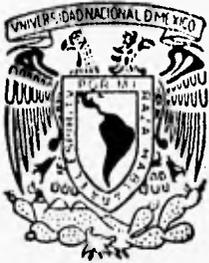


8
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA



**DEGRADACION DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO
EN EDIFICIOS DE CIUDAD UNIVERSITARIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P E S E N T A :

OSCAR GARCIA RODRIGUEZ



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 esta 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.

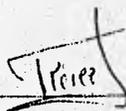
JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	Prof. Joan Genescà Longueras.
VOCAL	Prof. Antonio Huerta Cerdan
SECRETARIO	Prof. Tezozómoc Pérez López
1er. SUPLENTE	Prof. Francisco Javier Rodríguez Gómez
2do. SUPLENTE	Prof. Carlos Rodríguez Rivera

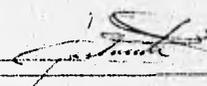
SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Biblioteca de Derecho , edificios "A" y "D" de Química
en Ciudad Universitaria
México D.F.

ASESOR DEL TEMA : M en C. Tezozómoc Pérez López



SUPERVISOR TECNICO: Ing. Hornero Castañeda López



SUSTENTANTE: Oscar García Rodríguez



A MI MADRE.

A QUIEN AGRADEZCO SU VALIOSA AYUDA. POR QUE DENTRO DE SUS POSIBILIDADES. CONTRIBUYO AL LOGRO DE UNA DE MIS METAS.

A MI HERMANA RAQUEL.

LO LOGRASTE. SE QUE ESTE TRIUNFO LO SIENTES COMO SI FUERA TUYO TAMBIEN. TODAVIA RECUERDO CUANDO ME ENSEÑASTE A LEER Y ESCRIBIR. ESTA ES LA RESPUESTA A TU ESFUERZO Y DEDICACION.

A MIS HERMANAS.

ALICIA, ROSA, ELSA. DE QUIENES SIEMPRE TUVE APOYO PARA PODER CONTINUAR Y LOGRAR ESTA META

GRACIAS A LAS TRES !!!

A MI NOVIA GINA LUCIANO O.

SOLO TE PUEDO DECIR QUE LLEGASTE Y ESTUVISTE CON MIGO CUANDO MAS TE NECESITE. GRACIAS POR TU COMPAÑIA Y POR AYUDARME A ELABORAR LA TESIS.

INDICE

PROLOGO.	1
Capitulo 1) INTRODUCCION.	2
1.1) Características del concreto.	3
1.2) Objetivos de la tesis.	14
Capitulo 2) PRINCIPIOS DE CORROSION.	15
2.1) Potencial electroquímico.	20
2.2) Tipos de corrosión.	23
Capitulo 3) DEGRADACION DEL CONCRETO REFORZADO.	28
3.1) Deterioro debido a malas prácticas constructivas.	28
3.2) Deterioro intrínseco del concreto.	28
3.3) Deterioro químico de la pasta de cemento.	32
3.4) Degradación del acero de refuerzo.	35
Capitulo 4) CORROSION EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO POR CARBONATACION.	41
4.1) Degradación química del cemento por carbonatación.	41
4.2) Corrosión en el acero de refuerzo por carbonatación.	47
Capitulo 5) PARTE EXPERIMENTAL.	50
5.1) Inspección de las estructuras de concreto reforzado.	51
5.2) Fundamentos de los métodos para la determinación del estado del concreto reforzado.	52
5.2.1) Potencial de media celda.	52
5.2.2) Resistividad.	59
5.2.3) Carbonatación.	66
5.3) Procedimientos experimentales para la determinación del estado del concreto reforzado.	69
5.3.1) Medición del potencial de media celda.	69
5.3.2) Medición de la Resistividad.	71
5.3.3) Medición de la Carbonatación.	72

Capítulo 6) EVALUACION DEL ESTADO DEL CONCRETO REFORZADO.	73
6.1) Resultados y análisis de resultados de las estructuras seleccionadas.	74
6.1.1) Edificio "A" de Química.	74
6.1.2) Edificio "D" de Química.	95
6.1.3) Biblioteca de Derecho.	126
6.2) Conclusiones.	129
6.3) Recomendaciones.	130
Bibliografía.	132

A MI ASESOR TEZOZOMOC PEREZ LOPEZ.

GRACIA POR PERMITIRME ELABORAR LA TESIS CONTIGO Y POR CONTAR CON TU COMPLETO APOYO PARA EL DESARROLLO DE LA MISMA.

A HOMERO CASTAÑEDA L.

QUIEN ME OFRECIO SU AMISTAD Y APOYO PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS. ESPERO QUE TE VAYA BIEN EN TU DOCTORADO !!.

A FRANCISCO CORTES RUIZ.

UNA BUENA AMISTAD SIEMPRE SE DEBE DE CUIDAR Y CONSERVAR, AUNQUE A TI TE CONSIDERO MAS QUE UN AMIGO. GRACIAS POR TODO.

A MIS AMIGOS.

ROMA, NOHELIA, NOHELIO, ARTURO, GONZAGUITA, TENORIO, MARTINIANO, ETC..., CON LOS CUALES CONVIVI E HICIERON MAS AGRADABLE MI ESTANCIA EN LA UNAM.

AL PERSONAL ACADEMICO DE LA UNAM.

QUE CUENTA CON LOS CONOCIMIENTOS, EL CRITERIO, LA ETICA Y LA MORAL, SUFICIENTES PARA HACER DE LOS JOVENES PERSONAS UTILES A LA SOCIEDAD.

A LA MAXIMA CASA DE ESTUDIOS "U. N. A. M."
A LA CUAL AGRADEZCO EL HABERME DADO TANTO.....

AL PERSONAL DE VIGILANCIA DE LA UNAM.

QUE BRINDO LAS FACILIDADES PARA EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.

PROLOGO

La corrosión involucra a factores económicos y de seguridad que no se consideran en muchos casos, aunque en años recientes se ha tenido particular interés por la degradación del concreto debido a problemas que se han tenido con algunas estructuras.

El concreto y a su vez el cemento, está compuesto principalmente por cal y sílica, la sílica es un ácido muy débil y la cal una base fuerte, por lo que un ácido débil como lo es el CO_2 convertirá la pasta de cemento a carbonato de calcio y sílica por lo que la velocidad de deterioro estará determinada por el pH del concreto.

El presente trabajo tiene la finalidad de evaluar el estado en el que se encuentran las estructuras de concreto de algunos edificios en Ciudad Universitaria con el objeto de conocer la degradación sufrida por el medio ambiente.

El concreto sirve como recubrimiento para la varilla de refuerzo por lo que debe ser resistente al deterioro químico y si este no se mantiene en buenas condiciones, es decir, este fisurado y cambien sus características físicas o químicas por agresiones externas no se podrá esperarse su buen desempeño.

Uno de los factores para el buen funcionamiento del concreto es su fabricación, ya que en ocasiones se adiciona más agua de la debida para facilitar su manejo sin tomar en cuenta que esto determinara en gran medida su resistencia al deterioro químico debido a que existirá menor o mayor cantidad de porosidades en el mismo.

El concreto es uno de los materiales más importantes de la industria de la construcción ya que hace posible la infraestructura de todos los países del mundo.

Capítulo 1) INTRODUCCION

El estudio y conocimiento de los fenómenos de corrosión son de gran importancia ya que involucran a factores económicos y de seguridad humana que no se consideran en muchos casos. En general la corrosión es la causa de alteración y destrucción de los materiales naturales procesados por el hombre donde se involucra la recuperación y en ocasiones sustitución de los elementos afectados.

Los problemas que comúnmente produce la corrosión son:

- a) Económicos.- Pérdidas de elementos afectados que ocasionan una reducción en la eficiencia o un mantenimiento costoso.
- b) Conservación de recursos.- Agotamiento de los recursos naturales.
- c) Seguridad humana.- Fallos en medios de transporte, corrosión en casas habitación y contenedores de material tóxico o peligroso.

Estudios alrededor del mundo han mostrado un costo estimado de la corrosión de entre el 2 al 5 % del producto nacional bruto (PNB) de cada país⁽¹⁾, tal como se muestra en la tabla 1.

Es importante señalar que en México aún no se disponen de datos sobre el costo de la corrosión, sin embargo, existen datos estadísticos donde se encontró que más del 90% de las empresas encuestadas reportaron problemas de corrosión⁽²⁾.

Año	País	Millones de dólares (MDD)	% del PNB
1949	USA	5500	
1960-61	India	320	
1964	Suecia	58-77	
1965	Finlandia	47-62	0.58 a 0.77
1968	RFA	8000	3
1969	URSS	6700	2
1969	Inglaterra	3200	6.5
1973	Australia	550	1.5 a 6
1974	URSS	18500	4.1
1975	USA	70000	4.2
1976-77	Japón	9200	1.8

Tabla 1.- Costos debido a la corrosión

1.1) Características del concreto.

La palabra concreto viene del latín "concretus" que significa compuesto⁽³⁾, este consiste en una mezcla de:

A) Agregados finos.

Pueden ser arenas naturales o productos de trituración cuyas partículas son generalmente óxidos metálicos o silicatos de tamaño muy pequeño y uniforme menores a un 1/4 de pulgada.

B) Agregados gruesos.

Consiste en grava conformada al igual que la arena por óxidos metálicos y silicatos además de piedras, por lo que el tamaño de las partículas es generalmente mayor de 1/4 de pulgada y no es uniforme.

C) Cemento.

