NaCl$), después de recubrir el fondo y la parte superior con resina epoxi y silicón, ya que esta nueva situación se reflejó rápidamente en un aumento de la velocidad de corrosión y en una disminución del E_{corr} y la Resistencia compensada.

La gráfica de V_{corr} muestra que el aumento de la velocidad de corrosión en los días siguientes a la inmersión es mayor para la relación $a/c = 0.65$ que para la relación $a/c = 0.60$ y el menor aumento se da para la relación $a/c = 0.4$.

En esta gráfica también se observa que al finalizar el ensayo a los 278 días, las diferencias en la velocidad de corrosión tienden a igualarse.

De la gráfica de E corr, se observa una caída de los potenciales de corrosión para todas las relaciones a/c, siendo los valores más negativos para 0.6 y 0.65 que para 0.4. Al final de los 278 días se observaron valores muy similares del E corr para las tres relaciones a/c.

En la gráfica de resistencia compensada se nota una brusca caída en la resistencia del concreto para las tres relaciones ensayadas, siendo menor esta caída para la relación a/c = 0.4 que para las relaciones a/c = 0.6 y 0.65. Cabe hacer notar que los valores de las resistencias óhmicas compensadas obtenidas después de sumergir las probetas muestran poca variación.

Un proceso de corrosión puede estar limitado por control anódico, catódico o resistivo (6).

En el caso de la corrosión del acero en estructuras de concreto se ha reportado (54) que el control existente es anódico, por la pasivación del acero debida al alto pH que existe en la solución contenida en los poros del concreto, y en algunos casos el control de la corrosión es resistivo debido a la alta resistencia que ofrece el concreto al paso de la corriente de corrosión de las zonas anódicas a las catódicas.

Los resultados experimentales obtenidos (Figura 5.2) para las probetas con diferentes relaciones a/c mantenidas en H.R. = 100% no muestran una gran dependencia de la velocidad de corrosión con respecto a la relación a/c, excepto para la

relación a/c = 0.65 que muestra valores un poco mayores de velocidad de corrosión y menores de resistencia óhmica compensada.

Por otra parte, el hecho de que al sumergir las probetas en solución del 3% de cloruros, la velocidad de corrosión se incrementa rápidamente y se abata bruscamente la resistencia compensada, aundado a la imposibilidad de que el aumento de la velocidad de corrosión se deba a una ruptura inmediata de la capa pasiva del acero por los cloruros de la solución, y la evidente diferencia que existe entre los valores de V_{corr} para cada relación a/c empleada, hace pensar que cambios en la resistencia del concreto tienen influencia significativa sobre el proceso de corrosión y por lo tanto es prueba de la existencia de un control resistivo de la corrosión en las estructuras de concreto además del control anódico dado por la pasivación del acero debida al elevado pH del concreto.

Este comportamiento evidencia también la gran influencia de la porosidad dada por la relación a/c sobre el control resistivo del concreto sumergido en soluciones corrosivas, ya que como se observa en la Figura 5.2, la relación a/c está directamente relacionada con el incremento de la velocidad de corrosión y con el abatimiento de la Resistencia compensada del concreto durante los días siguientes a la inmersión.

Esto es, existe una relación directa entre la relación a/c y la V_{corr} e inversa con la resistencia óhmica compensada.

Esto puede explicarse por el hecho de que a mayor relación

a/c, existe más porosidad en la masa de concreto y por lo tanto mayor disponibilidad del medio corrosivo que implica una menor resistencia eléctrica del concreto.

Por otro lado, el hecho de que las velocidades y los potenciales de corrosión tiendan a igualarse en los últimos días del ensayo, no sucediendo lo mismo para la resistencia compensada, puede deberse a que en estas nuevas condiciones el proceso esté siendo controlado catódicamente porque ya existen condiciones de corrosión (Cl^- de la disolución) y el factor limitante sea ahora la solubilidad del O_2 en la disolución, siendo las V_{corr} y los E_{corr} muy similares para las 3 probetas por el hecho de estar COMPLETAMENTE sumergidas en la misma disolución.

COMO CONCLUSION de este apartado, puede decirse que el proceso de corrosión en las estructuras de concreto debe analizarse tomando en cuenta las variables introducidas por el diseño de la mezcla como son la porosidad, permeabilidad, relación a/c, etc., ya que estas no solamente afectan las características del concreto sino también influyen grandemente en el proceso de corrosión del acero, cuando se cambian las condiciones del medio de servicio. Esto es, para sistemas no sumergidos, el control de la corrosión es mixto, es decir, anódico y resistivo, mientras que para sistemas completamente sumergidos, el control es catódico debido a la solubilidad limitante del O_2 en la solución. Sin embargo, existen condiciones tales, como por ejemplo inmersiones parciales, en las cuales el control es resistivo,

y en donde los parámetros de diseño (relación a/c) influyen decisivamente en el proceso de corrosión.

La existencia de un control resistivo nos demuestra que los ensayos de corrosión del acero en concreto deben hacerse en sistemas lo más similares al concreto, como en este caso probetas de mortero, y no en soluciones saturadas de Ca(OH)_2 o soluciones acuosas en general, que pueden dar lugar a discordancias entre los resultados obtenidos.

V.3) EFECTO DEL ION CLORURO

Como se vio en el capítulo de generalidades al hablar de la acción del ión cloruro, éste es uno de los principales factores desencadenantes del proceso de corrosión en las estructuras de concreto, reportándose gran cantidad de trabajos sobre este tema en la literatura.

Aún cuando existen algunas sugerencias acerca de los límites tolerables de cloruros en el concreto, no es posible hablar de una concentración umbral límite de éstos para iniciar el proceso de corrosión, ya que su acción despasivante está relacionada con muchas variables del concreto, como el pH y la composición química del cemento principalmente.

Los resultados de las Tablas y Figuras 4.8 a 4.27 se encuentran condensados en las figuras 5.3 a 5.6, en donde se puede observar el efecto de las cinco concentraciones de cloruros ensayadas para los cementos Portland I, Puzolánico y Portland III a Rel. a/c = 0.5 y Portland I a Rel. a/c = 0.65.

Los resultados obtenidos muestran en general tendencias similares entre ellos. Así, las gráficas de velocidad de corrosión de las figuras 5.3 a 5.6 muestran la misma tendencia decreciente observada en los resultados anteriores, es decir, alta velocidad de corrosión en los primeros días y disminución de ésta con el tiempo para todas las concentraciones de cloruros probadas, excepto para el cemento Portland III con 3.0% de Cl^- .

Cabe mencionar que solamente las concentraciones de 0% y 0.25% de Cl^- toman valores menores que el límite de $0.2 \mu A/cm^2$ para todos los cementos con relación a/c = 0.5. Y para las concentraciones de 0.5% a 3.0% se mantiene una relación de velocidad de corrosión directamente proporcional al porcentaje de Cl^- . Es importante hacer notar que a la concentración del 3% de Cl^- , la V_{corr} de los tres cementos es marcadamente mayor que para el resto de las concentraciones ensayadas.

En las gráficas de E_{corr} de las mismas figuras, se observa que para las concentraciones de 0% a 0.5% de cloruros, la tendencia general del potencial de corrosión es de aumentar con el tiempo, y para 1.0% y 3.0% se observa una disminución del E_{corr} en los primeros días del ensayo, aumentando con el tiempo solamente para la concentración de 1.0% de Cl^- .

En todos los casos la relación del E_{corr} con el porcentaje de cloruros es inversamente proporcional.

De las figuras 4.8 a 4.27 se obtuvo la siguiente información del E_{corr} para los diferentes porcentajes de cloruros en los cementos ensayados:

Cl	Tipo de Cemento y Rel a/c	Rebasa $0.2 \mu A/cm^2$	E_{corr} de rebasa vs. límite $0.2 \mu A/cm^2$	Rebasa $0.2 \mu A/cm^2$	E_{corr} de rebasa vs. límite $0.2 \mu A/cm^2$	$E_{máximo}$ vs. límite $0.2 \mu A/cm^2$
0.0	PORT I (0.5)	SI	-140	SI	-220	-98
0.0	PORT I (0.65)	NO	-	-	-	-103
0.0	PORT III (0.5)	SI	-190	SI	-240	-133
0.0	PORT III (0.65)	SI	-160	SI	-210	-158
0.0	PORT I (0.5)	SI	-160	SI	-200	-79
0.0	PORT I (0.6)	SI	-100	SI	-200	-86
0.25	PORT I (0.5)	NO	-	SI	-220	-155
0.25	PORT I (0.65)	NO	-	NO	-	-207
0.25	P.C. (0.5)	NO	-	SI	-	-251
0.25	PORT III (0.5)	NO	-	SI	-275	-221
0.50	PORT I (0.5)	NO	-	NO	-	-240
0.50	PORT I (0.65)	NO	-	NO	-	-157
0.50	P.C. (0.5)	NO	-	NO	-	-303
0.50	PORT III (0.5)	NO	-	NO	-	-251
1.0	PORT I (0.5)	NO	-	NO	-	-330
1.0	PORT I (0.65)	NO	-	NO	-	-258
1.0	P.C. (0.5)	NO	-	NO	-	-343
1.0	PORT III (0.5)	NO	-	NO	-	-259
3.0	PORT I (0.5)	NO	-	NO	-	-494
3.0	PORT I (0.65)	NO	-	NO	-	-325
3.0	P.C. (0.5)	NO	-	NO	-	-372
3.0	PORT III (0.5)	NO	-	NO	-	-462

Tabla N° 52. E_{corr} obtenido al intercalar los valores de la V_{corr} al cruzar los límites de 0.1 y $0.2 \mu A/cm^2$ para la concentración de cloruros 0.01, 0.25%, 0.5, 1.0% y 3.0%. Cementos Portland I, Pozzolánico y Portland III. M.P. 1000.

En la tabla anterior se relacionan las velocidades de corrosión obtenidas, con el potencial de corrosión evaluado bajo diferentes concentraciones de cloruros.

Las gráficas de resistencia compensada de las mismas figuras 5.3 a 5.6 muestran que la tendencia es a aumentar con el tiempo para todas las concentraciones del ión cloruro. Pero la resistencia compensada guarda una relación inversamente proporcional con la concentración de cloruros. Es importante resaltar que para todos los cementos, los valores de resistencia compensada para 0.25, 0.50 y 1.0% de Cl^- tienen valores semejantes entre ellos, no así los valores de 0.0% y 3.0% de cloruros que muestran diferencias significativas respecto a los valores de resistencia compensada para 0.25, 0.5 y 1.0% de cloruros.

En las figuras 5.7 a 5.11 se hace una comparación del efecto de cada concentración de Cl^- ensayada para los tres tipos de cemento utilizados. Donde se observa que para la concentración de 0% y 0.25% de cloruros no existe dependencia de la velocidad de corrosión respecto al tipo de cemento, ya que como se muestra en la tabla 5.2, los tres tipos de cementos pasivan completamente al acero de refuerzo según los criterios mencionados.

Pero para las concentraciones de 0.5, 1.0% y 3.0% de Cl^- se observa que la velocidad de corrosión sí depende del tipo de cemento con el que se fabricó el mortero.

primera depende el contenido de reserva alcalina de los cementos hidratados y la posibilidad de que los cloruros presentes en el agua de amasado reaccionen con las fases ricas en aluminio del cemento. La finura está relacionada con la porosidad del concreto y por lo tanto con la resistividad del mismo, que como se ha visto en el apartado anterior es uno de los factores que controlan el proceso de corrosión del acero embebido en el concreto, por lo que se considerò importante realizar análisis de cloruros libres y cloruros totales en la masa de concreto para investigar si existia alguna relación entre la cantidad de cloruros que reaccionan con los tipos de cementos ensayados y el grado de protección conferido al acero. Estos resultados se muestran en la tabla 4.48 de donde se observa que el cemento Portland III es capaz de reaccionar hasta con un 0.46% de los Cl^- presentes en el agua de amasado, en comparación con alrededor del 0.1% de cloruros con que reaccionan el cemento Portland I y el puzolánico.

Esto puede explicar las menores velocidades de corrosión obtenidas para el cemento Portland III en comparación con los cementos Portland I y puzolánico para las concentraciones 0.5 y 1.0% de Cl^- , ya que una mayor parte de los cloruros presentes reaccionaron con el cemento Portland III y disminuyen la cantidad de Cl^- libres, que son los responsables de la ruptura de la pasividad del acero en el concreto.

Por otra parte, dado que las gráficas de Resistencia compensada de las figuras 5.7 a 5.11 muestran para todos los casos que la mayor resistencia compensada la presenta el cemento puzolánico y la menor el Portland I, puede explicar las mayores velocidades de corrosión observadas para el Portland I y el hecho de que el cemento puzolánico, aún siendo un cemento mezclado (con menor reserva alcalina que el Portland I y III. Ver figura 4.35), presente velocidades de corrosión menores que el cemento Portland I para todas las concentraciones ensayadas.

Lo anterior refuerza las observaciones acerca de la existencia del control resistivo del proceso de corrosión en las estructuras de concreto.

Finalmente, al analizar la tabla 5.2, en la que se relaciona la velocidad de corrosión con el potencial de corrosión para diferentes concentraciones de cloruros presentes en los tres tipos de cemento, es posible formar intervalos de E_{corr} que de alguna forma reflejen el estado en que se encuentra el refuerzo metálico en el concreto. Esos intervalos son los siguientes:

- 1) $E_{corr} > -190$ mV vs ECS, que agrupa las condiciones en que la velocidad de corrosión rebasa el límite de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y también el de $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. En este grupo de potenciales se considera que el acero se encuentra perfectamente pasivado.
- 2) -190 mV vs. ECS $> E_{corr} > -275$ mV vs. ECS, que agrupa las condiciones en que la velocidad de corrosión rebasa el límite de $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Ya que en este intervalo también se engloban condiciones que no rebasan este límite de V_{corr} , se considera que hay riesgo de corrosión.

3) $E_{corr} < -275 \text{ mV}$ vs ECS, como en este intervalo caen todas las condiciones que no rebasan ninguno de los límites de pasivación, se considera que existe franca corrosión del acero.

Estos rangos de potencial guardan cierta relación con los reportados por Grimaldi et al (61).

EN CONCLUSION, puede decirse que no existe dependencia significativa de la velocidad de corrosión con respecto al tipo de cemento utilizado hasta concentraciones del 0.25% de Cl^- . Pero si hay dependencia significativa cuando la concentración de Cl^- es mayor o igual a 0.5% de Cl^- .

Este comportamiento está fuertemente relacionado con la cantidad de Cl^- que reaccionan con el cemento y con la resistividad que ofrecen los diferentes tipos de cemento, como puede observarse en la figura 5.12.

Se observó que el cemento Portland III reacciona hasta con un 0.46% de Cl^- presentes en el agua de amasado, tal vez por la formación de la sal de Friedel, explicando así, las menores velocidades de corrosión obtenidas en este cemento.

Por otra parte, de los datos obtenidos en la tabla 5.2, puede decirse que no existe una relación directa entre el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión, como lo hacen notar otros autores (54). Pero en base a los resultados de este trabajo y solamente bajo las condiciones especificadas de realización de los ensayos, es posible hablar de rangos del E_{corr} , que dan una idea del estado de acero embebido en

morteros fabricados con cementos nacionales, y son los siguientes:

$E_{corr} > -190 \text{ mV vs ECS}$. Estado de completa pasividad del acero embebido en concreto.

$-190 \text{ mV vs ECS} > E_{corr} > -275 \text{ mV vs ECS}$. Riesgo de corrosión del acero embebido en concreto.

$E_{corr} < -275 \text{ mV vs ECS}$. Franca corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto. Pero no es posible diferenciar entre grados de corrosión del acero.

V.4) EFECTO DEL TIPO DE CATION

Se ha demostrado que el efecto de las sales de cloruros sobre la velocidad de corrosión del acero embebido en concretos fuertemente dependiente del tipo de catión, y se ha demostrado que el CaCl_2 tiene un efecto mucho más deletéreo que el NaCl o el KCl (62).

Este efecto se cree que sea debido a una combinación de importantes factores como: i) el contenido de Cl^- y el pH de la solución en los poros del concreto, los cuales controlan la agresividad de la solución dentro del concreto hacia el acero de refuerzo, ii) la porosidad y distribución del tamaño de los poros en la masa de concreto, que determinan la disponibilidad del medio corrosivo y iii) la resistividad de la masa de concreto, que determina la magnitud de la corriente de corrosión que fluye de las áreas anódicas a la catódicas (62).

Estos reportes son de gran interés, ya que representan una prueba más de que el proceso de corrosión en las estructuras de concreto está fuertemente influenciado por las características mismas del concreto como sistema fisicoquímico, y por lo tanto el estudio de la corrosión del acero en el concreto debe contemplar al concreto como un sistema químico activo y no sólo como un espectador pasivo de lo que sucede con el acero en su seno, ya que al sufrir el concreto cambios en su estructura o reacciones de deterioro en sí mismo, esto influye también sobre el proceso que se desarrolla en la interfase metal/concreto.

Es en este sentido de la relación entre la química del cemento y el proceso de corrosión, hacia donde apunta este estudio en particular, al estudiar la influencia del tipo de catión que acompaña al anión Cl^- sobre el proceso de corrosión del acero embebido en el concreto.

Los resultados obtenidos de las figuras 4.28 a 4.30 se reúnen en la figura 5.13, donde se puede observar de la gráfica de V_{corr} , que las velocidades de corrosión conservan la tendencia a disminuir con el tiempo observada en las gráficas anteriores.

También se observa con claridad que la velocidad de corrosión es significativamente mayor para el CaCl_2 que para el MgCl_2 y el NaCl .

De la gráfica de E_{corr} se observa que la tendencia de los potenciales de corrosión para MgCl_2 y CaCl_2 es a aumentar a partir del valor inicial, no siendo así para el NaCl que muestra una disminución inicial del potencial de corrosión hasta el octavo día de mediciones, para después mostrar una tendencia a aumentar gradualmente con el tiempo.

Es importante notar que los valores del potencial de corrosión son más negativos en el siguiente orden $\text{NaCl} >> \text{CaCl}_2 > \text{MgCl}_2$.

La gráfica de resistencia óhmica compensada muestra que la tendencia en todas las probetas es la de aumentar con el tiempo y que los valores de resistencia compensada son siempre mayores para NaCl en comparación con los valores

para CaCl_2 y NaCl que además son muy semejantes entre sí.

Las mayores velocidades de corrosión para el CaCl_2 que para el NaCl obtenidos experimentalmente, concuerdan con los reportados por Andrade, C. y Page, C.L. (63) y por Hansson C.M. et al (62).

Ambos grupos de investigadores han estudiado también los cambios que ocurren en la solución contenida en los poros del concreto, obteniendo muestras de esta solución al aplicar altas presiones (arriba de 350 MPa) sobre el material.

Hansson reporta que el CaCl_2 disminuye la concentración de OH^- en comparación con la cantidad de OH^- presentes en la disolución de una muestra sin cloruros, y que la cantidad de Cl^- presentes en la disolución en los poros era considerablemente menor para CaCl_2 que para NaCl .

El hecho que la concentración de OH^- disminuya al agregar CaCl_2 , hace pensar que la solución dentro del concreto contenga mayoritariamente NaOH y KOH en comparación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (29), ya que al agregar CaCl_2 , el Ca^{2+} precipita como $\text{Ca}(\text{OH})_2$, removiendo los iones OH^- de la disolución y no pudiendo regenerarse estos a la solución porque el NaOH y el KOH no establecen equilibrios de precipitación como el del $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^-$.

El marcado efecto del CaCl_2 sobre la disminución de la concentración de los Cl^- presentes en la disolución, puede ser

explicado por el hecho de que el CaCl_2 aumenta la formación de la sal de Friedel, además de que se han reportado evidencias de que el CaCl_2 puede combinarse con la gel de tobermorita por intermedio de un complejo quimisorbido, mientras que para el NaCl esta posibilidad es despreciable (63).

Así, la posibilidad de que el NaCl pueda formar la sal de Friedel o reaccionar con la gel de tobermorita, está limitada por la reacción de intercambio iónico entre el NaCl y el Ca(OH)_2 en solución para posteriormente producir CaCl_2 como lo reporta Ben Yair (64), y después reaccionar con el $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ y $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ anhidros, ya que existen reportes (65) de que los compuestos hidratados del cemento ya no reaccionan con los cloruros. Esto puede explicar la menor concentración de Cl^- en la disolución de los poros del concreto para el CaCl_2 , ya que éste reacciona directamente con el cemento, y no es el caso del NaCl que debe hacerlo por medio de una reacción de intercambio, para luego reaccionar solamente con los compuestos anhidros del cemento. De este modo se puede explicar una mayor concentración de Cl^- en la disolución cuando se agrega NaCl .

Así, el efecto conjunto del CaCl_2 al disminuir tanto el pH como la concentración de Cl^- , es tender a balancear al relación Cl^-/OH^- y hacerse muy similar a la determinada para especímenes conteniendo NaCl (63). Por lo que la diferencia entre velocidades de corrosión no puede explicarse solamente por este motivo.

Otro de los factores que pueden influir sobre la velocidad de corrosión es el tamaño y distribución de los poros, ya que es bien conocido que cuando los Cl^- penetran en el concreto, el Ca(OH)_2 difunde hacia el exterior, haciendo al concreto más poroso y aumentando la cantidad de poros capilares (66).

Pero también se sabe (66) que la difusión del Ca(OH)_2 hacia el exterior es mayor en presencia de NaCl que para CaCl_2 , por lo que este factor no puede explicar la alta velocidad de corrosión del CaCl_2 en comparación del NaCl , como lo hace notar Hansson (67).

Por otra parte, Hansson et al, después de analizar la composición de la solución en los poros del concreto, la porosidad y distribución del tamaño de los poros y la resistividad del concreto, concluye que ni la porosidad total, ni la concentración de OH^- y Cl^- en la disolución del concreto pueden ser los factores que controlan la velocidad de corrosión, y que las diferentes velocidades de corrosión mostradas por el NaCl y CaCl_2 deben ser debidas a diferencias en la resistividad del concreto, la cual es una función compleja de la estructura y composición del cemento hidratado (62).

Por su parte, Andrade, C. y Page, C.L. (63), concluyen que si bien hay cambios en la composición de la solución de los poros del concreto cuando se agrega CaCl_2 o NaCl , conforme la hidratación del cemento progresa, la composición de la

solución en los poros tiende a volverse menos agresiva, la relación Cl^-/OH^- disminuye con el tiempo y la velocidad de corrosión declina.

También mencionan que las velocidades de corrosión más elevadas que presenta el $CaCl_2$ en comparación con el $NaCl$, resulta de diferencias de los efectos de las dos sales en los primeros instantes de la hidratación, que influyen sobre el grado de rompimiento de la capa pasiva durante la primera semana del curado.

De los resultados obtenidos al introducir una concentración de 1% de Cl^- en forma de $NaCl$, $MgCl_2$ y $CaCl_2$ como se muestra en la figura 5.13, se observa que los resultados de velocidad de corrosión del $NaCl$ y $CaCl_2$ concuerdan con los resultados de Hansson y Andrade en el sentido de que la velocidad de corrosión es significativamente mayor para $CaCl_2$ que para $NaCl$.

Por otro lado, es de extrañar que la velocidad de corrosión del $MgCl_2$ sea relativamente igual a la del $NaCl$ y no mayor que la del $CaCl_2$, ya que si la disminución de OH^- de la disolución cuando se agrega $CaCl_2$ es debida a la precipitación del $Ca(OH)_2$, se pensaría que esta disminución del pH fuera mayor al agregar $MgCl_2$ ya que el pK_a $Mg(OH)_2 = 11.1$ \gg pK_a $Ca(OH)_2 = 5.3$.

Así, de los datos de la tabla 4.48 que reportan la cantidad de cloruros que reaccionaron con las fases del cemento, se ve que la cantidad de cloruros agregados como $MgCl_2$ que reaccionaron con el cemento es muy elevada (1.44%) en

comparación con los cloruros agregados como CaCl_2 (0.14%) o NaCl (~0). Esto puede explicar las menores velocidades de corrosión obtenidas para el MgCl_2 en comparación con el CaCl_2 , ya que dada la baja solubilidad del $\text{Mg}(\text{OH})_2$, es de esperarse una marcada disminución del pH en la solución, mayor que la obtenida cuando se agrega CaCl_2 .

Por otro lado, se determinó que el MgCl_2 es capaz de reaccionar en mayor cantidad con las fases del cemento que el CaCl_2 o el NaCl , lo cual hace pensar en la posibilidad de que la relación Cl^-/OH^- se balanceó hasta valores no tan agresivos para el acero embebido en el concreto.

Por otra parte, la gráfica de la resistencia compensada de la figura 5.13 muestra que la resistencia compensada es mayor para MgCl_2 que para NaCl o CaCl_2 . Esto está de acuerdo con la menor velocidad de corrosión obtenida con el MgCl_2 , pero no con las diferencias significativas en las velocidades de corrosión entre NaCl y CaCl_2 , lo que está en contradicción con Hanson et al (62).

Finalmente, de la gráfica de E_{corr} se observa que la tendencia del potencial de corrosión para CaCl_2 y MgCl_2 es a aumentar con el tiempo, siendo los valores de potencial de corrosión similares entre sí.

Para el NaCl en cambio, el E_{corr} tiende a bajar en los primeros ocho días del ensayo, para después aumentar gradualmente como se observó en los ensayos anteriores a concentración del 3% de cloruros.

Como el F_{corr} depende del estado de la interfase en un medio dado, la diferencia en el comportamiento del F_{corr} para $NaCl$ y los cloruros de Ca^{++} , Mg^{++} , hace pensar que el tipo de catión tiene influencia sobre el estado de pasividad del acero embebido en el concreto para una misma concentración de cloruros durante los primeros días después del colado, tal y como lo propone Andrade, Page (63).

EN CONCLUSION, puede decirse que la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto amasado con cloruros, es fuertemente dependiente del tipo de catión que lo acompaña, esto se debe a diferentes tipos de interacciones químicas, fisicoquímicas todavía no bien aclaradas, entre los cationes, el ión cloruro y el concreto.

V.5/ EFECTO DE ADITIVOS

V.5.1/ EFECTO INHIBIDOR DEL ION NITRITO

Para evitar el deterioro del concreto por la corrosión del refuerzo de acero, existen varios métodos de protección de éste como la protección catódica, resinas epóxicas, recubrimientos metálicos y aditivos inhibidores, pero ninguno de ellos está sancionado por una larga práctica ni son aplicables a todas las circunstancias y medios ambientes.

Los aditivos inhibidores tienen la ventaja relativa de su fácil utilización, ya que son simplemente añadidos en el agua de amasado, pero su efectividad contra el ataque provocado por los cloruros y la carbonatación se ha publicado con resultados contrapuestos (6,67)

Los nitritos son los inhibidores más estudiados porque no alteran significativamente las propiedades físicoquímicas del concreto (resistencia mecánica, tiempo de fraguado, etc.) (67).

Los principales interrogantes en relación a su empleo en el concreto son: el mecanismo de pasivación, la proporción $\text{Cl}^-/\text{NO}_2^-$ más idónea, la duración de su efectividad en el tiempo y su poder inhibidor en caso de carbonatación.

Uno de los puntos de mayor controversia en el uso de los nitritos en el concreto es la duración de su acción inhibidora, ya que algunos investigadores piensan que puede oxidarse a NO_3^- dentro del concreto, perdiendo por

consiguiente su acción inhibidora, pero otros autores (68) reportan que en medios acuosos alcalinos, el nitrito es capaz de oxidar los iones Fe^{2+} a Fe_2O_3 transformándose a NO_2^- y explicando de esta manera la capacidad de repasar al acero cuando los iones cloruro provocan la disolución de la capa pasiva que protege al acero.

Andrade, C. et al (67), sugiere una relación $Cl^- / NO_2^- > 1/1.5$ para conseguir una segura y completa inhibición de la corrosión del acero en el concreto, y mencionan que aún adicionando cantidades insuficientes de nitritos, nunca se han provocado mayores ataques al acero, sino que siempre han reducido la intensidad de éste, y que los nitritos son también efectivos en concreto carbonatado, donde al menos siempre reducen el ataque cuando no lo inhiben por completo.

Respecto a la efectividad de su poder inhibidor con el tiempo, no existen muchos estudios, pero Andrade et al (67) reportan que vigas pretensadas amasadas con 2.0% de $CaCl_2$ y 3% de $NaNO_2$ expuestas a la interperie durante 12 años, al momento de fracturarlas presentaron sólo algunas zonas con ligera corrosión superficial, en comparación con otras que contenían solamente $CaCl_2$ y desde los cinco meses estaban muy corroídas.

Ya que el efecto de los nitritos como aditivos inhibidores de la corrosión se ha publicado con resultados contrapuestos, en que los americanos mencionan que no son eficaces y en Europa

menciona que funcionan bastante bien (6), era importante estudiar su efecto inhibitor en la corrosión del acero embebido en cementos de fabricación nacional para tener un primer reporte sistematizado de su comportamiento y posible uso en nuestro país.

De la figura 4.31 (3% Cl^- y 2% NO_2^-) se observa que la tendencia de la velocidad de corrosión es de aumentar, durante todo el tiempo de los ensayos. La tendencia del E_{corr} es la de disminuir con el tiempo y la resistencia compensada aumenta gradualmente.

En la figura 4.32 (3% Cl^- y 3% NO_2^-) se muestra que en los dos primeros días del ensayo, la velocidad de corrosión es baja, y que al transcurrir el tiempo ésta se vuelve inestable, si bien en los últimos días del ensayo se nota una tendencia a disminuir.

La tendencia del E_{corr} es a disminuir, pero hacia los días finales del ensayo se observa un aumento de éste.

La tendencia de la resistencia compensada es la de aumentar en los primeros días y estabilizarse después, pero se observa un aumento en los últimos días del ensayo.

En la gráfica 5.14 se muestra el efecto de las dos concentraciones del ión nitrito en presencia de una misma concentración de cloruros. Y se puede observar una reducción significativa de la V_{corr} para las dos concentraciones de nitritos utilizadas, en comparación con el patrón de 3% de Cl^- solamente.

De estos resultados se observa que el ión nitrito en las concentraciones ensayadas, es capaz de reducir la velocidad de corrosión hasta un 66%, para las condiciones más corrosivas encontradas en los ensayos con cloruros (3% Cl⁻, cemento Portland III).

También es importante señalar que en las pruebas de compresión realizadas utilizando este aditivo en las dos concentraciones mencionadas y 3% de Cl⁻ en morteros fabricados con cemento Portland III (figura 4.46), se observa una disminución de la resistencia mecánica a tiempos cortos, 14 y 32 días, pero a largos tiempos, 60 y 120 días, ésta aumenta hasta igualar los valores de resistencia mostrados por el cemento Portland III mezclado con agua bidestilada.

EN CONCLUSION puede decirse que en base a los resultados experimentales obtenidos en este apartado, el nitrito mostró ser un inhibidor de la corrosión del refuerzo de acero embebido en el concreto, cuando se agregó como NaNO₂ junto con NaCl en el agua de amasado del concreto, para relaciones Cl⁻/NO₂⁻ = 1.5/1 y 1/1 en porcentaje referido al peso de cemento.

Además, el nitrito mostró un abatimiento de la resistencia a la compresión en tiempos cortos, pero no a tiempos largos.

También es necesario realizar un mayor número de estudios para contar con información acerca de la óptima relación Cl⁻/NO₂⁻ para su uso en cementos de fabricación nacional, así

como de su capacidad inhibidora en ensayos de campo en tiempos largos.