Este es una mezcla de clínker proveniente de la calcinación de una mezcla de caliza (CaCO_3) y arcilla (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) a una temperatura de aproximadamente 1500°C en un horno rotatorio con un pequeño porcentaje de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), los cuales se muelen hasta lograr un tamaño de partícula muy fino.

Existen varios tipos de cemento los cuales se clasifican en:

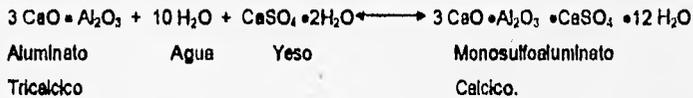
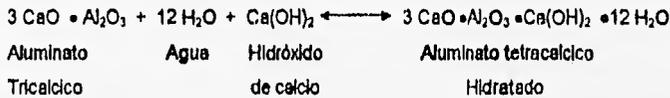
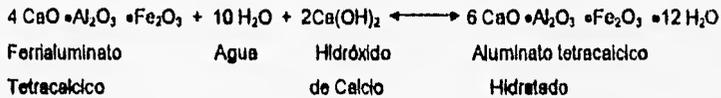
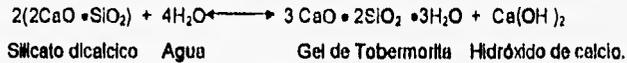
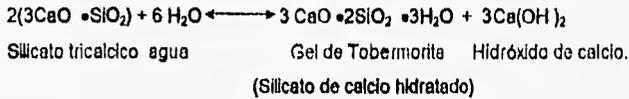
1.- Cemento portland.

Se dice que es un cemento hidráulico por que reacciona químicamente con el agua dando lugar a productos de hidratación insolubles responsables de la solidificación y del desarrollo de la resistencia mecánica. A continuación se presentan algunos componentes del cemento portland, así como sus productos de hidratación.

Reacciones del cemento portland con agua⁽²¹⁾.

Componentes.

Productos de hidratación.



El cemento Portland es uno de los más importantes debido a que es el de mayor uso, por lo que existen cinco tipos tal como se muestra en la tabla 2⁽²¹⁾.

COMPONENTE		TIPO DE CEMENTO				
		% EN PESO				
		I	II	III	IV	V
SILICATO TRICALCICO	C ₃ S	51	46	58	26	39
SILICATO DICALCICO	C ₂ S	25	32	16	54	43
ALUMINATO TRICALCICO	C ₃ A	9	4	8	2	2
FERRIALUMINATO TETRACALCICO	C ₄ AF	8	12	8	12	8
OTROS COMPONENTES		7	6	10	6	8

Tabla 2.- Proporciones típicas de los tipos de cemento portland

2.- Cemento compuesto.

Este es una mezcla de cemento tipo IP, cemento portland con 25 a 65 % en peso de escorias de altos hornos, tipo IS y puzolana (15 a 40 % en peso de puzolana),

3.- Cemento escoria.

El cemento de escoria tipo S, es una mezcla de cal hidratada y escoria de altos hornos, finamente granulada, hasta en un 60 % en peso, este tipo de cemento regularmente no se emplea ya que se produce baja resistencia mecánica.

4.- Cemento natural.

Este se obtiene de la calcinación de calizas y arcillas finamente divididas, a una temperatura menor que la de descarbonatación, no tiene uniformidad en sus propiedades, por lo que se mezcla con cemento portland para producir el concreto.

5.- Cemento de alta alúmina.

Este tipo de cemento es resistente al ataque de los sulfatos, esta conformado por partes iguales de alúmina y cal (alrededor de 40 % en peso de cada una), con algunos óxidos de hierro y aproximadamente 8 % de sílice, este tipo de cemento es sustituido generalmente por el portland ya que con el tiempo produce baja resistencia mecánica.

6.- Cemento expansivo

Estos son los que aumentan de volumen en los primeros días, por lo que se obtiene un tipo de concreto preesforzado al restringir esta expansión por medio del acero de refuerzo.

D) Acero de refuerzo.

El tipo de acero empleado para la industria de la construcción es el acero estructural que debe poseer propiedades tales como, alta resistencia a la tensión, buena ductilidad, tenacidad y soldabilidad.

Esta constituida por una matriz de hierro y carbono principalmente pudiendo contener elementos aleantes tales como Mn, Si, Cr, Mo.

El material clásico para el refuerzo del concreto es la varilla, aunque también se pueden emplear fibras sintéticas o cables, por lo que existen otros tipos de concreto reforzado que son los prestresados.

Este concreto es un hallazgo tecnológico reciente y el prestuerzo consiste en introducir un estado de esfuerzos mediante el tensado de cables de alta resistencia previos a la aplicación de las solicitaciones de carga de tal forma que se anulen o limiten los esfuerzos de tensión durante su vida útil.

Existen 2 modalidades, las cuales son:

1.- Prestensado

Este se efectúa antes de colar el elemento, por lo que generalmente se efectúa durante la fabricación.

2.- Postensado

Este se aplica en la obra, después de que el elemento ha fraguado y el concreto ha alcanzado sus resistencia de diseño.

La calidad de la pasta de cemento obtenida, como se explicará más adelante, depende de la relación agua/cemento, por lo que la cantidad de agua que se utiliza para mezclar el concreto es un poco mayor que la necesaria para la hidratación del cemento debido a que el concreto es necesario que sea plástico y manejable. Las proporciones típicas para la fabricación de concreto son:

1.- En un concreto con aire incluido.

A) Cemento (15%), agua (18%), aire (8%), a. Fino (28%), a. Grueso (31%)

B) Cemento (7%), agua (14%), aire (4%), a. Fino (24%), a. Grueso (51%)

2.- Concreto sin aire incluido.

A) Cemento (15%), agua (21%), aire (3%), a. Fino (30%), a. Grueso (31%)

B) Cemento (7%), agua (16%), aire (0.5%), a. Fino (25.5%), a. Grueso (51%)

Por lo que para su fabricación, ya sea con aire o sin aire incluido, es conveniente emplear mezclas ricas en cemento, con agregados pequeños

En general el concreto es un material heterogéneo multicomponente cuyas características y propiedades son dadas por la suma de cada uno de sus componentes, puede tener alta o baja permeabilidad (cantidad de espacios vacíos que pueden ser ocupados por agua) y porosidad (Fig. 1) dependiendo de la relación agua cemento empleada⁽³¹⁾ tal como se muestra en el gráfico 1, lo que en gran medida va a determinar su comportamiento con respecto a la corrosión.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (PM/S)

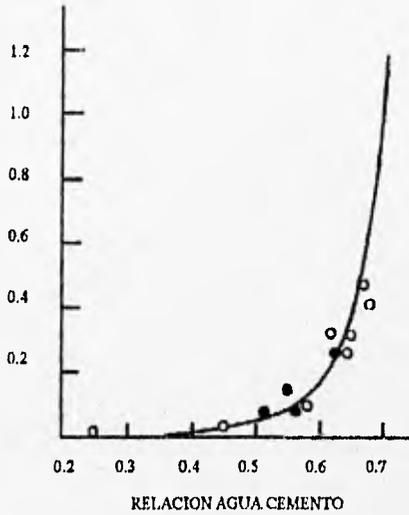


Gráfico 1.- Relación entre la permeabilidad y la relación agua/cemento (a/c). Donde la permeabilidad es inversamente proporcional a la distribución y volumen de poros

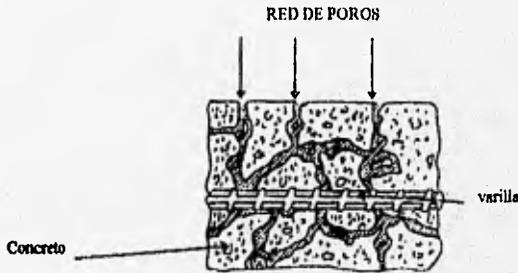


fig. 1.- Red de poros en el concreto.

El concreto presenta bajo ciertas condiciones de humedad 3 fases (Fig. 2):

A) Una fase sólida.

Compuesta por la pasta de cemento, arena, grava y la varilla de acero.

B) Una fase líquida⁽²²⁾.

Conocida como solución poro que posee un pH mayor de 13.5, debido a la presencia de óxidos alcalinos tales como Na_2O y K_2O , que se disuelven en el agua disponible de los poros formando iones sodio (Na^+) y potasio (K^+) en conjunto con los iones hidroxilo (OH^-) que se encuentran en equilibrio con una concentración de iones Ca^{2+} de 0.0004 a 0.0036 mol. que proveen alta alcalinidad al concreto.⁽²³⁾

Esta fase puede desaparecer y después reaparecer, bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura.

C) Una fase gaseosa.

Constituida principalmente por aire presente en los poros, puede estar presente dependiendo del grado de saturación de los poros en el concreto, es decir, dependiendo de la cantidad de agua que tenga el poro, este determinará la cinética y los mecanismos de corrosión en la intercara acero/concreto.

SOLIDO (VARILLA, CEMENTO)



LIQUIDO (SOLUCION PORO)

GAS (AIRE)

Fig. 2 Fases en el concreto.

El concreto por sí solo proporciona una gran resistencia a los esfuerzos de compresión y muy pequeña a los esfuerzos de tracción, por otra parte, la varilla de acero es muy resistente a los esfuerzos de tracción o flexión, por lo que si se emplea la varilla de acero como refuerzo en el concreto, se obtiene un material más resistente que el concreto mismo, pero para que este se considere de buena calidad, también debe ser resistente y durable, esto es que resista lo mayor posible al deterioro químico de la pasta de cemento, así como a la corrosión del acero embebido.