Resulta necesario hacer más estudios acerca del efecto de las concentraciones sobre el potencial de corrosión del acero embebido en concreto, para encontrar relaciones que de alguna manera informen sobre el estado del acero en estructuras de concreto con nitritos, sobre todo para estudios en campo, donde es más fácil medir un potencial de corrosión que estimar una velocidad de corrosión; porque como se observa en la figura 5.14, la tendencia del potencial de corrosión en presencia de Cl^- y NO_2^- es a disminuir, y no a aumentar con el tiempo como es la tendencia en los ensayos anteriores.

V.5.2/ EFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS

Tradicionalmente el cemento Portland se fabrica utilizando exclusivamente arcillas, calizas y un poco de yeso, que al mezclarse con áridos y agua se obtiene una piedra artificial llamada concreto.

Pero desde hace varios años se han utilizado otros materiales conjuntamente con los anteriores, como puzolanas, cenizas volantes, escorias de alto horno, etc.; los cuales son sub-productos de otros procesos industriales y que se fueron incorporando en la fabricación del cemento.

Además, en el transcurso de este siglo, dada la necesidad de fabricar concreto para fines especializados y por los requerimientos de los diseños estructurales actuales, hoy en día es muy común el empleo de aditivos que son generalmente agregados al cemento en pequeñas cantidades a la hora del mezclado del concreto.

Lo anterior ha contribuido de alguna forma al progreso de la industria de la construcción, pero también ha posibilitado el incremento del riesgo de corrosión del refuerzo metálico; ya que si bien estas nuevas sustancias involucradas en la fabricación del cemento y concreto, son rigurosamente ensavadas en cuanto a las características que tradicionalmente se investigan en el concreto (fraguado, resistencia a la compresión, finura, etc.), se ha dejado un poco aparte el estudio del efecto que pudieran tener sobre la química del cemento, y mucho más lejos aún la influencia de estos aditivos sobre el proceso de corrosión del refuerzo

metálico embebido en concreto.

La idea de seguir el efecto de estos dos aditivos sobre la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto, fue la de investigar si estas sustancias ya empleadas en la industria de la construcción pudieran tener además de su efecto específico sobre la masa de concreto, algún efecto inhibitor, directo o indirecto de la corrosión del refuerzo.

Esto surgió de la limitación que tienen los inhibidores tradicionales para el acero de no alterar las propiedades fisicoquímicas del cemento para poder ser usados en estructuras de concreto.

Así surgió la idea de caracterizar primero las sustancias que se usan en el concreto y que por lo tanto no alteran negativamente las propiedades de éste, y probar aquellas sustancias que mejoran las características del concreto directamente relacionadas con la corrosión (como en este caso, la disminución de la permeabilidad y la relación a/c).

En este sentido se estudió el efecto que como inhibidor de la corrosión pudiera tener un aditivo fluidificante (lignosulfonato de calcio), es decir que tiene un efecto surfactante sobre las partículas de cemento, haciéndolo más fluido sin necesidad de agregar cantidades extras de agua, por lo que la relación a/c necesaria para fabricar un buen concreto disminuye, y esto influye directamente sobre la porosidad. Además, su misma estructura molecular (polímero

sulfonado de lignina) hizo pensar en la posibilidad de presentar comportamiento de inhibidor por bloqueo físico.

El otro aditivo utilizado fue un impermeabilizante (estearato de calcio), es decir, forma una película hidrófoba en la superficie de los poros capilares del concreto y por lo tanto disminuye la permeabilidad.

Los dos aditivos se agregaron a la masa de concreto durante el mezclado y en presencia de la misma concentración de cloruros.

De los resultados obtenidos de las figuras 4.33 y 4.34 se puede observar que la tendencia de la velocidad de corrosión para los dos casos es a mantenerse relativamente estable durante los primeros treinta días del ensayo, para después mostrar una significativa tendencia a aumentar.

En las mismas figuras se observa que los potenciales de corrosión reflejan los cambios en la velocidad de corrosión, ya que al aumentar ésta, los valores del E_{corr} disminuyen para los dos aditivos.

Los valores de resistencia compensada para los dos aditivos empleados muestran una tendencia a aumentar continuamente durante los 122 días del ensayo.

La figura 5.15 muestra los resultados electroquímicos obtenidos para los dos aditivos ensayados en presencia de una misma cantidad de cloruros, comparados con una probeta patrón

que solamente contenía cloruros. Donde se puede observar que el lignosulfonato de calcio a la concentración ensayada, bajo las condiciones de experimentación (Rel a/c = 0.5, CI⁻ = 3% y H.R. = 100%) no disminuye la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto, es más, en los días finales del ensayo se nota claramente una aceleración significativa del proceso de corrosión.

Por otra parte, el estearato de calcio muestra una disminución de la velocidad de corrosión, pero este efecto es temporal, ya que a partir del día 42, la velocidad de corrosión aumenta gradualmente hasta igualar la del patrón hacia los últimos días del ensayo.

El hecho de que el lignosulfonato de calcio no reduce la V_{corr} del acero, demuestra que no es un inhibidor directo de la corrosión y que llega a ser un acelerante de ésta como se observa del aumento significativo de la velocidad de corrosión en los últimos días del ensayo.

Es recomendable realizar otros estudios del efecto de este aditivo a diferentes relaciones a/c menores a 0.5, para observar el efecto de la disminución en la relación a/c y la porosidad total en el concreto sobre la velocidad de corrosión del refuerzo metálico.

Además de que las pruebas de compresión del cemento (figura 4.47), muestran que la relación a/c = 0.5 ensayada, no es la óptima porque abate fuertemente la resistencia del concreto y por lo tanto, los ensayos con este aditivo deben realizarse a relaciones a/c < 0.5, en que tal vez se observe algún efecto

inhibidor indirecto, ya que disminuiría la porosidad y por lo tanto se daría la posibilidad de una competencia entre su efecto como acelerante del proceso de corrosión, la protección contra el medio ambiente conferida por la mayor compactación del concreto.

Para el caso del estearato de calcio se observa una reducción de la V corr durante los primeros días del ensayo, pero a tiempos mayores, ésta tiende a elevarse a los mismos valores que el patrón que sólo contenía cloruros.

Este comportamiento del estearato de calcio sobre la disminución de la V corr puede explicarse como una inhibición indirecta del proceso de corrosión, ya que se ha reportado que el ácido esteárico (90) no tiene efecto alguno en la inhibición de la corrosión del acero, y por lo tanto la disminución de la V corr observada debe ser consecuencia del efecto del estearato sobre el concreto. Y posiblemente sea debida a la capacidad de impermeabilizar al concreto, que lo hace más repelente al agua por formarle una capa porosa sobre su superficie, con lo que disminuye la cantidad de agua y oxígeno que puede llegar a la interfase metal/concreto, pero con el tiempo este poder impermeabilizante declina, como se puede observar del aumento de la velocidad de corrosión hasta valores que igualan al patrón que no tiene aditivo orgánico alguno.

EN CONCLUSION puede decirse que los dos aditivos orgánicos ensayados, no sólo afectan las propiedades fisicoquímicas del concreto, sino también manifiestan su acción sobre la velocidad de corrosión del acero, incrementando ésta a los días finales del ensayo en el caso del lignosulfonato de calcio y abatiéndola temporalmente para el caso del estearato de calcio.

Por lo anterior es muy necesario hacer un mayor número de estudios sobre el efecto de los aditivos en la velocidad de corrosión del acero con la finalidad de normalizar también su uso en las estructuras de concreto armado y tener mayor información sobre los posibles riesgos de corrosión en el acero de refuerzo al emplear dichos aditivos.

EFFECTO DEL TIPO DE CEMENTO

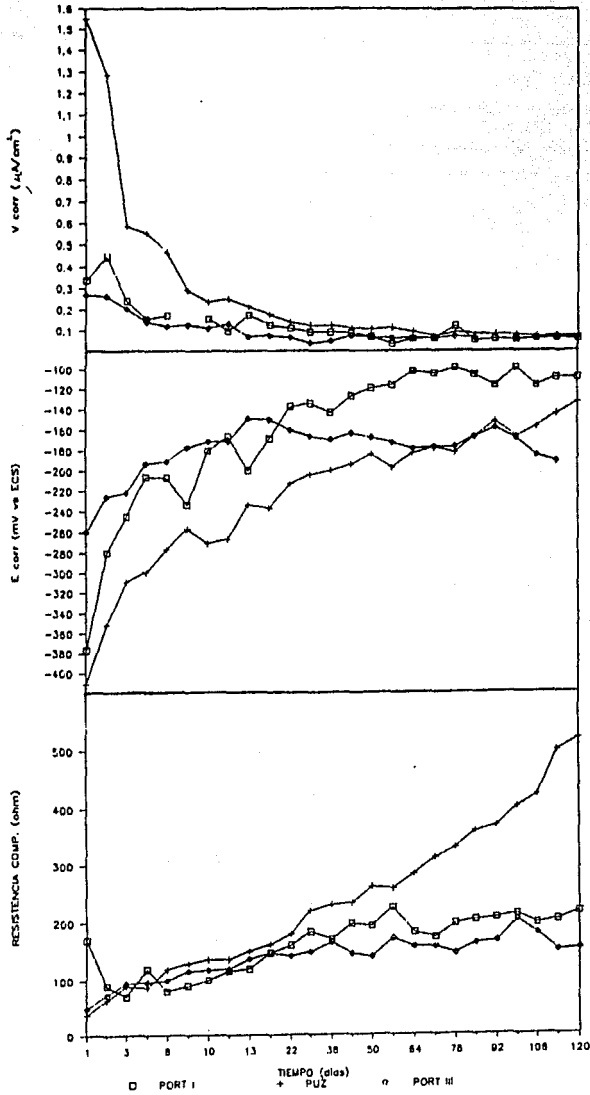


FIGURA 5.1 EFFECTO DEL TIPO DE CEMENTO.
 Cementos: Portland tipo I, Puzolánico y Portland III
 Rel. cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.5

EFFECTO DE LA RELACION A/C

Cemento Portland Tipo I

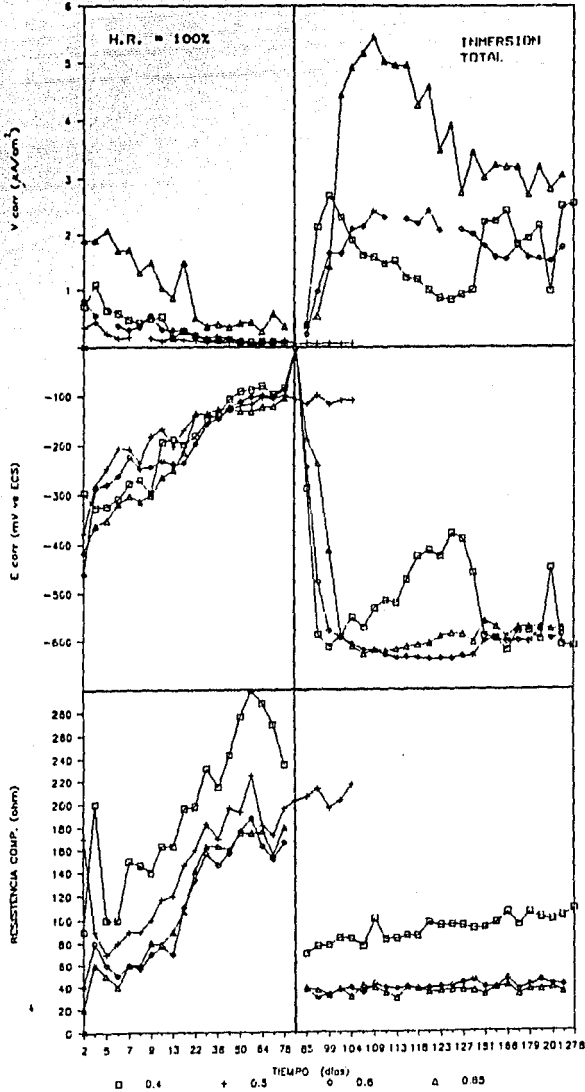


FIGURA 5.2 EFECTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO.
 Cemento Portland tipo I.
 Relaciones agua/cemento = 0.4, 0.5, 0.6 y 0.65
 Rel. cemento/arena = 1/3
 Condiciones de los ensayos: Humedad Relativa = 100% e
 inmersión total en solución del 3% de Cl^- (como NaCl)

EFECTO DEL ION CLORURO

Cemento Portland tipo I

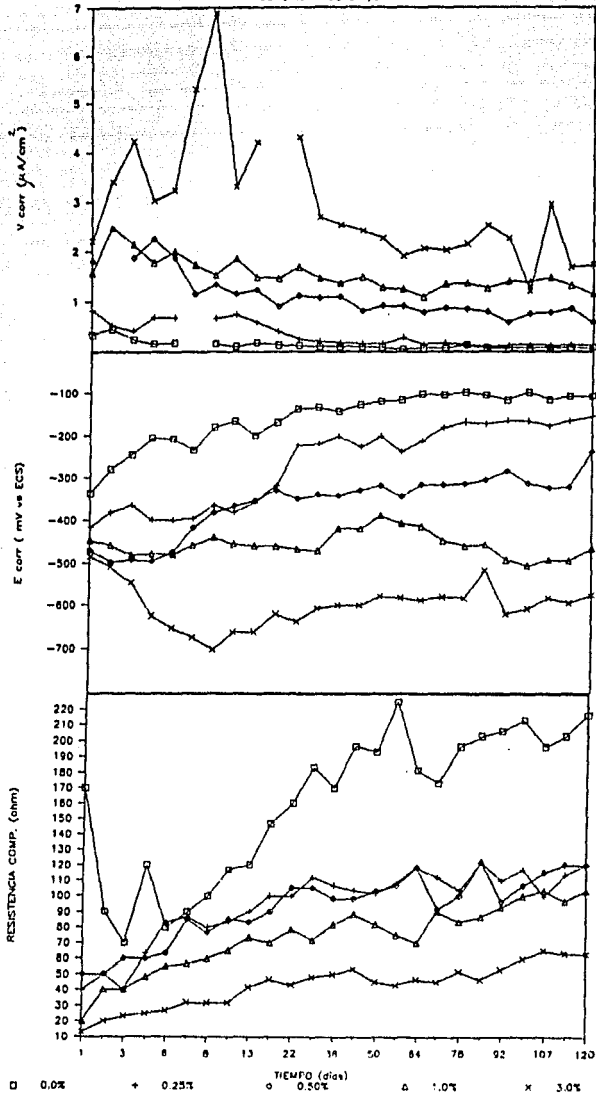


FIGURA 5.3 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo I. Concentración de Cl^- (como NaCl) = 0.0, 0.25, 0.50, 1.0 y 3.0%. Rel. cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.5

EFFECTO DEL ION CLORURO

C. Portland tipo I (Rel. a/c = 0.65)

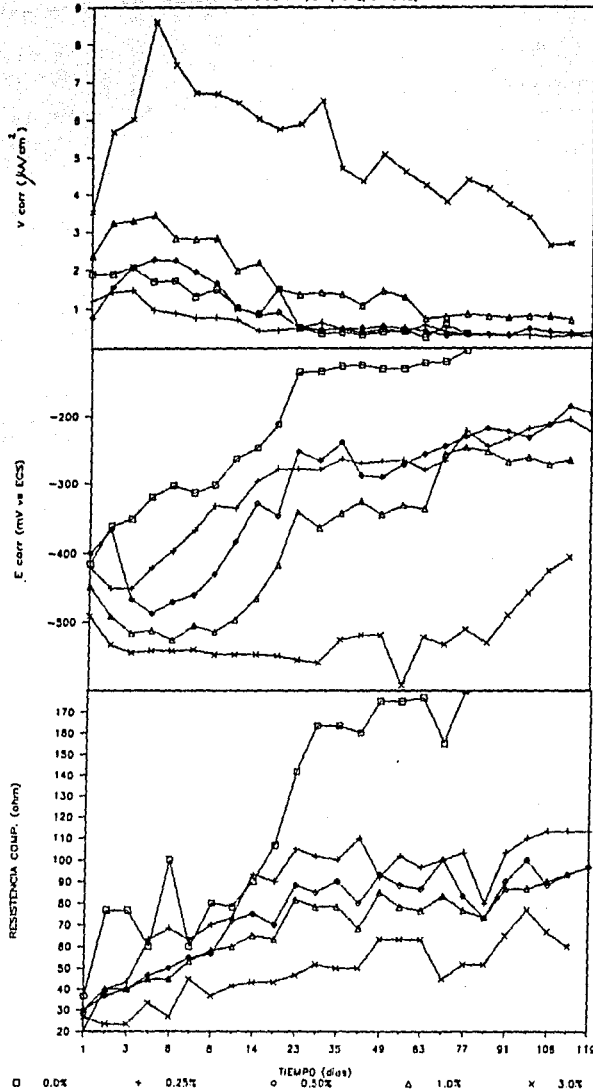


FIGURA 5.4 EFFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo I. Concentración de Cl^- (como NaCl) = 0.0, 0.25, 0.50, 1.0 y 3.0%. Rel. cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.65

EFFECTO DEL ION CLORURO

Cemento Puzolánico

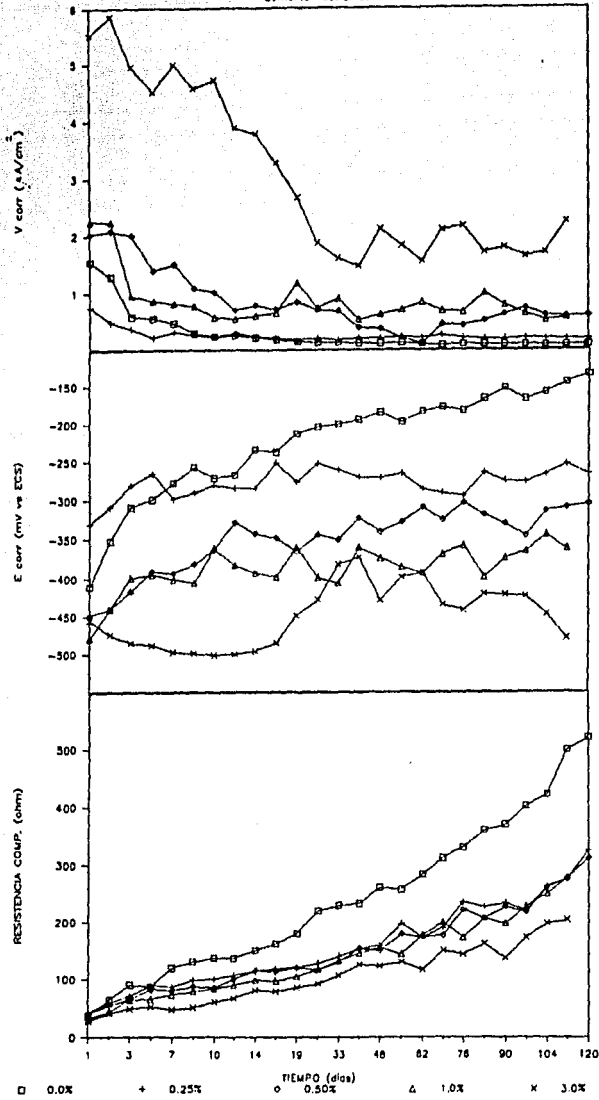


FIGURA 5.5 EFFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Puzolánico.
 Concentración de Cl^- (como NaCl) = 0.0, 0.25, 0.50, 1.0
 y 3.0%. Rel. cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.5

EFEECTO DEL ION CLORURO

Cemento Portland tipo III

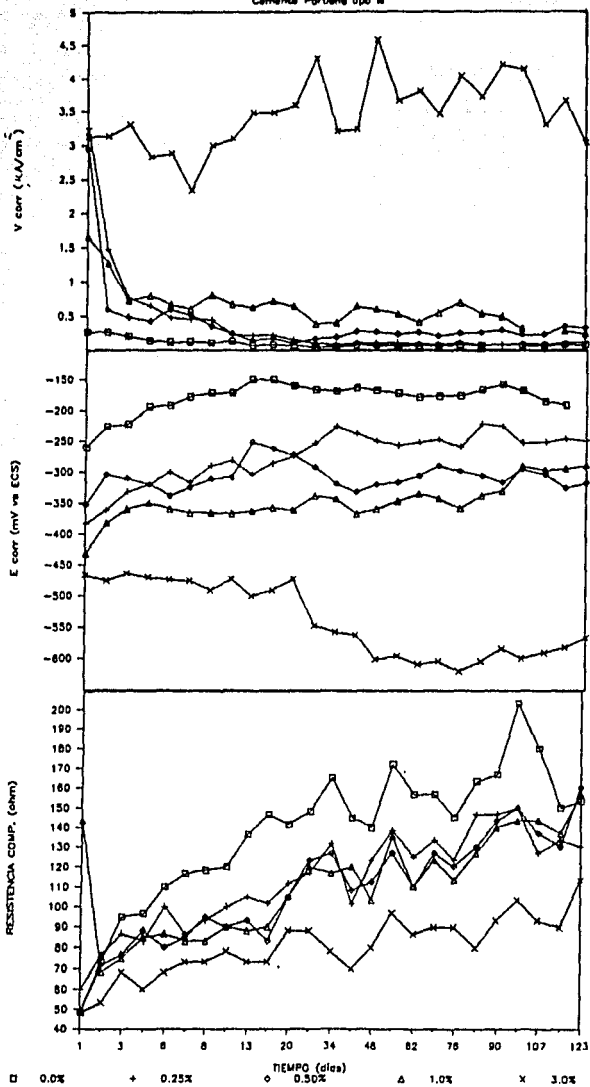


FIGURA 5.6 EFECTO DEL ION CLORURO. Cemento Portland tipo III. Concentración de Cl^- (como NaCl) = 0.0, 0.25, 0.50, 1.0 y 3.0%. Rel. cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.5

EFFECTO DEL ION CLORURO

0.0% de Cloruro

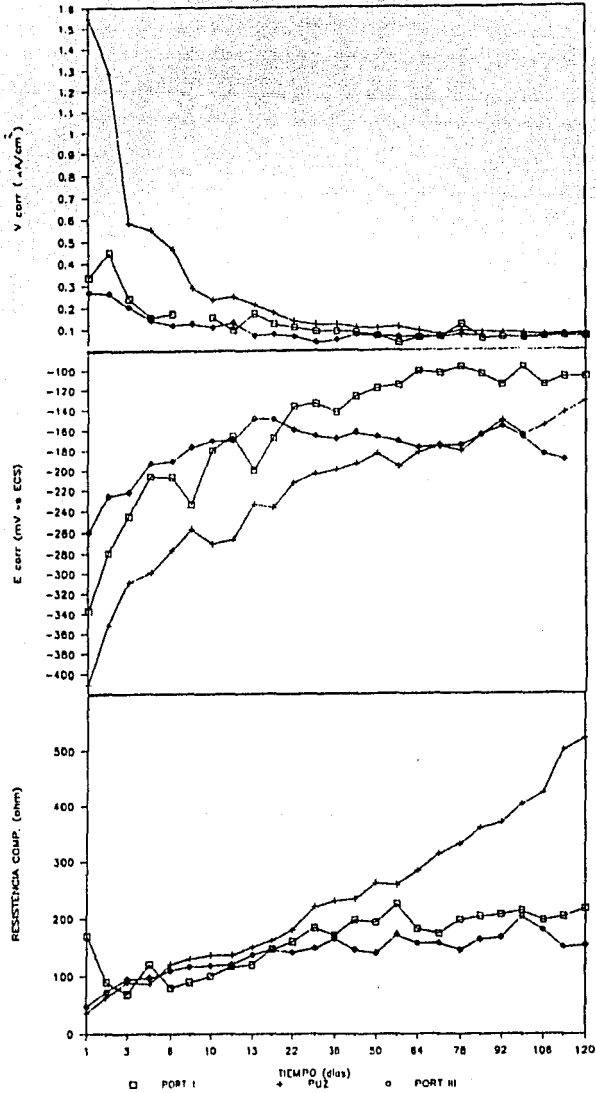


FIGURA 5.7 EFFECTO DEL ION CLORURO. Cementos: Portland tipo I, Pulvolánico y Portland III. Concentración de Cl^- (como $NaCl$) = 0.0%. Relación cemento/arena = 1/3. F_{cl} = 0.5

ELECTRO DEL ION CLORURO

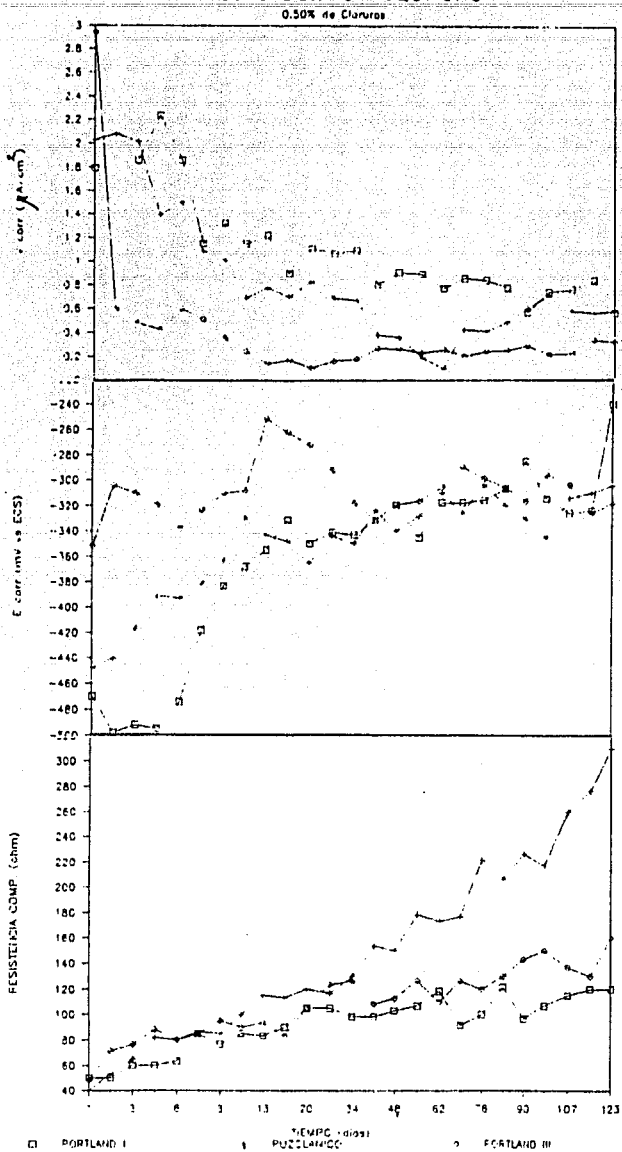
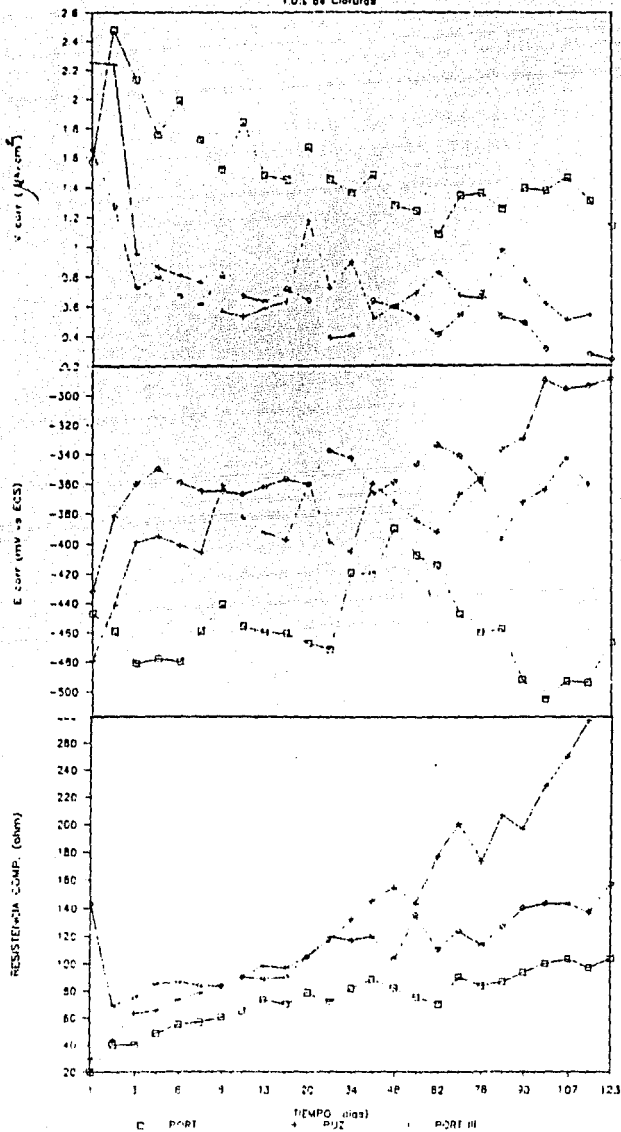


FIGURA 5.9 EFECTO DEL ION CLORURO. Cements: Portland tipo I, Pozzolánico y Portland III. Concentración de Cl^- (como NaCl) = 0.50% Relación cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.5

EFFECTO DEL ION CLORURO

1.0% de Cloruros



GRÁFICA 5.10 EFECTO DEL ION CLORURO. Cementos: Portland tipo I, Pozolánico y Portland III. Concentración de Cl (como NaCl) = 1.0%. Relación cemento/arena = 1/3. Rel. w/c = 0.5

EFFECTO DEL ION CLORURO

3.0% de Cloruros

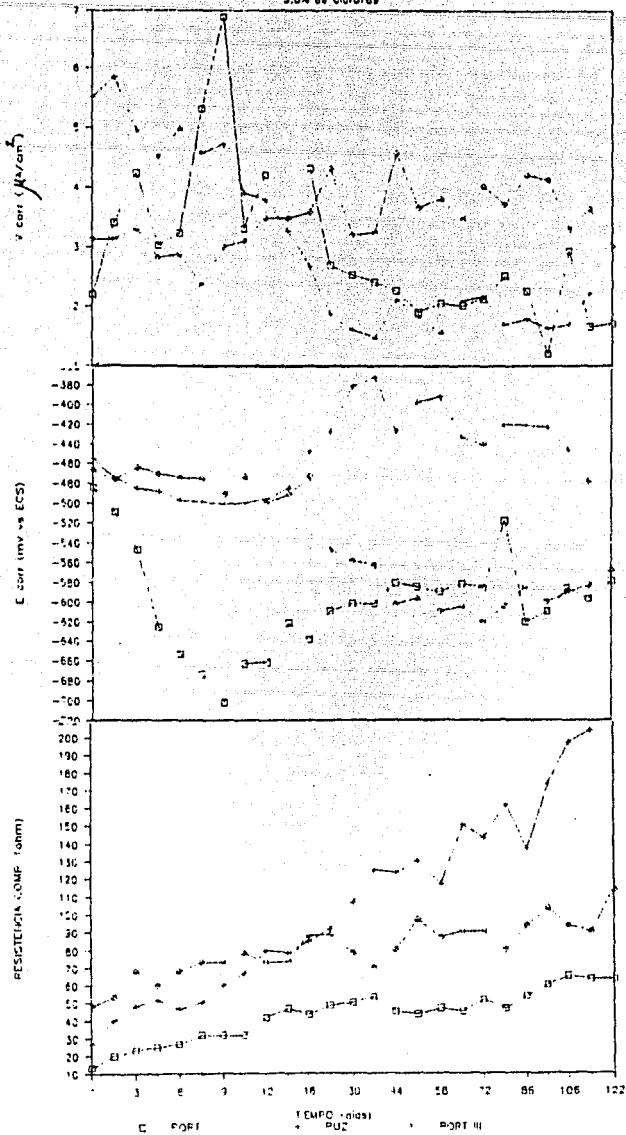
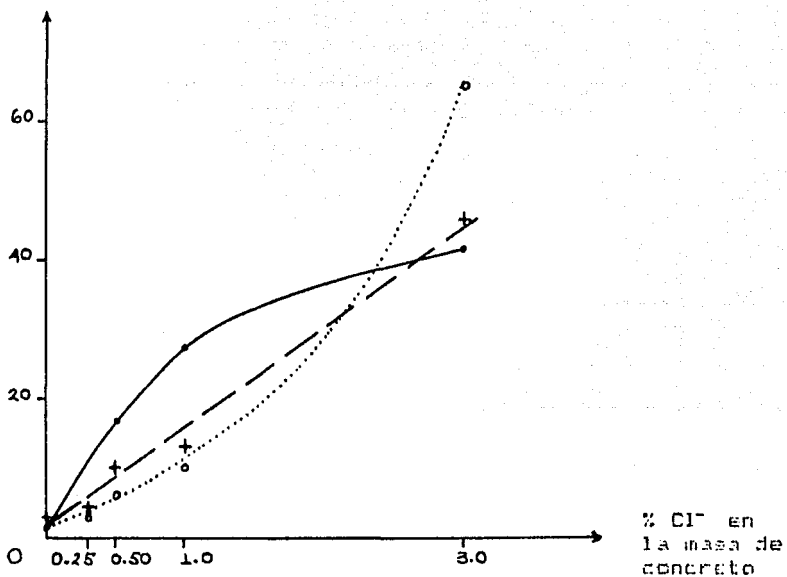


FIGURA 5.11 EFECTO DEL ION CLORURO. Cementos: Portland tipo I, Puzolánico y Portland III. Concentración de Cl^- (como NaCl) = 3.0%. Relación cemento/arena = 1/3. Rel. a/c = 0.5

Pérdida de peso electroquímica
(mg)



Portland tipo I —————
 Pozolánico - - - - -
 Portland III

FIGURA 5.12 Relación entre la pérdida de peso electroquímica de las varillas de refuerzo y el % de Cl⁻ en la masa de mortero para los tres diferentes tipos de cemento ensayados.