El elevado valor del pH de los productos de la hidratación del cemento portland (como el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la pasta de cemento endurecida y la solución poro, permiten que se forme una película compacta pasivante de óxidos de hierro (Fig. 3), constituida principalmente por Magnetita (Fe_3O_4) y en menor grado por Hematita (Fe_2O_3) y Wustita (FeO). Esta película pasivante se adhiere a la varilla de acero protegiéndola bajo ciertas condiciones de la corrosión (disolución anódica de la varilla).

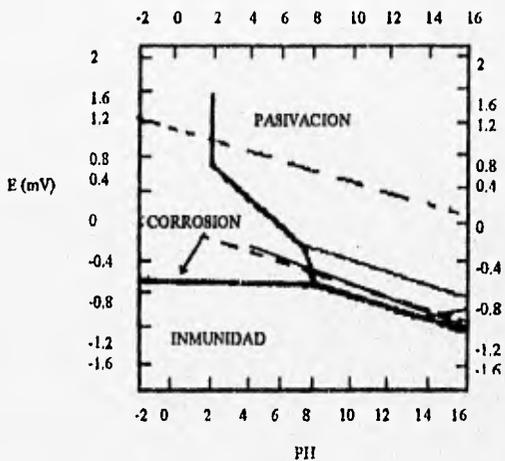


Fig. 3.-Diagrama de pourbaix para hierro⁽⁹⁾.

A continuación se muestran diagramas de Pourbaix para el hierro⁽²⁴⁾, en los cuales se observan las zonas de equilibrio entre las diferentes especies presentes en el sistema, así como las condiciones teóricas para los estados de pasividad e inmunidad y corrosión en función del potencial y pH del sistema a una temperatura de 25 °C.

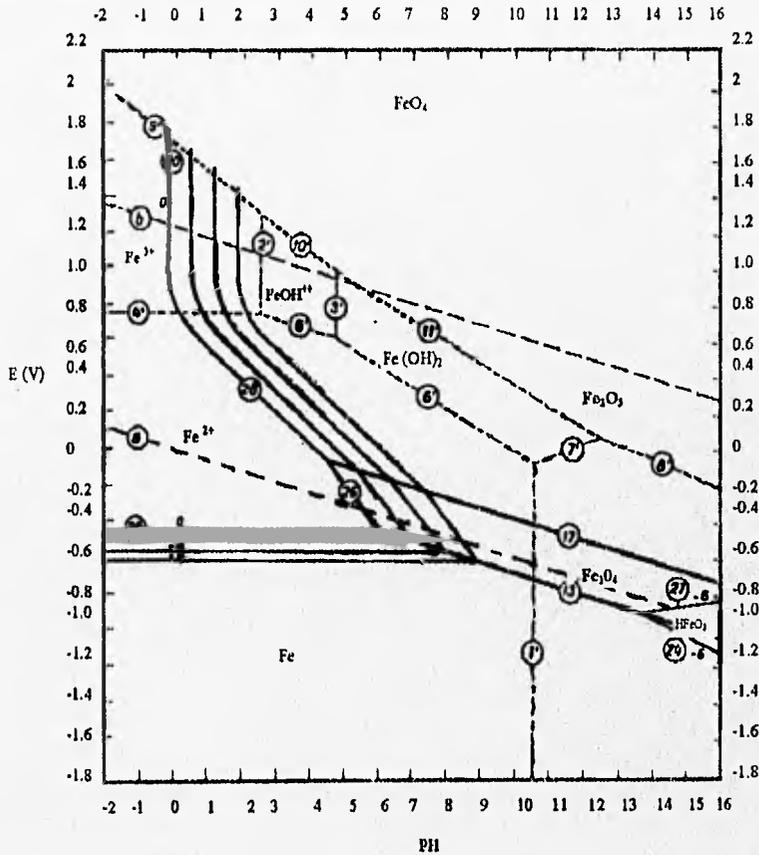


Fig. 4.- Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H₂O a 25 °C considerando óxidos

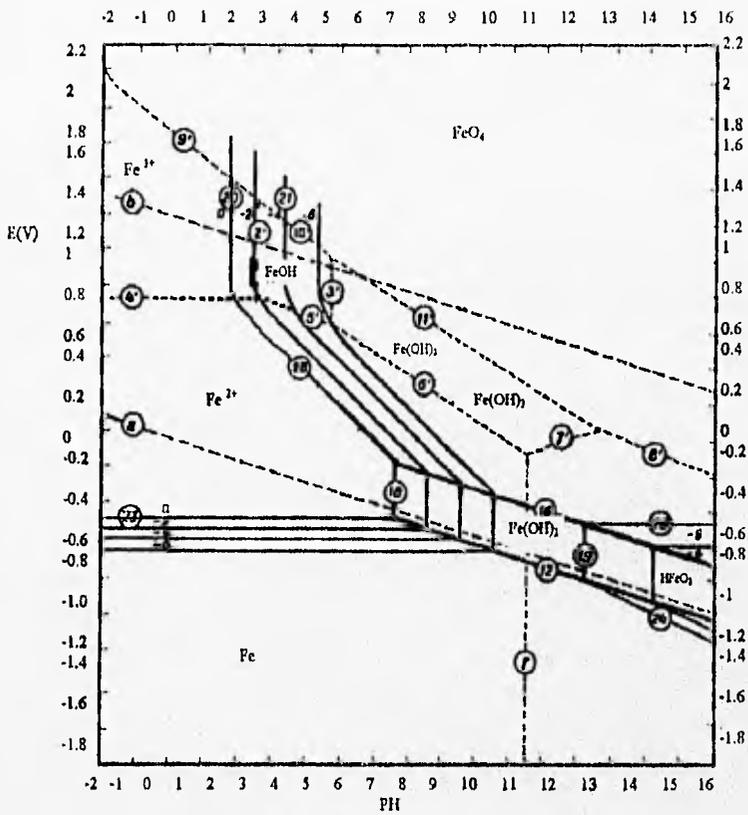


Fig. 5.- Diagrams de Pourbaix para el sistema Fe-H₂O considerando hidróxidos

Podemos representar más claramente el proceso de formación de la película pasivante, bajo las condiciones adecuadas del pH, contenido de humedad y temperatura como:

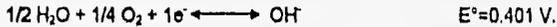
A.- La disolución parcial de hierro por oxidación.

En el ánodo, el hierro se oxida a iones ferrosos.

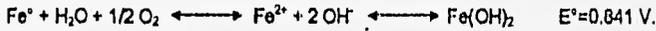


B.- La reducción del oxígeno a iones OH⁻.

En el cátodo el oxígeno se reduce a iones OH⁻, debido al alto pH, del concreto y a la presencia de oxígeno disuelto.



La reacción total es:



A su vez la reacción anódica, $\text{Fe} \longleftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$ es balanceada por la reducción catódica, bajo condiciones de humedad y cuando el acceso de oxígeno es limitado.



Al secarse y aumentar el oxígeno disponible la magnetita se reoxida a la formación férrica con una ganancia neta de $0.5 \text{Fe}_2\text{O}_3$.



Cabe señalar que bajo condiciones de humedad y en presencia de oxígeno, la Magnetita se convierte en hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

A temperaturas comprendidas entre 303 -373 °K, se tiene que⁽²⁶⁾ :



Una buena película pasivante debe tener las siguientes características:

- Baja conductividad iónica.
- Baja solubilidad química.
- Alta conductividad electrónica.
- Baja velocidad de disolución.
- Amplio intervalo de potencial, en el que sea termodinámicamente estable.
- Buena adherencia al metal.
- Alta resistencia a la compresión.

1.2) Objetivos de la tesis.

- Evaluar el estado de las estructuras de concreto en diversos edificios en Ciudad Universitaria para conocer la degradación sufrida por el medio ambiente urbano.
- Contribuir con este trabajo a los estudios de corrosión que demanda el país.
- Emplear algunas técnicas de nivel laboratorio a estudios de campo con el equipo disponible para la determinación de la resistividad del concreto, los potenciales de media celda y la profundidad o avance de la carbonatación.

Capítulo 2) PRINCIPIOS DE CORROSION

Podemos definir a la corrosión como un proceso natural de deterioro debido a una interacción con el medio ambiente⁽⁹⁾ y para poderla contabilizar se pueden recurrir a herramientas tales como el análisis de la energía libre del sistema:

$$\Delta G^{\circ} = - nFE^{\circ}$$

Donde:

n- Es el número de electrones transportados.

F- Es la constante de faraday.

E°- Es la diferencia de potencial electroquímico en condiciones estandar.

Por lo que:

$$\boxed{\text{El cambio de energía libre de reacción del sistema}} = \boxed{\text{Energía libre de los productos}} - \boxed{\text{Energía libre de los reactivos}}$$

Cuando el sistema tiene una energía libre negativa, el metal es activo presentándose la corrosión, cuando la energía libre del sistema es cero o positiva, el metal no presenta corrosión.

Los metales que utilizamos comúnmente no se encuentran puros en la naturaleza, si no combinados con otros elementos formando óxidos y sulfuros principalmente, conocidas como menas, por lo que se dice que se encuentran en forma estable o con una energía libre positiva o cero.

Para reducirlos a forma metálica, es necesario aplicar cierta cantidad de energía por lo que la corrosión producirá por lo tanto una tendencia del metal a regresar a su estado más estable, es decir, ocasiona que estos regresen a sus menas originales, por lo tanto cuanto más energía se necesite para reducir a un metal como se observa en la tabla 3, más fuerte será la tendencia para que regrese a su estado más estable y tenderá por tanto a corroerse con mayor rapidez.