EFFECTO DEL TIPO DE CATION

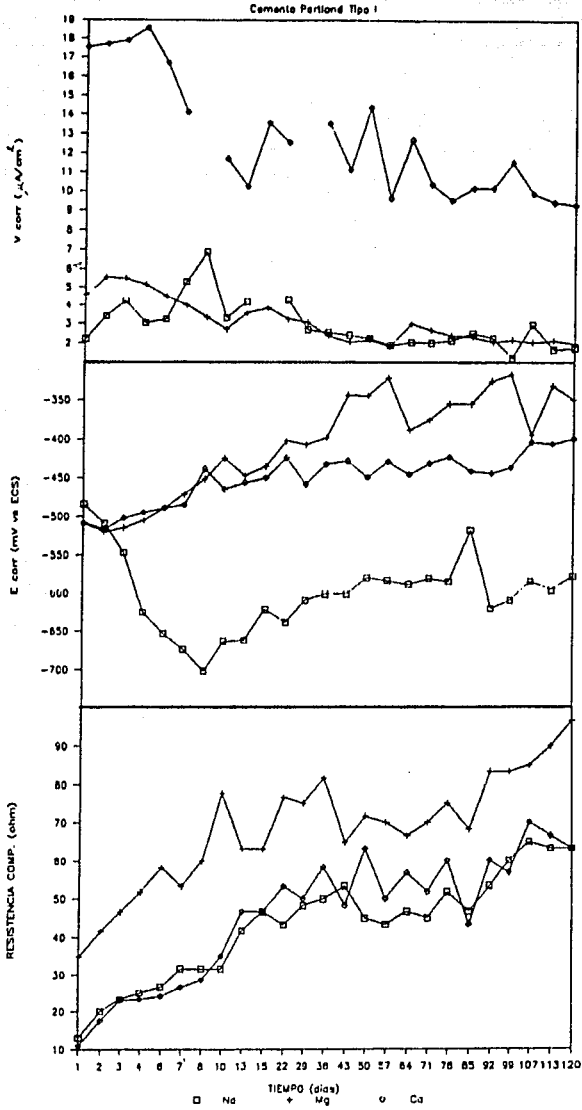


FIGURA 5.13 EFFECTO DEL TIPO DE CATION. Cemento Portland tipo I. 3.0% de Cl⁻ como NaCl, MgCl₂ y CaCl₂. Rel. cemento/arena = 1/3. Rel. agua/cemento = 0.5

EFFECTO INHIBIDOR DEL NO2
(Cemento Portland tipo III)

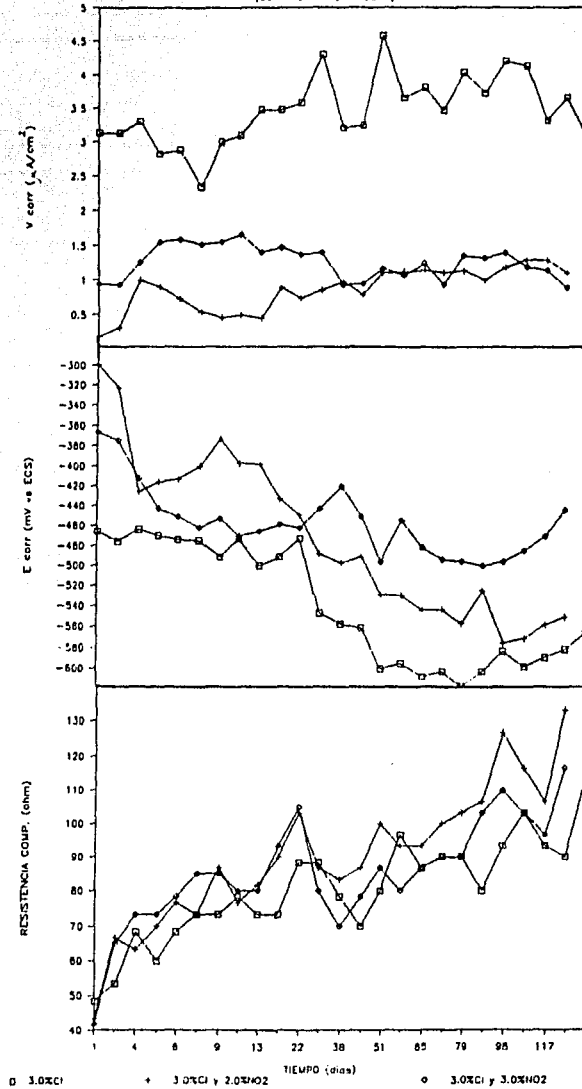


FIGURA 5.14 EFECTO INHIBIDOR DEL NO2 en Cemento Portland tipo III.
3.0% de Cl⁻ y 2.0% de NO2⁻ (como NaNO2) y
3.0% de Cl⁻ y 3.0% de NO2⁻ (como NaHNO2).
Rel. cemento/arena = 1/3 Rel. a/c = 0.5

EFFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS

(Cemento Portland Tipo III)

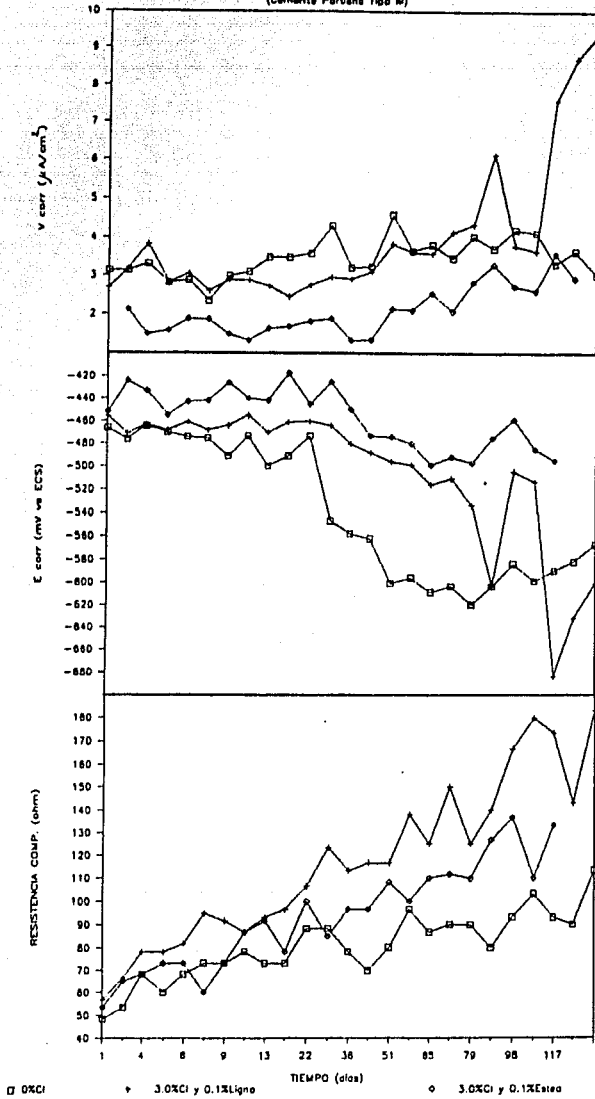


FIGURA 5.15 EFFECTO DE ADITIVOS ORGANICOS. Cemento Portland tipo III.
 3.0% de Cl^- y 0.1% de lignosulfonato de calcio y
 3.0% de Cl^- y 1.0% de estearato de calcio.
 Rel. cemento/arena = 1/3 Rel. a/c = 0.5

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CAPITULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) González, J.A. Teoría y Práctica de la lucha contra la corrosión. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid (1984).
- 2) Sistema en cuentas nacionales de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. (1987).
- 3) Avila, J. y Genescá, J. Corrosión y protección en la industria química mexicana. Ciencia y Desarrollo, 6(4) 103-111 (1985).
- 4) Evans, H.R. The corrosion and oxidation of metals: Scientific principles and Practical Applications. Edward Arnold (Publishers) LTD. London (1960).
- 5) Bickzock, J. Concrete Corrosion and Concrete Protection. 4 th Edition. Chemical Publishing Co. Inc. New York (1967).
- 6) Corrosion of metals in Concrete. Reported by ACI Committee 222. American Concrete Institute. Detroit (1985).
- 7) El-Sayed, H.A. Corrosion of Steel in concrete and its prevention. Corrosion Prevention & Control, 33 (4) 92-99 (1986).
- 8) Comment. Concrete Corrosion - an invisible menace?, Corrosion Prevention & Control, 33 (4) 79-82 (1986).
- 9) Isecke, B. Collapse of the Berlin Congress Hall Prestressed Concrete Roof. Materials Performance, 21 (12) (1982).
- 10) Granillo, S. Los Gusanos del Acero. Información Científica y Tecnológica, 9 (120) 37-39 (1986).
- 11) González, J. A., Andrade, C. y Escudero, M. I. Corrosión en las armaduras por carbonatación del hormigón. Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, 15 (4) 11-19 (1984).
- 12) Andrade, C. Comentarios sobre factores desencadenantes y acelerantes de la corrosión de armaduras. Materiales de construcción, (172) 63-69 (1978).
- 13) Ver apéndice B
- 14) Ver apéndice A

- 15) Neville, A. H. Tecnología del concreto. Tomo I. INCYC, México, D. F. (1984).
- 16) Jimenez - Montoya, P. Hormigón Armado. Vol. I. 5a. Edición. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona (1971).
- 17) Martín, I. La sensibilidad del concreto. Revista INCYC, XIV (1983) 7-20 (1987).
- 18) Reinforced Concrete Engineering V.I. Materials, Structural Elements, Safety. Edited by Boris Dresler. John Wiley & Sons. New York (1974).
- 19) Indorn, G. M. A Plea for recognition of the impact of chemistry on the durability of concrete. Cement and Concrete Research, 14 (5) 749-53 (1984).
- 20) Slater, J.E. Corrosion of Metals in association with concrete. ASTM Special Technical Publication 818, ASTM. Philadelphia (1983).
- 21) Saliger, R. El hormigón armado. 2da. Ed. Editorial Labor S.A. Madrid (1953).
- 22) Higgins, R. A. Ingeniería Metalúrgica. Metalurgia Física Aplicada. Tomo I. Editorial Continental, S.A. de C. V. México (1982).
- 23) Martínez, I. et al. La conveniencia de los aceros de baja aleación en la construcción atisísmica. Instituto de Física UNAM. Siderúrgica Lázaro Cárdenas- Las Truchas, S. A. (sin publicar).
- 24) Yuan-Yu, Hsieh. Elementary Steel Structures. Prentice-Hall, Inc. New Jersey (1973).
- 25) Manual de Construcción en acero. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C. y Editorial Limusa. México (1987).
- 26) Lankard, D.R. Cement and Concrete Technology for the corrosion Engineer. Materials Performance, 15 (8) 24-37 (1976).
- 27) Venuat, M. & Papadakis, M. Control y ensayo de cementos, morteros y hormigones. Ediciones Urmo, S.A. Bilbao (1975).
- 28) ACI Manual of concrete Practice. Part I. American Concrete Institute. Detroit (1979).
- 29) Barneyback R. S. and Diamond, S. Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research, 11 (2) 279 (1981).

- 30) Hansson, C. M. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 14 (4): 574-584 (1984).
- 31) Sheir, Corrosion V.I. 2nd Ed. Newnes-Butterworths, Signapore (1976).
- 32) Definition of the word "Corrosion". *Materials Performance*, 21 (3) (1982).
- 33) Galvele, J.R. Corrosión. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de desarrollo Científico y Tecnológico. Washington, D.C. (1979).
- 34) López, W., Anila, J. y Denescá, J. La corrosión: un fenómeno fuera del equilibrio. *Memorias III Foro Nacional de Electroquímica*, Tlaxcala (1987).
- 35) Eraso, E. Comunicación Personal
- 36) Powers T. C. and Brownvard T.J. , 1947. PCA RSD Bulletin No. 22. Reprinted from ACI Journal, 43.
- 37) Pressler, F. E., Brunauer, S. et al. Determination of the Free Calcium Hydroxide Contents of Hydrated Portland Cements and Calcium Silicates. *Analytical Chemistry*, 33 (7) 877-882 (1961).
- 38) Whiting, O. *Nater. Perf.*, 17 (9) (1979).
- 39) Page, C.L., El Terras, A. and Short, H.R. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 11 (3): 395-406 (1981).
- 40) Roschberg, O.M. Study of mechanism through which calcium chloride accelerates the set of Portland cement. *ACI Journal Proceedings*, 41 (10) 1261-1270 (1964).
- 41) Gjov, O.E. and Vennesland, O. Diffusion of chloride ions from sea water into concrete. *Cement and concrete Research*, 9 (2): 229-233 (1979).
- 42) Uhlig, H.H. Corrosion and corrosion control. John Wiley & Sons Inc. 2nd. Edition. New York (1971).
- 43) Speller, F. H. Corrosion Causes and Prevention. Mc Graw Hill. New York (1971).
- 44) Verbeck, G.J. Mechanisms of corrosion of steel in concrete, *Corrosion of Metals in Concrete*, SP49-7, American Concrete Institute, Detroit 1975, pp. 21-39.

- 45) Griess, J.C. and Nauz, D.J. Corrosion of Steel tendons used in prestressed Concrete Pressure Vessels. Corrosion of reinforcing Steel in Concrete ASTM STP 713, Ioini, D.E. and Gaidis, J.M. Eds., American Society for testing and Materials, pp 32-50 (1980).
- 46) West, J.M. Fundamentos Corrosión y Oxidación. Ed. Limusa, México (1984).
- 47) Erlin, B. and Verboek G. Corrosion of metals in concrete needed research. Corrosion of Metals in concrete. SP 49-4. American Concrete Institute, Detroit, 1975. pp. 39-47.
- 48) Miller, R.L. and Hartt, W.A. Stray Current and Galvanic Corrosion of reinforcing steel in Concrete. Materiele Performance, p. 20 (1974).
- 49) Aguilar, L.Y. Corrosión y Protección del acero de refuerzo en estructuras de concreto, Tecnología 11 (40) (1985).
- 50) Uruchurtu, J., Malo, J.N. y Martínez, A. Nuevas Técnicas Electroquímicas en el estudio de la corrosión. Memorias del III Foro Nacional de Electroquímica, Tlaxcala (1987).
- 51) Griffin, D.F. Corrosion inhibitors for reinforced Concrete. Corrosion of Metals in concrete SP 19 2 American Concrete Institute, Detroit, (1975).
- 52) Standard Method for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement pastes and Mortars of Plastic consistency, 1977 Annual Book of ASTM Standards, PART 13. American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1977).
- 53) Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or 50-mm cube specimens). 1977 Annual Book of ASTM Standards, PART 13. American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1977).
- 54) González, J.A. and Andrade, C. Effect of carbonation, chloride and relative ambient humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete. Br. Concr. J., 17 (12) 21-28 (1982).
- 55) Robinson, P.C. Design of reinforced concrete structures for corrosive environments. Mat. Perf., 11 (3) 15-19 (1972).
- 56) Dehghanian, C. and Locke, C. Electrochemical Behavior of steel in concrete as a result of chloride diffusion into concrete: PART 2. Corrosion-Place, 38 (2) 494-499 (1982).

- 57) Midgley, H.G. and Illston, J.M. The penetration of chlorides into hardened cement pastes. Cement and Concrete research, 14 (4) 546-558 (1984).
- 58) Andrade, C. and González, J.A. Técnicas electroquímicas cuali y cuantitativas para medir los efectos de las adiciones sobre la corrosión de las armaduras. Materiales de Construcción, (192) 69-78 (1981).
- 59) Andrade, C. y González, J.A. Determinación electroquímica cuantitativa de la velocidad de corrosión de un acero de construcción. Evaluación de la susceptibilidad al ataque por picaduras. PARTE II: Ensayos en mortero. Materiales de Construcción, (169) 1-14 (1978).
- 60) Takemoto, K. and Uchikawa, H. Hydration of pozzolanic cement. Onoda Cement Co. Japan.
- 61) Grimaldi, G. et al. Factors influencing electrode potential of steel in concrete. Br. Corros. J., 21 (1) 55-62 (1986).
- 62) Hansson, C.M., Frolund, T. and Markussen, J.P. The effect of chloride cation type on the corrosion of steel in concrete by chloride salts. Cement and concrete research, 15 (1) 65-73 (1985).
- 63) Andrade, C. and Page, C.I. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effects. Br. Corros. J., 21 (1) 49-53 (1986).
- 64) Ben Yair, M. Cement and concrete research, 3 105-116 (1974).
- 65) Midgley, H.G. and Illston, J.M. The penetration of chlorides into hardened cement pastes. Cement and concrete research, 14 (4) 546-558 (1984).
- 66) Hoffmann, D.W. Changes in structure and chemistry of cement mortars stressed by a sodium chloride solution. Cem. Concr. Res. 14 (1) 49-56 (1984).
- 67) Andrade, C. Alonso, C. y González, J.A. Ensayos de laboratorio sobre el efecto inhibitor de los NO₂ sobre la corrosión de las armaduras. Materiales de Construcción, 34 (195) 41-50 (1984).
- 68) Rosenberg, A.M. and Gaidis, J.M. The mechanism of nitrite inhibition of chloride attack on reinforcing steel in alkaline aqueous environments. Materials Performance, 18 (11) 45-48 (1979).

- 69) Standard Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. 1977 Annual Book of ASTM Standards. PART 13. American Society for Testing and Materials. Philadelphia (1977).
- 70) Roque, R.H. La Química del cemento Portland. Editorial Dossat, S.A. Madrid (1952).
- 71) Standard Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. 1986 Annual Book of ASTM Standards. PART 13. American Society for Testing and Materials. Philadelphia (1986).
- 72) Hope, B.B., Page, J.A. and Poland, I.S. The determination of the chloride content of concrete. *Concr. Constr. Res.*, 15 (5) 853-870 (1985).
- 73) Champion, F.A. Corrosion Testing Procedures. 2nd. Edition. Chapman and Hall. London (1964).
- 74) González, J.A. Apuntes de los cursos: Problemas de Corrosión en estructuras de concreto y otros problemas relacionados con la Ingeniería de la construcción. Técnicas electroquímicas empleadas en el estudio, seguimiento y control de procesos de corrosión. México, D.F. (1984).
- 75) Stern, M. and Geary, L. Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. *J. Electrochem. Soc.*, 104 (10) 56-67 (1957).
- 76) Stern, M. and Geary, L. Electrochemical Polarization II. Ferrous Ferric Electrode Kinetics on Stainless Steel. *J. Electrochem. Soc.*, 104 (9) (1957).
- 77) Stern, M. and Geary, L. Electrochemical Polarization. III. Further Aspects of the Shape of Polarization Curves. *J. Electrochem. Soc.*, 104 (11) (1957).
- 78) Stern, M. Corrosion, 14 329t (1958).
- 79) Stern, M. A Method of Determining Corrosion Rates from Linear Polarization Data. *Corrosion*, 14 440t (1958).
- 80) Stern, M. and Weisert. *Proc. Am. Soc. Test. Mat.*, 59 1280 (1959).
- 81) Oldham, K.B. and Mansfield, F. Technical Note. On the So-Called Linear Polarization method for measurement of corrosion rates. *Corrosion*, 27 (10) 434-435 (1971).
- 82) Green, N.D. and Gandhi, R.H. *Materials Performance*, 21 (7) (1982).

- 83) Feliu, V. and Feliu, S. A Noniterative Method for Determining Corrosion Parameters From a Sequence of Polarization Data. Corrosion-Nace, 42 (3): 151-156 (1986).
- 84) Callow, L.M., Richardson, J.A. and Dawson, J.I. British Corrosion Journal, 11 p.123 (1976).
- 85) Callow, L.W., Richardson, J.A. and Dawson, J.I. British Corrosion Journal, 11 p.132 (1976).
- 86) Revista Metal Madrid, 20 (4) (1984).
- 87) González, J.A. et al. Errors in the Electrochemical evaluation of very small corrosion rates - II. Other electrochemical techniques applied to Corrosion of steel in Concrete. Corrosion Science, 25 (10): 917-930 (1985).
- 88) González, J.A. et al. Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete. Corrosion Science, 25 (10): 917-930 (1985).
- 89) John, D.G., Sparson, P.C. and Dawson, J.I. British Corrosion Journal, 16 (2) p.102 (1981).
- 90) Zercher, D. C. Corrosion inhibition by Surface-Active Chelants. Materials Performance, 15 (4) (1976).

A P E N D I C E A

OTRAS TECNICAS EMPLEADAS

APENDICE A: OTRAS TECNICAS EMPLEADAS

Antes de entrar en los fundamentos teóricos en los que se basan las técnicas analíticas empleadas en este trabajo, se recuerda que uno de los objetivos es poner de manifiesto la bondad que nos ofrecen los métodos electroquímicos empleados en el estudio de la corrosión, en nuestro caso el método de Resistencia de Polarización (Rp).

Para lograr los objetivos se planteó la necesidad de la utilización de técnicas analíticas, que al aplicarse simultáneamente en las mismas condiciones experimentales de trabajo, permitan reafirmar los resultados electroquímicos obtenidos experimentalmente.

Las técnicas que se contemplan en este apéndice son:

- 1) Técnica de fabricación de las probetas de mortero
- 2) Determinación del Ca(OH)_2 liberado durante la hidratación del cemento.
- 3) Determinación de la resistencia a la compresión del cemento.
- 4) Determinación de cloruros solubles en ácido (Cl^- totales) y cloruros solubles en agua (Cl^- libres)
- 5) Limpieza del refuerzo de acero embebido en el mortero.
- 6) Determinación del Área superficial del refuerzo de acero.

1) FABRICACION DE PROBETAS Y CUBOS DE MORTERO

Como ya se dijo, uno de los factores que influyen en la velocidad de corrosión del refuerzo metálico en las

estructuras de concreto es su puesta en obra (planeación del diseño, materiales de mala calidad, factor humano, etc.).

Para tratar de minimizar este tipo de falla en la industria de la construcción existen normas que rigen las características que deben guardar cierto tipo de construcciones.

En el laboratorio se realizan diversos tipos de ensayos y pruebas en las mismas condiciones en que ha de realizarse una construcción. Estas pruebas y ensayos están referidos a patrones estándar.

Dado que éste es el primer trabajo sobre el tema de corrosión del refuerzo metálico embebido en concreto, la parte experimental se desarrolló con la intención de que el trabajo sirva como referencia a futuros estudios, para lo cual, la elaboración de las probetas y cubos para los ensayos tanto electroquímicos como para las pruebas de compresión se llevaron a cabo siguiendo la norma ASTM "Mechanical mixing of hydraulic cement, pastes and mortars of plastic consistency" C 305-65 (52).

La norma dicta las especificaciones y requerimientos de cada uno de los materiales empleados para la elaboración de pastas de morteros, así como las características del equipo empleado, describe detalladamente el orden a seguir para mezclar los materiales y el tiempo requerido para el mezclado.

Además de seguir la norma C 305-65 ASTM, en el llenado de los moldes se empleó un factor más que fue una "vibración" mecánica dada a cada probeta y cubo, esta "vibración"

consistió de un apizonamiento para tratar de impedir la formación de cavidades de aire y obtener un acabado lo más homogéneo posible.

Finalmente se recuerda que las características de los moldes se especifican en el capítulo tres de este trabajo.

2) DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE CaO LIBERADO DURANTE LA HIDRACION DEL CEMENTO

Durante la hidratación del cemento, los compuestos que lo constituyen reaccionan con el agua formando compuestos muy complejos. Cada una de estas fases (ver capítulo tres) tiende a reaccionar con el agua a distintas velocidades.

Conforme se desarrolla el proceso de hidratación de cada fase, la masa de cemento va adquiriendo distintas características, como el fraguado, el endurecimiento de la masa, la liberación de calor, la liberación de Ca(OH)_2 , etc. Características que son de gran importancia para el ingeniero civil, ya que le sirven como parámetros para fijar las condiciones de trabajo (planeación y diseño de estructuras).

En la hidratación del cemento, cada fase reacciona con el agua, dando lugar a productos complejos y a hidróxido de calcio, cuya concentración varía conforme se desarrolla el proceso de hidratación.

Es por esto que una medida de la hidratación del cemento está basada en la determinación del Ca(OH)_2 que se libera en las reacciones de hidratación.

Dicha determinación se efectúa por medio de una extracción del Ca(OH)_2 en una mezcla glicerina-etanol en caliente, seguida de una valoración ácido/base del hidróxido de calcio disuelto, utilizando como reactivo titulante acetato de amonio disuelto en etanol. Se emplea fenoftaleína como indicador del punto final de la valoración.

La información sobre la determinación del hidróxido de calcio contenido en los cementos, aparece en la norma ASTM C 114-77 "Chemical analysis of hydraulic cement" (69).

Bogue (70) describe la determinación de Ca(OH)_2 por medio de la siguiente reacción:



3) DETERMINACION DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CEMENTO

En el capítulo tres se definió al concreto armado como un sólido único hecho de concreto y acero de refuerzo, cuya característica mecánica principal es la de tener altas resistencias mecánicas a la compresión y a la tensión.

La resistencia a la compresión es una propiedad de vital importancia para la Ingeniería Civil porque permite evaluar la carga máxima en peso que puede soportar una estructura de concreto armado para que no sufra fractura alguna por exceso de carga.

Para realizar las pruebas de resistencia a la compresión a nivel laboratorio, éstas se realizan en las mismas condiciones tanto ambientales como de dosificación de los materiales de construcción. Para este tipo de ensayos se hace

uso de muestras en forma de cilindros, cubos o barras de mortero cuya elaboración está especificada en la norma "Compressive strength of hydraulic cement, mortars (using 2 in or 50 mm cube specimens)" ASTM C 109-77 (53), la cual marca los pasos a seguir para realizar la prueba.

En este trabajo las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos marca Losenhausewark con capacidad de 10 toneladas usando muestras de mortero con relación cemento:arena:agua de 1:3:0.5 en cubos de 2.5 cm de arista.

4) DETERMINACION DE CLORUROS SOLUBLES EN ACIDO Y CLORUROS SOLUBLES EN AGUA

Como se dijo en el capítulo tres, uno de los principales agentes despasivantes del acero es el ión cloruro.

En este trabajo se determinó la cantidad de cloruros solubles en ácido (cloruros totales) y la cantidad de cloruros solubles en agua (cloruros libres) presentes en la masa de concreto para algunas de las probetas ensayadas, con el fin de cuantificar la cantidad de iones cloruros que pueden reaccionar con cada tipo de cemento utilizado y para relacionar estos valores de cloruros determinados en la masa de concreto con los datos de velocidad de corrosión obtenidos electroquímicamente.

a) CLORUROS TOTALES

Este ensayo surge como especificación para el concreto hasta 1986, y está contenido en la norma ASTM C 114-86 (71)

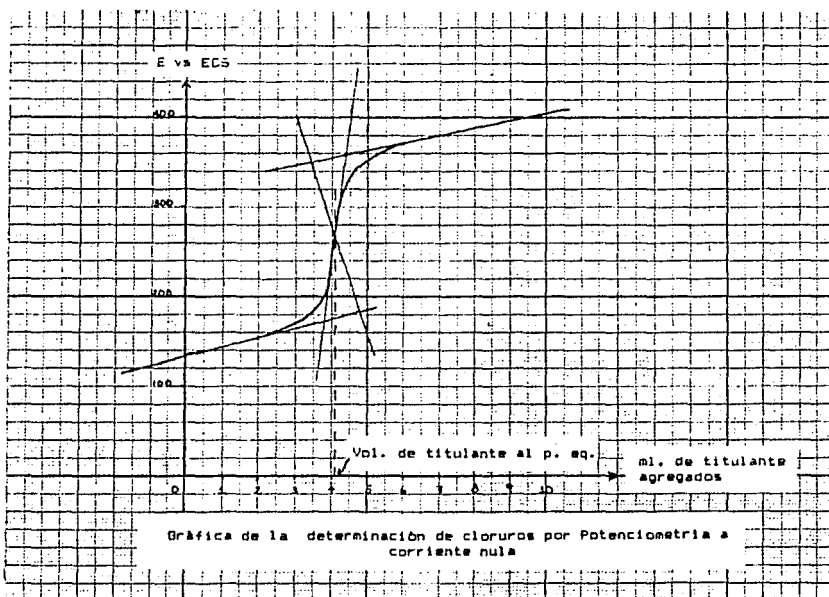
Para esta determinación se trituró la probeta y se

hizo una gradación de las fracciones recogidas.

Como muestra para este análisis, se tomó un trozo del mortero triturado del peso necesario, y se disolvió completamente en ácido nítrico 1:1 para posteriormente valorar la disolución con nitrato de plata, siguiendo las especificaciones de la norma anteriormente mencionada.

La valoración se realizó por el método de potencimetría a corriente nula, utilizando un electrodo de Ag/AgCl para seguir la reacción de precipitación de AgCl dentro de la solución y un electrodo de calomelanos saturado con KCl como referencia en otra celda, para evitar la contaminación de la solución a valorar con los cloruros del electrodo de referencia, la unión entre estas dos celdas se realizó por medio de un puente de agar-agar.