Mayor requerimiento de energía, mayor tendencia a la corrosión	Activo	Potasio Magnesio Berilio Aluminio Zinc Cromo Hierro Níquel Estaño Cobre Plata Platino
Menor tendencia a la corrosión, menor requerimiento de energía	Noble	Oro

Tabla 3.- Representación de la serie galvánica

Todos los metales poseen una tendencia diferente a corroerse en un mismo medio, es decir, algunos son más resistentes que otros. Los metales con menor tendencia a corroerse son los metales menos activos o nobles y se les conoce como metales catódicos (oro, plata, platino, etc.). En cambio los metales menos nobles que son más activos se les conoce como metales anódicos.

Podríamos decir entonces que la corrosión es un proceso electroquímico mediante el cual un metal intenta volver a su estado natural o de menor energía y para que se presente dicho proceso se requiere que existan ciertas condiciones tales como:

A) Un ánodo.

El ánodo es la superficie o porción metálica donde tendrá lugar la corrosión, por lo que al disolverse dicha superficie se liberan electrones, estos posteriormente pasan a través del contacto eléctrico y llegan hasta el cátodo.

B) Un cátodo.

El cátodo es la superficie en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con los iones presentes en el electrolito, efectuándose así una reducción.

C) Un electrolito ionizado.

El electrolito es el medio en el cual se difunden los iones y los productos de la corrosión, funcionando solo como medio de transporte electrónico.

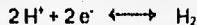
D) Un contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo.

El contacto eléctrico consiste en una unión metálica entre el ánodo y el cátodo, encargado de transportar los electrones generados en el ánodo hasta el cátodo.

Suponiendo que la figura 6. esta constituida por dos metales tales como fierro y cobre, si estos se encuentran unidos por un alambre de cobre y sumergidos en una solución de NaCl, el fierro empezará a corroerse mostrando herrumbre (ánodo).



Los electrones perdidos serán consumidos por el cobre (cátodo), estos viajan a través del conductor y llegan a la intercara cátodo/solución, donde se combinan con iones hidrógeno cargados positivamente para formar hidrógeno gas y cuando se forma este gas, se combina con los electrones procedentes del ánodo, creando iones OH⁻ en exceso.



Este exceso de iones hace que aumente la alcalinidad en el ambiente que rodea al cátodo, (fig. 7).

En el concreto, como toda corrosión electroquímica, el acero de refuerzo se oxida en el ánodo, donde ocurre la reacción (1), liberando electrones que fluyen a través de la barra hacia el cátodo donde se consumen en una reacción, en estructuras de concreto normales en donde la solución poro es alcalina y existe acceso de aire, la reacción es (2).

La corriente regresa a través del concreto (electrolito), al ánodo en forma de iones negativos hidroxilo cerrando de este modo el circuito.

Cabe mencionar que para que la corrosión se lleve a cabo es necesario que se presenten todas las condiciones antes mencionadas y en caso de que falte alguna de ellas, el proceso de corrosión no se presentará, o si ya estaba presente, se detiene temporalmente, para reiniciar en cuanto sea posible nuevamente, es decir, en cuanto estén presentes todas las condiciones anteriores.

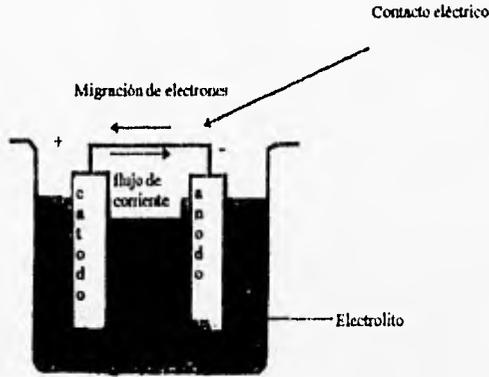


Fig. 6.- Celda de corrosión

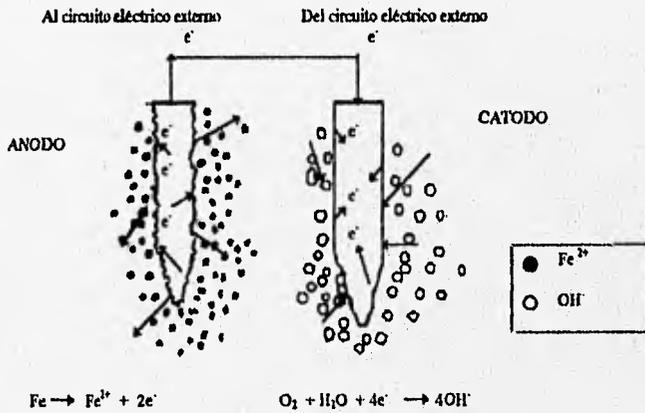


Fig. 7.- Ambiente alcalino en el cátodo

2.1) Potencial electroquímico.

El potencial electroquímico se define como el trabajo efectuado por los electrones cuando se mueven de un punto a otro y en un sistema de corrosión la diferencia de potencial se debe a los potenciales electroquímicos de las reacciones de oxidación y reducción.

Estos potenciales se pueden definir más fácilmente como una medida a la facilidad de transferencia de carga a través de la intercara metal-solución y a la facilidad de la ionización del oxígeno disuelto.

Generalmente cualquier diferencia entre el electrolito, ánodo y cátodo puede producir una celda que tenga diferencia de potencial, ejemplo de tales diversidades pueden ser metales diferentes, concentración de oxígeno y diferencias de temperatura.

Esta diferencia de potencial no puede medirse directamente, ya que si intentamos medir el potencial de cualquier intercara metal-solución con cualquier instrumento necesitaríamos una segunda terminal para cerrar el circuito de medida, introduciéndose así una segunda intercara cuyo potencial absoluto se desconoce, por lo que para poder medir esta diferencia de potencial se adoptó un electrodo patrón que es el electrodo normal de hidrógeno el cual por convención se le asignó el valor de cero ⁽⁴²⁾.

El electrodo normal de hidrógeno es aquel que resulta de hacer burbujear este gas a la presión de una atmósfera por una solución ácida (pH = 1, 1N.), en la que se encuentra sumergido un trozo de platino.

Tomando como referencia este electrodo, se determinó en condiciones normales de temperatura, presión y concentración los llamados potenciales estándar de electrodo (Tabla 4), de este modo los metales catódicos tienen un potencial eléctrico alto o positivo, mientras que los anódicos tienen un potencial eléctrico bajo o negativo con respecto al valor del potencial normal de hidrógeno.

SISTEMA	SEMIREACCION	POTENCIAL (mV)
Li ⁺ /Li	Li ⁺ + 1 e ⁻ ↔ Li	-3.045
K ⁺ /K	K ⁺ + 1 e ⁻ ↔ K	-2.925
Ca ²⁺ /Ca	Ca ²⁺ + 2 e ⁻ ↔ Ca	-2.87
Na ⁺ /Na	Na ⁺ + 1 e ⁻ ↔ Na	-2.714
Al ³⁺ /Al	Al ³⁺ + 3 e ⁻ ↔ Al	-1.66
Zn ²⁺ /Zn	Zn ²⁺ + 2 e ⁻ ↔ Zn	-0.762
Fe ²⁺ /Fe	Fe ²⁺ + 2 e ⁻ ↔ Fe	-0.99
Ni ²⁺ /Ni	Ni ²⁺ + 2 e ⁻ ↔ Ni	-0.250
Fe ³⁺ /Fe	Fe ³⁺ + 3 e ⁻ ↔ Fe	-0.036
H ⁺ /H ₂	2H ⁺ + 2 e ⁻ ↔ H ₂	-0.000
Cu ²⁺ /Cu	Cu ²⁺ + 2 e ⁻ ↔ Cu	+0.337
Ag ²⁺ /Ag	Ag ²⁺ + 2 e ⁻ ↔ Ag	+0.800

Tabla 4.- Potenciales Standard de electrodo a 25 °C frente al electrodo normal de hidrógeno

Las dificultades operativas que se presentan en el manejo de un electrodo de hidrógeno han dado lugar a utilizar electrodos de referencia, estos deben tener la característica de ser manejables, de construcción sencilla y el potencial de equilibrio de la reacción de oxidación-reducción debe ser constante y conocido con respecto al de hidrógeno.

Como electrodos de referencia podemos utilizar los siguientes:

A) Electrodo de calomelano.- Este electrodo está formado por mercurio cubierto por una capa de cloruro insoluble (Hg_2Cl_2) en equilibrio con una disolución de cloruro de potasio (KCl), que puede ser 0.1N, 1N o saturada. El contacto eléctrico se realiza por medio de un hilo de platino. La reacción del electrodo de calomelano es:



B) Electrodo de plata cloruro de plata (Ag/AgCl), está formado por un hilo de plata sobre el cual se deposita cloruro de plata (AgCl), generalmente por vía electroquímica, en una solución de NaCl o KCl, en la cual el hilo de Ag^0 actúa como ánodo, la reacción electroquímica es:



y su potencial de equilibrio a 25 °C es:

$$E = 0.2224 - 0.059 \log [\text{Cl}^-] \text{ Vs. ENH}$$

C) Electrodo de Zinc, está constituido por un bloque de Zn de alta pureza. La reacción electroquímica es:



Su potencial de equilibrio a 25 °C es:

$$E = -0.763 + 0.0295 \log [\text{Zn}^{2+}] \text{ Vs. ENH}$$

D) Electrodo de cobre /sulfato de cobre (Cu/CuSO₄, Fig. 8), consiste en un tubo rígido de material dieléctrico que no reacciona con el CuSO₄, por dentro esta formado por una barra cilíndrica de cobre sumergida en una solución de sulfato de cobre saturada. El contacto electrolítico con la solución se realiza mediante un puente salino formado por un tapón de madera de balsa, la reacción de electrodo es:



su potencial de equilibrio a 25 °C viene dado por:

$$E = 0.340 - 0.0295 \log [\text{Cu}] \quad \text{Vs. ENH}$$

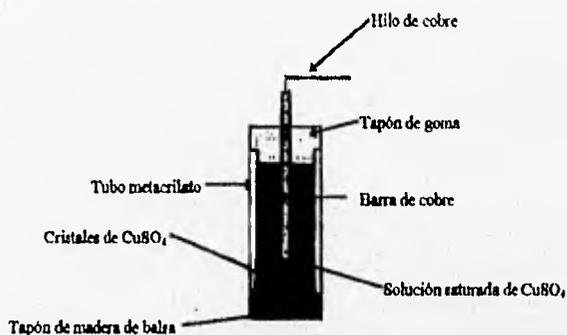


Fig. 8.- Electrodo de Cu/ CuSO₄

2.2) Tipos de corrosión.