La determinación del punto de equivalencia se obtuvo de la gráfica del cambio de potencial versus ml. de titulante agregado como se muestra a continuación:



Finalmente cabe mencionar que los ensayos de realizaron por duplicado y que la reacción de valoración de los cloruros en la disolución puede representarse por la siguiente reacción:



b) CLORUROS LIBRES

Una vez que las probetas fueron trituradas y tamizadas, se tomó una muestra de 30 g. de la fracción con tamaño de partícula mayor de 1/4 de pulgada y menor de 1/2 pulgada, y se sometió a un proceso de extracción en medio acuoso por 24 horas utilizando un equipo soxhlet (72). Terminada la extracción, se tomó una alícuota de la solución conteniendo los cloruros y se valoró de igual forma que para los cloruros totales.

5) LIMPIEZA DEL REFUERZO METALICO.

Cuando una pieza metálica está expuesta a ambientes que favorecen su corrosión y forma productos insolubles, éstos pueden quedarse adheridos al metal, y existe así la necesidad de removerlos cuando se llevan a cabo pruebas de pérdida de peso del material.

Para este tipo de pruebas es necesario limpiar la muestra superficialmente antes de iniciar el ensayo y también después de éste para que la pérdida de peso medida refleje fielmente la cantidad de metal consumido por la corrosión.

En el presente trabajo, la limpieza inicial consistió

solamente en desengrasar las muestras con acetona y secarlas perfectamente en la estufa antes de pesarlas por duplicado, ya que las varillas utilizadas no tenían muestras de óxido superficial.

Al finalizar los ensayos, las muestras separadas de las probetas de mortero se limpiaron químicamente.

Esta limpieza química consistió en sumergirlas durante 30 minutos en la solución de Clarke a temperatura ambiente, cuya composición es la siguiente (73):

HCl concentrado	100 ml
SbO	2 g
SnCl ₂	2 g

El SbO es requerido para inhibir el ataque del metal, y el SnCl₂ es usado para reducir el FeCl₃ formado a la especie menos corrosiva FeCl₂.

6) DETERMINACION DEL AREA SUPERFICIAL DEL REFUERZO METALICO.

La determinación del área de un metal que sufre corrosión, es de gran importancia para conocer la velocidad de corrosión de éste por cualquier método electroquímico, ya que la velocidad de corrosión se expresa como densidad de corriente. En este caso, como la varilla de acero presenta corrugaciones en su superficie, no se podía determinar el área superficial simplemente por un cálculo geométrico.

Este problema se resolvió de la siguiente manera:

Se sabe que el volumen de un cilindro puede obtenerse aplicando la ecuación $V = A(\text{base}) * h$

Por lo que $A(\text{base}) = V/h$

Así, es posible relacionar el volumen y la altura de un cilindro con el Área de la base, y como $A(\text{base}) = \pi r^2$, entonces se puede obtener el radio del cilindro. Entonces, si lo anterior se hace para varias muestras con diferentes h , lo que se obtiene es una recta con pendiente igual a $A(\text{base})$.

En este trabajo se aprovechó esta relación y se maquinaron perfectamente 5 muestras de varilla corrugada a alturas de 2,4,6,8 y 10 cm.

Para obtener el volumen, primeramente se determinó la densidad promedio del material y después se pesaron cada una de las mismas muestras para obtener el volumen de cada muestra, obteniéndose los siguientes resultados:

Densidad promedio del acero de las varillas = $7.8215 \text{ g/cm}^3 \pm 0.0172$

Altura de las varillas (cm)	peso promedio (g)	volumen promedio (cm ³)
2	$1.9654 \pm 3 \cdot 10^{-4}$	0.2513
4	$3.9421 \pm 2 \cdot 10^{-4}$	0.5040
6	$5.9290 \pm 3 \cdot 10^{-4}$	0.7580
8	$7.9297 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	1.0138
10	$9.8392 \pm 4 \cdot 10^{-4}$	1.2580

Al graficar volumen versus altura, se obtuvo una recta con las siguientes características: $m = 0.12616$
 $b = 0.0006$
 $\text{corr} = .99997$

y como $m = A(\text{base}) = \bar{V}$

$$\bar{V} = \left[\frac{A(\text{base})}{\pi} \right]^{1/2}$$

$$\bar{V} = 0.200395 \text{ cm}$$

y como $A(\text{superficial}) = 2\pi r h$

$$A(\text{superficial}) = 7.555 \text{ cm}$$

Este método tiene como ventaja que al relacionar el volumen de la varilla con su altura, el radio promedio obtenido corresponde al de un cilindro liso que representa las características de la varilla corrugada.

Así, como el cilindro liso es una representación geométrica con las mismas características de la varilla corrugada, el área superficial calculada para el cilindro liso es la misma que el área efectiva de la varilla corrugada.

APENDICE B

METODO DE RESISTENCIA DE POLARIZACION

APENDICE B: METODO DE RESISTENCIA DE POLARIZACION (Rp)

1/ INTRODUCCION

Antes de entrar propiamente a exponer el método utilizado para evaluar la velocidad de corrosión instantánea de las varillas de acero embebidas en el concreto, se ahondará en un punto que se encuentra dentro de los objetivos del trabajo y es el de sacar a la luz la bondad de los métodos electroquímicos para el evaluación y seguimiento de los procesos de corrosión.

Dada la naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión, parecería lógico que los métodos electroquímicos fueran los primeros en utilizarse para su estudio y seguimiento, pero desgraciadamente no ha sido así; durante mucho tiempo los métodos analíticos directos como la pérdida de peso o bien los análisis de la solución por técnicas espectroscópicas se han usado en este campo.

Actualmente la determinación de las velocidades de corrosión como densidades de corriente ofrece una sensibilidad ilimitada gracias a la gran cantidad de electricidad que se necesita para disolver un equivalente químico. Considérese que los procedimientos gravimétricos clásicos precisan, al menos, para poder utilizarse, variaciones en peso del orden del mg., mientras que la instrumentación electrónica actual permite acceder a intensidades del orden de nA (10^{-9} A) y para el caso del hierro, una i corrosión del 10 nA/cm^2 ; fácilmente medible, actuando durante una hora, produce una

pérdida de peso de 1.042×10^{-6} mg. de Fe, de cuyos datos se infiere que los métodos electroquímicos son unas 10 veces más sensibles que las técnicas tradicionales, permitiendo evaluar ataques muy inferiores a los admitidos frecuentemente en la práctica.

Otra característica de los métodos electroquímicos es que suministran en todo momento información sobre la velocidad de corrosión instantánea dado que son diferenciales, mientras que los procedimientos clásicos por pérdida o ganancia de pesos son integrales y sólo proporcionan una velocidad media del ataque.

También los métodos electroquímicos, gracias a su alta sensibilidad permiten reproducir en numerosos sistemas metal/medio las condiciones reales de servicio sin necesidad de someter las especies a ensayos acelerados de corrosión, que por lo general son muy severos y alejados de las condiciones reales de servicio.

Además estos métodos electroquímicos son excelentes si se quiere estimar la velocidad de corrosión de aquellos materiales que exhiben elevada resistencia a ésta, electroquímicamente se puede llegar a una estimación de la velocidad de ataque en tiempos muy cortos y obtener datos de velocidad de corrosión aún antes de que ésta se manifieste visualmente.

II/ TRABAJOS PRECURSORES Y ESTABLECIMIENTO DEL METODO DE RESISTENCIA DE POLARIZACION (74)

Las bases técnicas del método datan ya desde 1938, fecha en que Wagner & Traud relacionaron la pendiente de la curva de polarización medida para $I \rightarrow 0$ (es decir en el E corr, con la velocidad de corrosión.

En 1951, Bonhoeffer y Jena aplicaron la idea al estudio de la corrosión de varios aceros en ácido sulfúrico e introdujeron la denominación de "Resistencia de Polarización" para la pendiente:

$$\left(\frac{dE}{dI} \right)_{I \rightarrow 0}$$

Posteriormente Simmons, Skold y Larson, de manera independiente, observaron nuevamente la existencia de la proporcionalidad entre los valores de R_p y la velocidad de corrosión para el estudio de la eficiencia de los inhibidores polares orgánicos en la fracción salina acuosa de los crudos petrolíferos y de la corrosión del hierro y del acero en agua de elevada conductividad respectivamente.

Todas estas contribuciones pueden considerarse como precursoras del método de resistencia de polarización, que como actualmente se conoce; se origina de los trabajos de Stern y colaboradores (75,76,77,78,79), quienes en el año de 1957 establecieron sus fundamentos teóricos, aplicándolo a la medida de la corriente de intercambio de sistemas en equilibrio y a la velocidad del ataque en sistemas que se

corroen (75); en 1958 detallan la técnica y sus posibles aplicaciones, extendiéndola a los importantes casos en que una corriente límite de difusión o un fenómeno de pasivación controlen el proceso de corrosión (79) y en 1959 (80) aportan un sólido apoyo experimental donde señalan las limitaciones fundamentales del método.

La Resistencia de Polarización, R_p se define como la tangente de la curva de polarización en el potencial de corrosión: E_{corr} .

En el caso de una reacción sencilla controlada por transferencia de carga, la corriente de corrosión está relacionada con la R_p por la ecuación de Stern & Geary:

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.3 (b_a + b_c)} \frac{\Delta I}{\Delta E} = B \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p}$$

Donde b_a y b_c son las pendientes de Tafel de las semirreacciones anódica y catódica respectivamente. Esta ecuación puede deducirse de varias maneras, dos de las cuales se analizan a continuación porque muestran varias de las aproximaciones matemáticas hechas y que están relacionadas con las limitaciones del método.

1) Aproximación de bajo campo de la ecuación general para un proceso controlado por activación (Buttler-Volmer):

En un proceso de corrosión se están llevando a cabo reacciones anódicas y catódicas, donde la corriente total (i_t) del proceso puede representarse por:

$$i_t = i_a - \left| i_c \right|$$

En el potencial de corrosión : $i_a = \left| i_c \right| = i_{\text{corr}}$

Y éstas están relacionadas logarítmicamente con el sobrepotencial de la siguiente manera:

$$i_a = i_{\text{corr}} \exp \frac{(1-\beta)nF\eta}{RT} \equiv i_a = i_{\text{corr}} \text{antilog} \frac{(1-\beta)nF\eta}{2.3 RT}$$

$$i_c = i_{\text{corr}} \exp -\frac{\beta nF\eta}{RT} \equiv i_c = i_{\text{corr}} \text{antilog} -\frac{\beta nF\eta}{2.3 RT}$$

Por lo tanto: $i_t = i_{\text{corr}} \left[\exp \frac{(1-\beta)nF\eta}{RT} - \exp -\frac{\beta nF\eta}{RT} \right]$

$$i_t = i_{\text{corr}} \left[\text{antilog} \frac{(1-\beta)nF\eta}{2.3 RT} - \text{antilog} -\frac{\beta nF\eta}{2.3 RT} \right]$$

Antilog X puede expandirse por la siguiente serie de potencias:

$$\text{antilog } X = 1 + \frac{2.3X}{1!} + \frac{(2.3X)^2}{2!} + \dots + \frac{(2.3X)^n}{n!}$$

Y si X en esta serie es pequeña, se puede despreciar desde el tercer término sin un error significativo y quedar así:

$$\text{antilog } X = 1 + 2.3X$$

Por lo que:

$$i_t = i_{\text{corr}} \left[1 + \frac{2.3(1-\beta)nF\eta}{2.3 RT} \right] - \left[1 - \frac{2.3\beta nF\eta}{2.3 RT} \right]$$

$$\text{Como } b_a = \frac{2.3RT}{(1-\beta)nF}$$

y

$$b_c = \frac{2.3RT}{\beta nF}$$

$$i = i_{\text{corr}} \left[\frac{2.3 \eta}{b_a} + \frac{2.3 \eta}{b_c} \right]$$

$$i = i_{\text{corr}} \left[2.3 \eta \left(\frac{1}{b_a} + \frac{1}{b_c} \right) \right]$$

Despejando i_{corr} y para $\eta \rightarrow 0$:

$$i_{\text{corr}} = \frac{di_t}{d\eta} \left[2.3 \left(\frac{1}{b_a} + \frac{1}{b_c} \right) \right]$$

$$i_{\text{corr}} = \frac{di_t}{d\eta} \left[2.3 \left(\frac{b_a + b_c}{b_a b_c} \right) \right] = \frac{b_a b_c}{2.3 (b_a + b_c)} * \frac{di_t}{d\eta}$$

Por lo tanto: $i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$

Donde: $B = \frac{b_a b_c}{2.3 (b_a + b_c)}$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{di_t}{d\eta}$$

- 2) Haciendo la primera derivada de la ecuación de una curva de polarización en el potencial de corrosión, como lo propone Mansfeld (B1):

Para cualquier potencial E:

$$i_t = i_{1a} - \left| i_{1c} \right| + i_{2a} - \left| i_{2c} \right| \quad (1)$$

De acuerdo a la teoría electroquímica, donde sólo existe polarización por transferencia de carga (Buttler-Volmer):

$$i_{1a} = i_{01} \exp \left[\frac{E - E_{r1}}{b_{1a}} \right] \quad (2)$$

$$\left| i_{2c} \right| = i_{02} \exp \left[\frac{E_{r2} - E}{b_{2c}} \right] \quad (3)$$

Así, sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en (1) y haciendo las consideraciones asumidas por Stern & Geary de que:

$$\left| i_{1c} \right| = \left| i_{2a} \right| \approx 0$$

O sea que el E corr debe estar bastante alejado de los potenciales de equilibrio (E eq) de las reacciones anódica y catódica; se tiene que:

$$i_t = i_{01} \exp \left[\frac{E - E_{r1}}{b_{1a}} \right] - i_{02} \exp \left[\frac{E_{r2} - E}{b_{2c}} \right] \quad (4)$$

E corr es el potencial donde $\Delta i = 0$, por lo tanto los dos términos de (4) se hacen iguales entre si e iguales a i corr, así:

$$i_{\text{corr}} = i_{01} \exp \left[\frac{E_{\text{corr}} - E_{r1}}{b} \right] = i_{02} \exp \left[\frac{E_{r2} - E_{\text{corr}}}{b} \right] \quad (5)$$

Derivando la ecuación (4) con respecto a E (para obtener la recta tangente en cualquier punto de la curva de polarización), tenemos:

$$\frac{di}{dE} = \left\{ i_{01} \exp \left[\frac{E - E_{r1}}{b} \right] \frac{b_{1a} (1-0) - (E - E_{r1}) (0)}{\left(\frac{b}{1a} \right)^2} + \right.$$

$$\left. \exp \left[\frac{E - E_{r1}}{b} \right] (0) \right\} - \left\{ i_{02} \exp \left[\frac{E_{r2} - E}{b} \right] \frac{b_{2c} (0-1) - E_{r2} - E (0)}{\left(\frac{b}{2c} \right)^2} + \right.$$

$$\left. \exp \left[\frac{E_{r2} - E}{b} \right] (0) \right\}$$

Así:

$$\frac{di}{dE} = \frac{i_{01}}{b} \exp \left[\frac{E - E_{r1}}{b} \right] + \frac{i_{02}}{b} \exp \left[\frac{E_{r2} - E}{b} \right] \quad (6)$$

Y la tangente en el punto $E = E_{\text{corr}}$ será:

$$\left(\frac{di}{dE} \right)_{E_{\text{corr}}} = \frac{i_{01}}{b} \exp \left[\frac{E_{\text{corr}} - E_{r1}}{b} \right] + \frac{i_{02}}{b} \exp \left[\frac{E_{r2} - E_{\text{corr}}}{b} \right] \quad (7)$$

Identificando términos de la ecuación (5) y sustituyendo i_{corr} en (7), obtenemos la ecuación de Stern & Geary:

$$\left(\frac{di_{\pm}}{dE}\right)_{E_{corr}} = \frac{i_{corr}}{b} \frac{1}{1a} + \frac{i_{corr}}{b} \frac{1}{2c} \quad (8)$$

Factorizando i_{corr} de la ecuación (8):

$$\left(\frac{di_{\pm}}{dE}\right)_{E_{corr}} = i_{corr} \left[\frac{1}{b} \frac{1}{1a} + \frac{1}{b} \frac{1}{2c} \right] \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación (9) para i_{corr} :

$$i_{corr} = \frac{\left(\frac{di_{\pm}}{dE}\right)_{E_{corr}}}{\left[\frac{1}{b} \frac{1}{1a} + \frac{1}{b} \frac{1}{2c}\right]} = \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{\frac{b}{b} + \frac{b}{b}}{\frac{b}{1a} * \frac{b}{2c}}} = \frac{b}{b} * \frac{b}{b} * \frac{1}{R_p} \quad (10)$$

Por lo tanto: $i_{corr} = \frac{B}{R_p}$

Donde: $B = \frac{b}{b} * \frac{b}{1a} \frac{b}{2c}$

$$\frac{b}{2c} = \frac{RT}{\beta nF}$$

y

$$\frac{b}{1a} = \frac{RT}{(1-\beta)nF}$$

III/ LIMITACIONES DEL METODO

Los mismos autores señalan algunas de las limitaciones del método de Resistencia de Polarización (80) como son:

1.- No es un método exacto, ya que está basado en una relación lineal entre la polarización aplicada y la corriente en el entorno del E corr. Esta relación resulta de una aproximación matemática: "La diferencia entre dos funciones logarítmicas (Ecuación de Buttler-Volmer) se aproximan a una función lineal cuando las funciones logarítmicas son del mismo orden de magnitud". (74).