De acuerdo con la naturaleza del medio corrosivo, la corrosión metálica se puede clasificar en dos tipos (tabla 5):

A.- Corrosión química o seca.

Comprende el ataque por sistemas no electrolíticos, tales como gases, vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica o por líquidos no conductores de la corriente eléctrica.

B.- Corrosión electroquímica o húmeda.

Comprende a la corrosión atmosférica en el aire húmedo, a la producida por los suelos o por medios electrolíticos, (agua de mar, soluciones ácidas, sales y álcalis) y por sales fundidas.

MECANISMO	MEDIO AGRESIVO	MORFOLOGIA	ACCIONES FISICAS SIMULTANEAS	SECTOR INDUSTRIAL
OXIDACION DIRECTA (CORROSION QUIMICA O SECA) CORROSION ELECTROQUIMICA O HUMEDA	Atmosférica	Uniforme	Erosión-corrosión	Transporte
	De estructuras sumergidas	Galvánica	Corrosión bajo tensión	Aplicaciones marinas
	De estructuras enterradas	Selectiva	Corrosión por cavitación	Construcción
	Por gases calientes	Por picaduras	Corrosión por frotamiento	Petroquímica
	Por sales fundidas	Intergranular	Corrosión fatiga	Generación de energía
	Por ácidos	Bajo tensión	En lamina de cuchillo	Industria alimentaria
		Exfoliante		

Tabla 5.- Clasificación de los procesos de corrosión⁽⁴⁾

Existen varios tipos de corrosión electroquímica las cuales se clasifican en:

1.- Corrosión uniforme.- Este tipo de corrosión se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual sobre toda la superficie, es el tipo de corrosión menos peligroso y a que en ensayos sencillos se puede predecir el tiempo de servicio de la pieza⁽⁷⁾.

2.- Corrosión galvánica.- Sucede cuando se unen dos metales o aleaciones diferentes alejados en la serie galvánica, es decir de diferentes tendencias a corroerse, el más electronegativo o activo es el que siempre se corroe y con más intensidad cuando más distante estén en dicha serie.

3.- Corrosión en grietas o hendiduras.- Se presenta en las uniones de piezas metálicas, tuercas remaches, debajo de depósitos (óxidos, impurezas) u objetos localizados sobre la superficie metálica.

4.- Corrosión por picaduras.- Este tipo de ataque es muy localizado y profundo y se manifiesta en forma de picaduras, son difíciles de descubrir debido al pequeño diámetro de aquellas y por que comúnmente están recubiertas de productos de corrosión, el mecanismo de ataque consta de un periodo de iniciación de picadura debida a heterogeneidades, grietas, daño metálico, trabajado en frío, diferencias de composición de la solución (segregación).

Una vez iniciada la picadura se forma un elemento activo pasivo, actuando como ánodo la zona del metal desnudo y como cátodo el metal pasivo generándose una diferencia de potencial muy grande.

Para prevenir este tipo de corrosión no deben utilizarse materiales propensos a ella, tales como los metales pasivos, como los aceros inoxidables o el aluminio en ambientes muy específicos, tales como soluciones que contengan iones cloruro.

5.- Corrosión Intergranular.- Todos los metales de uso práctico están formados por cristales que forman regiones cristalinas llamadas cristalitas o granos, estos están orientados generalmente al azar, este tipo de corrosión es una forma de ataque localizado en el borde de grano o regiones adyacentes a él, en el metal en los bordes de grano los átomos están más débilmente empaquetados en la red además pueden acumularse allí las impurezas y segregaciones, el ataque se presenta cuando el borde de grano es anódico respecto al grano (pequeña área anódica frente al área extensa catódica).

6.- Corrosión bajo esfuerzo.- Esta es una forma de ataque localizado en la cual se unen dos factores fundamentales, por un lado se requiere de la presencia de un medio corrosivo específico y por otro es necesaria la presencia de esfuerzos a tensión ya sea aplicados o residuales en el material.

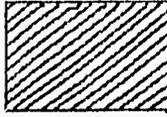
7.- Corrosión por fatiga.- Es una forma muy parecida a la corrosión bajo esfuerzo con la diferencia de que los esfuerzos que la provocan son del tipo cíclico y pueden ser introducidos por procesos térmicos o mecánicos.

8.- Corrosión erosión.- Puede considerarse como el incremento en la velocidad de deterioro que sufre el metal debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie metálica.

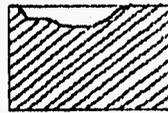
9.- Corrosión bacteriológica.- Este tipo de corrosión es generado por microorganismos de diferentes variedades los cuales actúan de una manera energética para establecer condiciones adecuadas para que los mecanismos de corrosión se lleven a cabo.

10.- Corrosión en estructuras de concreto.- Esta es tal vez una de las formas más importantes de la corrosión desde el punto de vista de la ingeniería civil, en ella la varilla de refuerzo actúa como ánodo y cátodo, el concreto actuará como el electrolito.

A continuación se representa en forma esquemática en las figuras 9 y 10 los distintos tipos de corrosión.



Corrosión generalizada irregular



Corrosión localizada



Corrosión por picaduras



Agrietamiento

Fig. 9.- Tipos de corrosión



Corrosión uniforme



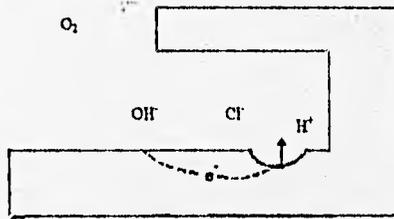
A)

B)

Corrosión galvánica

a) Hojalata; acero más electronegativo

b) Galvanizado; Zn más electronegativo



Corrosión por hendidura

Fig. 10.- Tipos de corrosión

Capítulo 3) DEGRADACION DEL CONCRETO REFORZADO.

El concreto reforzado fue considerado como un material de duración indefinida, sin embargo, desde hace algunos años, este criterio cambió debido a los problemas que se tienen con algunas estructuras por agentes externos del medio.

A grandes rasgos, su deterioro puede ser debido principalmente a:

3.1) Deterioro debido a las malas prácticas constructivas.

Es muy común que las estructuras de concreto se deterioren a causa de las malas prácticas constructivas, sin tomar en cuenta las normas para construcción existentes y en muchas otras ocasiones se adiciona más agua de la necesaria al concreto para mejorar su manejo, sin embargo esto ocasiona que disminuya la relación agua/cemento produciendo una disminución en su resistencia y aumentando la probabilidad de que se produzca contracción y subsecuente agrietamiento por secado, aunque también una falta de cuidado en el curado del concreto permite que este aumente las contracciones por secado⁽⁶⁾.

3.2) Deterioro intínseco del concreto.

Generalmente la naturaleza de los materiales que conforman el concreto y los esfuerzos de tensión debido a las cargas en los miembros estructurales producen grietas en el concreto (fig. 11).

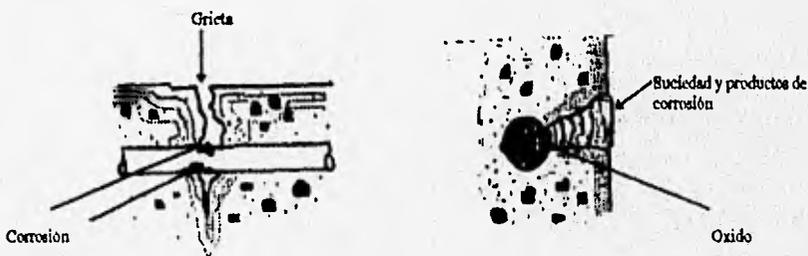


Fig. 11.- Corrosión en fisuras longitudinales y transversales

Como consecuencia de las grietas producidas, las estructuras de concreto están más propensas a sufrir la corrosión del refuerzo debido a que se facilita el camino a los agentes corrosivos.

Entre las diversas causas que también pueden producir agrietamientos tenemos:

A) Agrietamientos debido a las reacciones químicas en los materiales.

Una causa del deterioro es el que produce la reacción alcali-silíce de los agregados. en ciertas condiciones algunos agregados que contienen silíce son susceptibles a ser atacados por los álcalis (sodio, potasio y forma de hidróxidos), presentes en la pasta de cemento.

La reacción que se produce en estar en contacto estos dos tipos de elementos produce un gel que se caracteriza por absorber grandes cantidades de agua con la consecuencia de un aumento en su volumen y esfuerzos de tensión que producen el agrietamiento del concreto.