2.- Presupone que las pendientes de Tafel permanecen constantes, lo que evidentemente no es el caso de algunos sistemas reales. Esto equivale a suponer B invariable.

3.- Requiere que no se produzcan caídas óhmicas apreciables en las capas de los productos de corrosión que eventualmente pueden recubrir los electrodos, o a través del electrolito.

4.- La R_p está realmente relacionada con la corriente en la intersección de las curvas de polarización anódica y catódica totales.

En la mayoría de los casos esta corriente corresponde a la i_{corr} (diagramas de Evans). Para que así sea es preciso que el E corr del sistema este alejado del los potenciales reversibles de las semirreacciones anódica y catódica. En caso contrario, la i estimada como i_{corr} puede deberse a

reacciones electroquímicas secundarias.

5.- Otra dificultad reside en la incertidumbre que introduce el desconocimiento de los valores de b_a y b_c . Aunque adaptando información previa, se puede determinar la velocidad de corrosión dentro de un factor máximo de error de 2.2 (74).

Aparte de las limitaciones indicadas por los autores, en muchos sistemas pueden presentarse algunas de las limitaciones siguientes:

6.- Desviaciones de la "relación lineal" entre potencial e intensidad en las proximidades de E_{corr} .

7.- Errores ocasionados por la variación del E_{corr} con el tiempo.

8.- Que se produzcan fenómenos de corrosión localizada.

9.- La existencia de un control de la corrosión por fenómenos de difusión o pasivación.

10.- La determinación de R_p antes de haber alcanzado las condiciones del estado estacionario.

11.- Perturbaciones inducidas en el electrodo de trabajo, es decir, la transformación del sistema metal/medio en otro distinto en el curso de las mediciones.

1.- Inexactitud del método.

Actualmente existen varios programas de computadora que a partir de la ecuación de Butler-Volmer o derivadas de ésta, determinan la i_{corr} y las constantes b_a y b_c en las proximidades de E_{corr} con sólo los datos de polarización e intensidad correspondiente a tres puntos de la curva, sin necesidad de hacer aproximación matemática alguna (82,83).

Pero la exactitud dentro de un factor de error de 2.2 no es preocupante, ya que en la práctica, la selección de materiales se basa en diferencias de varios órdenes de magnitud de la resistencia a la corrosión.

2.- Variaciones en las pendientes de Tafel.

En muchos sistemas las pendientes de Tafel varían con el tiempo pero ya Stern y Weisert (80) hacen constar que b_a y b_c varían por lo general entre 0.03 y 0.18, estando comprendidas la mayoría de las veces entre 0.06 y 0.12. Además la constante de proporcionalidad B entre R_p e i_{corr} es menos sensible a estos cambios al quedar afectados tanto el numerador como el denominador de B .

3.- La caída óhmica

En la actualidad, esta limitación ha perdido importancia ya que la mayoría de los potencióstatos que existen en el mercado están equipados para compensar instrumentalmente la caída óhmica (IR) por compensación "feedback".

También se puede afrontar este problema utilizando sonda Luggin o utilizando una técnica de interrupción de corriente en la que desaparece instantáneamente la componente óhmica del potencial, o medir la R_p a diferentes distancias de los electrodos de trabajo y de referencia y extrapolarla a distancia cero.

4.- Proximidad entre E_{corr} y los potenciales de equilibrio

La proximidad entre E_{corr} y los potenciales de equilibrio de las semirreacciones anódica y catódica sí que descarta la aplicación del método a tales sistemas, ya que da una información global de todos los procesos redox que ocurren en el electrodo, sean o no de corrosión, conduciendo entonces a sobreestimaciones inadmisibles de i_{corr} .

5.- Incertidumbre en las pendientes de Tafel.

El factor de 2.2 antes mencionado, puede reducirse considerablemente cuando se conocen las reacciones electroquímicas del sistema. Lo que permite una estimación teórica de las pendientes de Tafel, o bien determinándolas experimentalmente. Sin embargo, aún desconociendo los valores de b_a y b_c , si se escogen los límites máximos en los que pueden variar b_a y b_c como se vio en la limitación No. 2; se observa que los límites de variación de B se sitúan entre 0.013 y 0.052 V que conducen a un factor máximo de error de 2.2 si se elige un valor intermedio de 0.026 V.

Actualmente existen en la literatura muchas tablas de los valores encontrados por diferentes autores para la constante

B que abarcan un gran número de interfases metal/electrolito.

6.- Desviaciones de la relación lineal en las proximidades de E_{corr} .

Mansfeld y Oldham (81) derivaron una expresión matemática exacta para una curva de polarización en el potencial de corrosión.

De donde se puede ver que una curva de polarización sólo sería lineal en el punto de inflexión si y sólo si $b_a = b_c$, de modo que resulta inapropiada la denominación de "método de polarización lineal" como se conoce frecuentemente al método de resistencia de polarización. Para las polarizaciones usuales de ± 10 mV el error cometido al linealizar los datos es muy improbable que sobrepase al 50% (84,85) aún en condiciones especialmente adversas, siendo en la mayoría de los casos muy inferior.

7.- Variación de E_{corr} con el tiempo.

La inestabilidad de E_{corr} puede representar en la práctica una limitación tan importante que haga inaplicable el método, o bien carezca de importancia.

El primer caso se daría cuando se producen fluctuaciones erráticas y rápidas del potencial, del mismo orden de magnitud o mayores que la polarización aplicada o con un periodo de fluctuación semejante o menor que el tiempo aplicado en la medición de R_p .

En el segundo caso se presentan fluctuaciones lentas de E_{corr} , donde normalmente se pueden obtener valores fiables de R_p , debido a la rapidez de las medidas, aunque la amplitud

de las fluctuaciones sea muy superior al ΔE aplicado.

8.- Fenómenos de Corrosión Localizada.

Cuando se producen fenómenos de corrosión localizada, la información suministrada por el Método de Resistencia de Polarización, puede inducir a errores graves, no obstante, no debe inferirse de ello su total inutilidad, en tales circunstancias, depende de lo que se pida al mismo.

Sería absurdo estimar una vida de servicio por el cálculo de la penetración del ataque, al ignorarse ésta por desconocimiento de la fracción de superficie afectada.

Sin embargo, el método puede informar perfectamente sobre el momento en que se inicia el ataque local, detectado por variaciones de R_p de uno o varios órdenes de magnitud; de la probabilidad de que se produzca en unas condiciones dadas y de la influencia de los diversos factores de corrosión sobre dicha probabilidad.

9.- Control por difusión o pasivación.

Generalmente el primer tramo de las curvas de polarización se ajusta a una polarización por activación, aunque para intensidades más altas puede controlar a la semirreacción catódica un proceso de difusión y a la anódica un fenómeno de pasivación.

Cuando coexisten varios tipos de polarización puede suceder que según las condiciones para la estimación de i_{corr} , deba tenerse en cuenta uno u otro.

Si la i_L o i_p son demasiado grandes para influir en la cinética de corrosión, será válida la expresión normal de la

fórmula de Stern & Geary:

$$i_{\text{corr}} = \frac{R}{R_p}$$

En caso contrario se estimará i_{corr} a partir de ecuaciones simplificadas:

$$i_{\text{corr}} = \frac{b_a}{2.3 R_p} \quad \text{Cuando existe } i_L \text{ muy pequeña}$$

y

$$i_{\text{corr}} = \frac{b_c}{2.3 R_p} \quad \text{Cuando existe } i_p \text{ muy pequeña}$$

10.- El estado estacionario.

Esta limitación puede dar origen a errores importantes en materiales con velocidades de corrosión muy pequeñas. Ya que la estimación de velocidad de corrosión antes de alcanzar el estado estacionario conduce a la obtención de velocidades de corrosión en exceso. Esto puede resolverse utilizando curvas potencioestáticas y no intensioestáticas, o curvas potenciodinámicas con un barrido de potencial entre 2.5 y 10 mV/min.

11.- La perturbación del electrodo.

Esta limitación es importante sobre todo en materiales con velocidad de corrosión muy pequeña, ya que al esperar un tiempo muy grande o utilizar barridos de potencial muy lentos para asegurar las condiciones de estado estacionario, conduce a considerables errores por defecto, de la estimación de

i corr cuando se altera el electrodo. Esta limitación puede resolverse favorablemente como se mencionó en el punto anterior.

V/ TECNICAS PARA EVALUAR Rp:

En la práctica, la Rp puede obtenerse por varias técnicas:

- 1) Ensayos Potenciostáticos (86)
- 2) Ensayos Potenciodinámicos (86)
- 3) Ensayos Intensiostáticos (86)
- 4) Curvas de análisis de carga (87)
- 5) Pulsos coulométricos (87)
- 6) Impedancia a.c. (87)

La selección de la técnica para el estudio de la cinética de corrosión de un sistema metal/medio particular debe ser un compromiso entre las diferentes ventajas y desventajas de ellas.

Por lo que la mejor técnica será aquella que dentro de sus consideraciones teóricas mejor represente las condiciones reales del comportamiento del sistema.

En el caso particular del acero embebido en el concreto, se reporta en la bibliografía (87,88) que las técnicas potenciostáticas y potenciodinámicas han demostrado ser las más útiles por la facilidad y rápido cálculo de las velocidades de corrosión instantáneas, sin necesidad de equipo sofisticado.

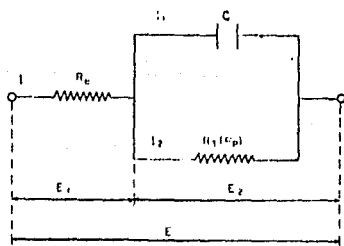
VI/ TECNICA POTENCIOSTATICA PARA EVALUAR LA VELOCIDAD DE CORROSION INSTANTANEA DE LOS REFUERZOS DE ACERO EN EL CONCRETO

Electroquímicamente un sistema metal/medio puede considerarse como un conjunto de innumerables pilas locales de corrosión, que en el estado estacionario actúan con un potencial mixto E_{corr} y provocan una reacción de corrosión proporcional a i_{corr} .

La alteración del sistema con una mínima polarización ΔE , permite medir un ΔI , y a partir de la relación $\Delta E / \Delta I = R_p$, estimar i_{corr} por la fórmula de Stern & Geary.

Para explicar lo que sucede en una interfase metal/medio al aplicar un escalón de potencial se han propuesto circuitos equivalentes que esquematizan lo que sucede en estas interfases electrificadas.

Un circuito equivalente de una interfase metal/electrolito puede ser el de Randles:



Circuito equivalente de una interfase metal-electrolito. R_e representa la resistencia del medio y las capas superficiales del electrodo, C , la capacidad de la doble capa y R_p (R_1/C_p), la resistencia faradaica o de transferencia, que se opone a la reacción de corrosión y sirve para estimar su velocidad.

Donde:

R_e = Resistencia del electrolito

C = Capacitancia de la doble capa eléctrica

R_t = Resistencia de transferencia de carga, magnitud equivalente a R_p si $R_p \gg R_e$, como ocurre normalmente.

Al aplicar una señal de potencial al circuito equivalente de la figura anterior, su respuesta se ajusta a la ecuación siguiente:

$$I_t = \frac{\Delta E}{R_e(R_e + R_p)} \left\{ R_e + R_p \exp - \left[\frac{t}{C \frac{R_e * R_p}{R_e + R_p}} \right] \right\}$$

Donde I_t es la respuesta en corriente frente al tiempo "t". La respuesta a un escalón de potencial, ΔE , tiene un componente estacionario:

$$I_{\infty} = \frac{\Delta E}{R_e + R_p}$$

Y otro transitorio:

$$I_{tr} = \frac{\Delta E * R_p}{R_e(R_e + R_p)} \exp - \left[C \frac{t}{\frac{R_e * R_p}{R_e + R_p}} \right]$$

Cuya velocidad de atenuación viene regulada por la constante de tiempo:

$$\tau_E = C \frac{R_e * R_p}{R_e + R_p}$$

Que para $R_p \gg R_e$, como suele ser el caso de muchos sistemas reales, tiende al valor:

$$\tau_E = CR_e$$

Bajo excitación potencioestática, como es muy frecuente que R_e sea varios órdenes de magnitud menor que R_p aún en los

sistemas que permanecen en estado pasivo como pueden ser los aceros inoxidable en muchos medios o el acero estructural den el concreto exento de cloruros y sin carbonatar (89) puede llegarse al estado estacionario en pocos segundos.

Resulta evidente la ventaja de recurrir en tales casos a la aplicación de un escalón de potencial ΔE , para llegar rápidamente a un ΔI estable y en consecuencia a valores fiables de R_p y de i_{corr} . No resulta obligatorio recurrir a técnicas de impedancia con corriente alterna que determinan R_p (R_T) en regimenes transitorios. Tampocos es recomendable realizar ensayos intensiostáticos donde se necesitan tiempos muy grandes para llegar al estado estacionario comparados con los tiempos necesarios en los ensayos potenciostáticos.

En los ensayos potenciostáticos para un tiempo $t = 3\tau$, el componente transitorio de la intensidad se habrá reducido al 5% ($1/e^3$) y a menos del 1% ($1/e^5$) para $t = 5\tau$.

Como primera aproximación puede concluirse que al aplicar un ΔE debe aguardarse un tiempo entre 5 y 6 τ_e antes de medir el ΔI para calcular la R_p .

En la práctica la técnica potenciostática para evaluar la i_{corr} instantánea consiste en lo siguiente:

- 1) Se conecta una celda de tres electrodos a un potenciostato

- 2) Se conecta la salida de corriente del potencióstato a un graficador X - t
- 3) Se mide el E corr
- 4) Se hace la compensación de caída óhmica por el circuito "Feedback" del potencióstato.
- 5) Se da un pulso de ± 10 mV a partir del E corr. (En los ensayos realizados en este trabajo, el pulso fue de +10 mV)
- 6) Se mide la corriente al llegar al estado estacionario (En los ensayos hechos sobre las probetas de mortero, el tiempo al cual se midió la corriente fue de 30 seg.).
- 7) Con los datos obtenidos de ΔE y de ΔI se obtiene la i corr aplicando la ecuación de Stern & Geary.

En este trabajo se tomó como valor de B el de 26 mV, ya que no se conocían las pendientes de Tafel, y en varios trabajos publicados sobre el tema (54) se muestra una buena correlación entre pérdidas de peso gravimétricas y electroquímicas empleando este valor de B.