Para evitar este tipo de falla se debe hacer una apropiada selección de agregados, usar un cemento de nivel bajo de álcalis, o usar puzolanas.

B) Agrietamientos en el concreto fresco.

Una causa muy común en el daño del concreto, se debe al estado plástico en el concreto fresco, ya que este es una suspensión de partículas de agregado y la pasta fluida del cemento y agua.

Esta pasta tiene una densidad más baja que la de los agregados (fig. 12), por lo que la fuerza de gravedad tiende a bajar a estos (segregación).

Cuando las partículas descienden, la pasta se desplaza pero puede haber una separación de las partículas de cemento endurecido en la pasta que hacen que se desplace el agua hacia arriba, esto es lo que se llama sangrado.



Fig. 12.- Segregación y sangrado

Los mecanismos de formación de grietas que producen la segregación y el sangrado son entre otros:

- 1.- El agregado que se encuentra por debajo del acero de refuerzo sedimenta y el agua del sangrado queda atrapado bajo la barra, esto hace que no haya un buen contacto entre la pasta endurecida y el refuerzo, produciendo un espacio o un agrietamiento cerca de la barra siendo común que bajo de la barra haya herrumbre.
- 2.- La sedimentación y el sangrado producen esfuerzos en el concreto, debido a las pérdidas de agua causando grietas.
- 3.- Cuando la evaporación del agua del sangrado es más rápida que la que lo produce, ocurre la contracción plástica, en efecto el agua que se pierde por la evaporación reduce el volumen del concreto y si el concreto no puede seguir este cambio con la misma rapidez se producen grietas.

C) Agrietamientos por cambios de temperatura.

Las diferencias de temperatura en el ambiente causan también la contracción por secado que producen las grietas debido a que la pasta se contrae por la pérdida de agua y los agregados tratan de impedirlo causando esfuerzos de tracción y cuando estos excedan los esfuerzos permisibles se producen los agrietamientos. Esto es común en lugares con climas extremos, tales como los desiertos.

Existen varias normas que establecen los espesores de recubrimiento recomendables y los anchos permisibles para las grietas y en un intento por controlarlas, se han establecido en diversos reglamentos de construcción fórmulas indirectas.

La expresión que utilizan la mayoría de los reglamentos para el control indirecto del agrietamiento se obtiene de la ecuación de Gergeley y Lutz⁽⁹⁾, correspondiente al ancho máximo de las grietas, definiendo un parámetro Z_{im} , dado en los reglamentos.

$$Z_{im} = f (tA)^{1/3}$$

donde:

Z_{im} = Ancho de grieta.

f = Esfuerzo en el acero de refuerzo debido a cargas de servicio (kg/m^2)

t = Distancia desde el extremo en tensión al centro de la barra más cercana. (cm).

$A = A_e/m$, área efectiva del concreto ($A_e = 2t$), que rodea a las barras principales de refuerzo por tensión y que tengan el mismo centroide que el refuerzo, dividido entre el número de barras (cm^2).

Algunos investigadores y reglamentos de construcción han establecido límites de anchos de grietas⁽¹¹⁾. En la tabla 6 se presentan algunos anchos permisibles de grietas, según distintos investigadores y reglamentos:

Investigador / reglamento	condiciones de exposición	Anchos máximos permisibles (mm)
Brico	Severa	0.10
	Agresiva	0.20
	Normal	0.30
Rusch	Agresiva	0.20
	Normal	0.12-0.30
Efsen	Severa	0.05-0.15
	Normal (exterior)	0.15-0.25
	Normal (interior)	0.25-0.35
Reglamento ACI 318-83	Exterior	0.33
	Interior	0.40
Comité euro Internacional del concreto (CEB)	Interior (a normal)	0.30
	Interior (a medio agresivo)	0.20
	Exterior	0.20
	Muy agresivo	0.10
Manual de diseño de obras cívicas (CFE)	Interior	0.30
	Agresivo	0.20
	Agresivo con Impermeabilidad Cargas accidentales	0.10
Comité ACI 224 NTC-87	Normal	0.50
	Aire seco	0.40
	Aire húmedo	0.30
	Productos químicos descongelante	0.18
	Agua de mar, mojado o secado alternado	0.15
	Estructuras para almacenamiento de agua	0.10

Tabla 6.- Anchos permisibles de grietas

3.3) Deterioro químico de la pasta de cemento.

El deterioro de la superficie del concreto debido a la exposición del ambiente se llama intemperismo y consiste en un cambio de apariencia debido a los efectos de la lluvia, hielo, sol y contaminación atmosférica y en casos extremos se producen agrietamientos, como un ejemplo tenemos a las partículas finas de polvo son llevadas por la lluvia hacia la superficie del concreto, Los poros de la superficie actúan como filtro haciendo que las partículas queden atrapadas en estos, algunas de estas partículas son de origen biológico que producen una decoloración en la superficie del concreto.

Las estructuras de concreto sometidas a ambientes marinos son expuestas simultáneamente a la acción de diversos tipos de ataques químicos y físicos, estos daños varían desde el aspecto estético hasta los severos daños estructurales.

Diversas investigaciones han demostrado que los procesos que provocan el deterioro del concreto debidas a las condiciones de exposición son:

Ataques por sulfatos, deterioro por el ambiente salino, agrietamiento debido a contracciones por cambios bruscos de temperatura.

De manera general el deterioro de la pasta de cemento se puede clasificar en 3 grupos principales y estos son:

1.- Degradación de la pasta de cemento por ácidos.

El concreto y a su vez la pasta de cemento, esta compuesta principalmente por cal y sílica, la sílica es un ácido muy débil y la cal una base muy fuerte por lo que aún un ácido débil como el CO_2 , convertirá la pasta de cemento a carbonato de calcio y sílica, por lo tanto como veremos más adelante la velocidad de deterioro esta determinada por el pH del ácido.

Un tipo especial de reacción con ácidos es la reacción debido a la penetración del dióxido de carbono gas en los poros vacíos del concreto. Cuando el dióxido de carbono alcanza la frontera del agua en los poros se disuelve parcialmente en la misma, en consecuencia este reacciona en la intercara agua/aire con la cal y posteriormente, con el silicato de calcio hidratado y otros compuestos de calcio.

Este tipo de degradación se explicará con más detalle ya que es el principal mecanismo de degradación en un medio ambiente urbano.

II.- Degradación por formación de sales expansivas.

En un medio ambiente marino el concreto es susceptible a ser atacado por los sulfatos, causando agrietamientos debido a la expansión de este, el sulfato que abunda en dicho ambiente es el sulfato de magnesio, este reacciona con los aluminatos de calcio, silicatos y cal presentes en el cemento formando hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sulfoaluminato de calcio. La formación de este último produce una expansión y fractura en el concreto.

Cuando cantidades excesivas de sulfatos se incorporan en el concreto fresco la reacción de estos con el aluminato tricalcico ocurre aun después de fraguar el concreto, si el aumento de volumen es excesivo pueden ocurrir esfuerzos de tensión produciendo agrietamientos.

El ataque de los sulfatos pueden ingresar más adentro y se caracteriza por un progresivo debilitamiento, agrietamiento y desprendimiento de la superficie así como una pérdida de resistencia en el concreto.

Los sulfatos de magnesio y de amonio son los más peligrosos para el concreto, el tipo de sulfato y la concentración presente pueden influenciar en la naturaleza y el grado de deterioro.

Otro ataque debido a las condiciones de exposición es el debido a la sal que prevalece en el ambiente, bajo condiciones de humectación y secado continuo las sales solubles se pueden acumular en altas concentraciones en los poros del concreto, si el agua de los poros llega a un punto de saturación se forman cristales de sal haciendo que aumenten la presión hidráulica dentro del concreto generando agrietamientos y desprendimientos en la zona donde se formaron dichos cristales.

Actualmente se han hecho varias investigaciones para comprender mejor los mecanismos de ataque de los sulfatos así como nuevos tipos de cemento y agregados que sean más resistentes al ataque de los sulfatos.

Los sulfatos causan la formación de sales dobles expansivas. La mayoría de los sulfatos penetran desde el exterior aunque, bajo ciertas condiciones, también podrían provenir del mismo cemento. El cemento siempre contiene algún porcentaje de sulfato de calcio, el cual actúa como regulador de tiempo de fraguado.

Los sulfatos están presentes de manera natural en el agua, a veces en altas concentraciones. Cuando los iones sulfato penetran en los poros del sistema, por absorción de los iones presentes en el agua o por difusión, pueden reaccionar con la cal libre presente en el concreto y formar yeso:



Este yeso reacciona con los compuestos hidratados de aluminato de calcio para formar ettringita:



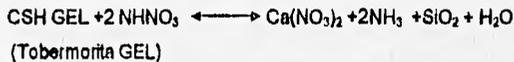
La formación de esta sal doble en concreto ordinario endurecido es expansiva. Cuando los esfuerzos de expansión superan a los esfuerzos de tensión del concreto ocurre la ruptura del mismo.

Otra doble sal de sulfato es la taumasita:

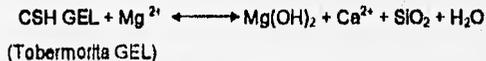


III.- Degradación por formación con cationes.

El ion amonio (NH_4^+) es inofensivo por sí solo sin embargo el catión siempre se encuentra en combinación con un anión y este anión reacciona con los compuestos hidratados del cemento. Al formarse las sales de calcio se libera amoníaco gaseoso y el desprendimiento de amoníaco desplaza la reacción hacia la derecha:



Las sales de magnesio reaccionan primero con el hidróxido de calcio, formando hidróxido de magnesio de baja solubilidad, sin embargo, el magnesio es también capaz de reaccionar con el gel de silicato de calcio hidratado:



Puede presentarse el caso en que 2 o los 3 mecanismos estén presentes de manera simultánea.

3.4) Degradación del acero de refuerzo.

La corrosión en el acero de refuerzo en forma general, ocurre por la presencia de los llamados factores desencadenantes de la corrosión, es decir, por factores que favorecen la formación de zonas con diferencia de potencial capaz de romper la película pasivante

Este puede ser destruido por:

A) Rompimiento químico.

Este tipo de rompimiento es quizás el más frecuente, y se debe principalmente a:

1.- Reducción del pH.

La reducción del pH del concreto se da por la reacción del Ca(OH)_2 del concreto y los óxidos del sodio, calcio y potasio de la solución poro con el CO_2 disuelto en el aire, dando lugar a una corrosión de tipo generalizado.

El concreto contiene pues, CaO , Na_2O , K_2O , que dan lugar a soluciones básicas, por otro lado, la solubilidad del Ca(OH)_2 , es baja en la solución poro, por lo que cristaliza en los espacios intersticiales del concreto.

Cuando el CO_2 del aire entra en los poros del concreto, tiene lugar el proceso de carbonatación, el CO_2 reacciona con los óxidos de sodio, potasio y además el Ca(OH)_2 , provocando con ello la neutralización de la solución poro y de la pasta de cemento, por lo que el pH puede llegar a ser, menor a 9.

2.- Penetración de aniones agresivos.

El efecto del ion cloruro no se basa en el descenso del pH, si no en su gran habilidad para atacar de manera directa, aún a alto valor de pH, la película pasivante.

La concentración de iones cloruro necesaria para romper la película pasivante (concentración crítica), depende de diversos factores, entre los que se encuentran los ambientales y la composición del concreto.

B) Rompimiento electroquímico.

Esto se debe al hecho de que muchos óxidos metálicos pueden ser reducidos catódicamente en varias soluciones sin que intervenga una FEM externa si la capa pasivante tiene lugares débiles que funcionen como ánodos locales. Si no existe la suficiente cantidad de oxígeno en la película, esta se vuelve el reactivo catódico reduciéndose completamente.

1.- Rompimiento por picado.

Es la formación de pequeños hoyos que pueden extenderse a un ataque general.

El potencial de picado E_p , es el potencial eléctrico al que se lleva a cabo este tipo de rompimiento, los potenciales de picado más bajos se encuentran en soluciones de cloruro.

El E_p se relaciona con la concentración del ion agresivo por medio de la ecuación:

$$E_p = A - B \log C_x$$

Donde la A y B son constantes, C_x es la concentración del ion agresivo.

Cabe señalar que si la película pasivante se rompe por un alto potencial, la superficie metálica puede ser repasada bajando su potencial.

2.- Rompimiento por excavación.

Este tipo de rompimiento se da cuando el acero se encuentra en un medio que ataca rápidamente al sustrato metálico y lentamente a la capa de óxido, es por esto que se presenta la excavación en la película.

3.- Rompimiento mecánico.

La película pasivante es de naturaleza frágil, lo cual se rompe fácilmente al someter a la varilla a esfuerzos de tensión, impacto, doblado, raspado, etc.

Los Factores desencadenantes de la corrosión en el concreto reforzado son:

A) Contenido de humedad.

El contenido de humedad es el factor que más influye en la velocidad de corrosión ya que fija la disponibilidad de oxígeno en las cercanías del refuerzo y la resistividad del concreto.

El concreto es un material que absorbe con mucha facilidad la humedad ambiental, sin embargo este seca muy despacio, de este modo cuando existe una humedad constante, se crea un equilibrio entre la humedad del interior y la humedad relativa del exterior (fig. 14) y cuando hay variaciones importantes en la humedad relativa del ambiente, el concreto no puede seguir con la misma rapidez estos cambios dando como resultado que la capa exterior es la única que sigue estos cambios y mantiene un equilibrio con la humedad exterior.



Fig. 14.- Contenido de humedad en los poros del concreto²¹⁾

Si los poros están saturados de humedad la resistividad del concreto será menor y por lo tanto la formación de pilas de corrosión será muy fácil, sin embargo el oxígeno tiene que disolverse primero en el agua de poro para llegar al refuerzo, por esto se dice que la corrosión está controlada por el acceso de oxígeno y las velocidades de estas serán moderadas e incluso más bajas, ejemplos de ello lo podemos encontrar en estructuras situadas en los mares a cierta profundidad.

Cuando los poros contienen muy poca humedad, el proceso de corrosión se encuentra dificultado, en esta ocasión la velocidad de corrosión también será baja, aunque el concreto se encuentre carbonatado y contaminado de cloruros.

La velocidad de corrosión máxima se da en concretos con contenidos de humedad altos, pero si los poros están saturados, el oxígeno pasará libremente y la resistividad será lo suficientemente baja para permitir elevadas velocidades de corrosión.

B) Temperatura.

Actualmente no se conoce con seguridad la influencia de la temperatura en la corrosión del refuerzo del concreto pero se han realizado investigaciones debido a un surgimiento de problemas relacionados con severos daños en muchas estructuras construidas en la década de los 70's, principalmente en el golfo pérsico⁽¹³⁾ y que requiere de reparaciones costosas.

La temperatura tiene un papel ambiguo en los procesos de corrosión en el concreto, por un lado, un incremento produce que la velocidad de corrosión aumente, pero por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que a su vez puede producir aumento local de humedad.

Como resultado de una investigación⁽¹²⁾, se encontró una relación entre el grado de saturación de poro y la temperatura, por lo que el grado de saturación de poro no solo depende de la humedad de la atmósfera si no también de la temperatura y cuanto más alta este la temperatura, más bajo será el grado de saturación de poro.

Un resultado del efecto de la temperatura en el equilibrio del agua de condensación / evaporación en la red de poros de concreto, nos dice que un aumento de temperaturas en ambiente seco produce baja velocidad de corrosión y por lo tanto alarga la vida útil de las estructuras reforzadas.

C) Existencia de macropares y micropares galvánicos.

Estas pilas de corrosión se forman cuando existen sobre la superficie de la armadura zonas donde se produce la disolución localizada del metal en forma acelerada, lo que constituye el ánodo y zonas donde transcurre la reacción de reducción que se denomina cátodo (fig 13).

Simultáneamente debido a que dichas zonas poseen diferente potencial electroquímico, se producen corrientes galvánicas entre la zona que se corroe y aquella que permanece pasiva.

Otros ejemplos de pares galvánicos los constituyen los que se producen entre regiones de concreto carbonatado y sin carbonatar o entre zonas con diferente grado de humedad o entre zonas reparadas y zonas sin reparar cuando se realizan parcheos o reparaciones parciales de las estructuras.

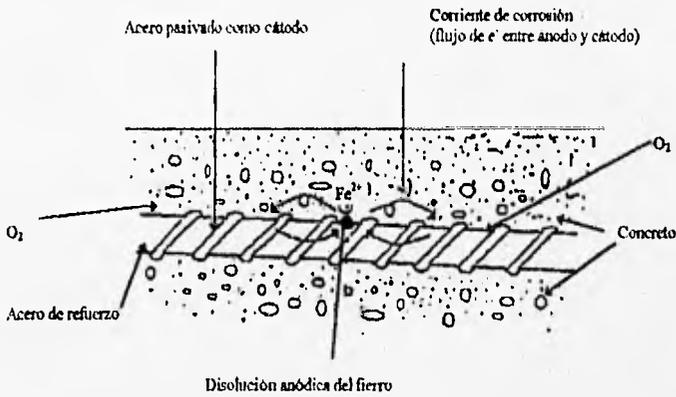


Fig. 13.- Representación de la corrosión en el acero^(11,12)

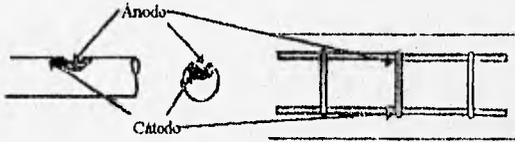


Fig. 15.- Microcelda y macrocelda de corrosión.⁽¹⁴⁾

A nivel microscópico en la varilla de acero⁽²⁾ se puede observar la presencia de un par galvánico (fig. 16) ya que se tiene dos fases, una rica en hierro (ferrita) que actúa como ánodo y la otra fase que contiene carburos (perlita), que actúa como cátodo. Por lo que con la presencia de un electrolito como la humedad o una solución que contenga iones o átomos cargados eléctricamente, oxígeno, dióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cloruro o cualquiera que ataque al acero, se formará una celda electroquímica de corrosión.

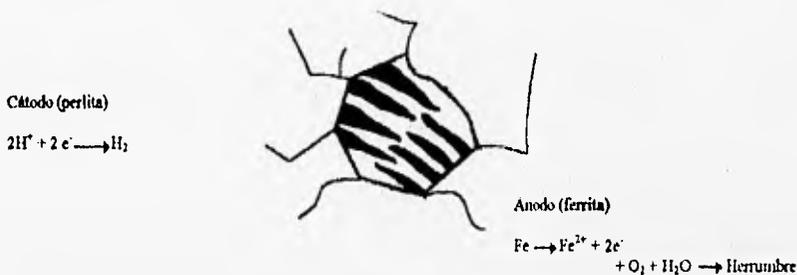


Fig. 16.- Par galvánico en las fases del acero de refuerzo

Capítulo 4) DEGRADACION DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO POR CARBONATACIÓN.

El proceso de degradación del concreto por carbonatación esta dado principalmente por el deterioro de la pasta de cemento y por la corrosión de la varilla de refuerzo.

4.1) Deterioro de la pasta de cemento por carbonatación.

Además de la reducción de la alcalinidad del concreto debido al deslavado por circulación de aguas puras o ligeramente ácidas como el agua de la lluvia tenemos la reacción de los compuestos de carácter básico tales como NaOH, KOH, Ca(OH)₂, que provienen de la fase acuosa del concreto con componentes ácidos que provienen de la atmósfera.

El aire normal contiene 0.03% en volumen de dióxido de carbono (CO₂), que reacciona fácilmente con el concreto⁽³⁾ debido a su naturaleza alcalina (fig. 17), este proceso es conocido como carbonatación.

El aire entra en contacto directo con la superficie del concreto introduciéndose por los poros capilares y el CO₂ contenido en el aire reacciona con los hidróxidos:



REACCION EN LA FASE ACUOSA

$$8 < \text{PH} < 12.5$$

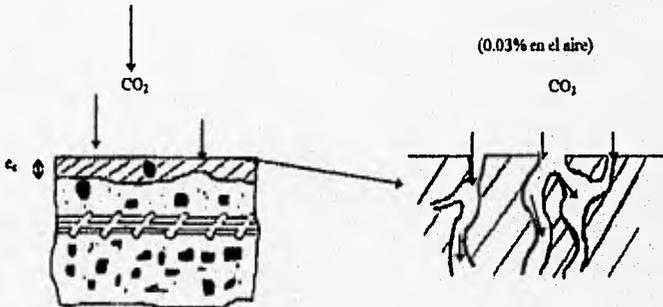


Fig. 17.- Carbonatación del recubrimiento de concreto

Cuando el aire ya no contiene el carbono y queda en contacto con el aire carbonatado del exterior, se produce un movimiento del CO_2 hacia el aire reducido en un intento para uniformar la concentración del mismo. A este movimiento de una alta concentración a una baja concentración es lo que se le llama difusión.

El CaCO_3 y NaCO_3 formados se precipitan dentro de los poros del concreto disminuyendo la permeabilidad y el pH de la solución del poro y si la carbonatación continua, las fases sólidas de la pasta del cemento también reaccionan con el CO_2 , produciendo en la fase final un amorfo SiO_2 , Al(OH)_3 , CaCO_3 , CaSO_4 , NaCO_3 y H_2O , la principal consecuencia de la carbonatación es una caída abrupta del pH de la solución de poro, por lo tanto aparece un frente de carbonatación separando dos zonas, una hacia la superficie con pH abajo de 8 y otra hacia el interior del concreto con pH arriba de 12. Estas zonas se pueden distinguir fácilmente por medio de un indicador de ácidos y bases tales como la fenolftaleína.

Se han obtenido resultados⁽²⁹⁾ que indican que en la ausencia de iones cloruro, el proceso de corrosión en un concreto ya carbonatado puede iniciarse a un pH de aproximadamente 11.4, aunque la velocidad de corrosión sea pequeña, a continuación se ilustra en el gráfico 4, datos obtenidos en donde se muestra el pH de las mezclas de Ca(OH)_2 y CaCO_3 . En esta se puede apreciar que mientras mayor sea la proporción de carbonato de calcio en la mezcla, más cercano es el pH a 9, por otro lado mientras menor sea el contenido de carbonato en la mezcla y mayor el de Ca(OH)_2 , más elevado es el valor de pH, de esto se puede entender que entre más cerca se encuentre el valor del pH de una estructura a 9 hay un gran contenido de carbonato de la misma.

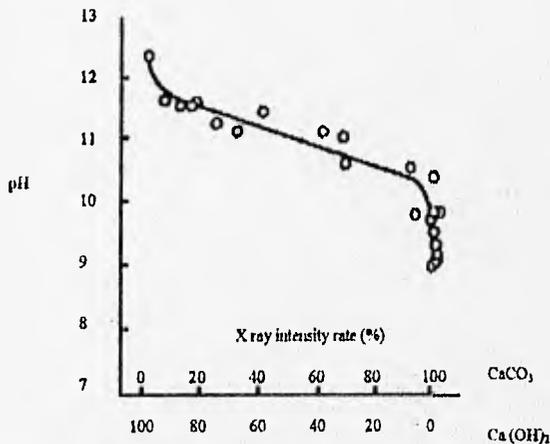
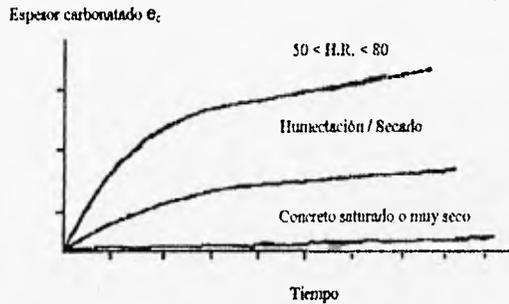


Gráfico 4.- Relación del pH con las mezclas de CaCO_3 y Ca(OH)_2

Se han desarrollado también fórmulas matemáticas para modelar la carbonatación^(15, 16, 17), la más común nos dice que el fenómeno sigue una tendencia parabólica como se muestra en el gráfico 3, donde profundidad de carbonatación, e_c , es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición, t .

$$e_c = k \times (t)^{1/2}$$

e_c = Espesor carbonatado
 k = Coeficiente de carbonatación
 t = Tiempo de exposición



Graf. 3 - Relación del espesor carbonatado con el tiempo y la humedad ambiental

El valor de k depende de diversas variables tales como el tipo de cemento, la relación agua / cemento (a/c) el ambiente⁽¹⁵⁾ (temperatura, humedad relativa).

Para estructuras protegidas contra la lluvia

$$K = 26(a/c - 0.3)^2 + 1.6$$

Para estructuras expuestas a exteriores.

$$K = 10.4(a/c - 0.3)^2 + 0.64$$

Así por ejemplo a mayores humedades en los poros, el gas CO_2 penetra con más dificultad que con humedades inferiores (gráfico 2), sin embargo la relación del CO_2 ocurre más rápido en un medio líquido que en un medio seco proporcionando un recubrimiento adecuado al refuerzo, por lo que la carbonatación no penetra tanto como para que pueda dañar la pasividad del acero durante la vida útil de la estructura.

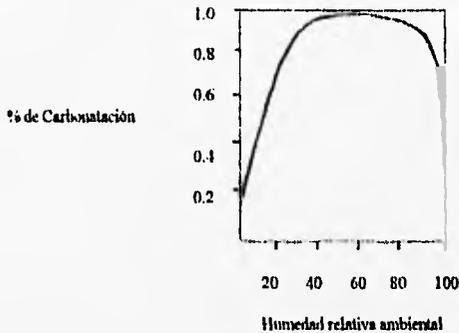


Gráfico 2.- Grado de carbonatación en función del contenido de humedad.

De una revisión de varios reportes de diferentes países, se desprende lo siguiente.

La carbonatación es un tipo especial de reacción ácida debido a la penetración de dióxido de carbono gas en los poros vacíos del concreto.

El dióxido de carbono se disuelve parcialmente en la solución poro y reacciona en la intercara agua/aire con la cal libre y posteriormente con el silicato de calcio hidratado.

La reacción se lleva a cabo de acuerdo a:



En esta reacción, un mol ó 34 ml de hidróxido de calcio es convertida a 37 ml de carbonato de calcio y 18 ml de agua⁽²⁶⁾, lo que da un incremento en volumen de aproximadamente 60%. La mayor parte de este incremento es agua, mientras que el contenido total del sólido es 9% en volumen, el agua formada se evapora, mientras que el incremento en volumen del sólido, provoca que la porosidad del mismo disminuya y en el caso del cemento portland, también disminuye la permeabilidad.

Debido a la baja permeabilidad del concreto, el consumo de dióxido de carbono y la formación de agua durante la reacción, provoca que la degradación del concreto ocurra lentamente.

La carbonatación en el concreto también va acompañada de una contracción y de un aumento de peso en el concreto, la contracción por carbonatación es causada, quizá por la disolución de los cristales del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bajo un esfuerzo de compresión, además de la precipitación de CaCO_3 en los espacios libres de esfuerzos, por consiguiente, la capacidad de compresión de la pasta de cemento aumenta momentánea y temporalmente.

Así como se mencionó antes, la penetración del frente de carbonatación se lleva a cabo en la superficie agua/aire y procede simultáneamente con el secado del concreto, provocando que el frente de carbonatación se mueva en línea con el frente de humedad, siguiendo ambos la segunda ley de difusión de fick. Es por esto que la profundidad de carbonatación, es en cierto momento, proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

Para el concreto que es expuesto a condiciones ambientales exteriores, los periodos de humidificación o de mojado estarán precedidos por periodos en los cuales el concreto absorberá o absorberá agua. Cuando los poros están llenos de agua o solución poro, la carbonatación se detendrá hasta que el concreto haya perdido la cantidad de agua suficiente tal que le permita alcanzar el frente de carbonatación.

Cabe mencionar que el frente de carbonatación no puede ser exactamente predicho por la fórmula de la raíz cuadrada, por que al final el frente llegará a un paro completo y el frente de carbonatación coincidirá con la mayor profundidad de secado y si los efectos del movimiento de humedad son tomados en consideración, la posición del frente de carbonatación podrá ser calculado usando la fórmula⁽²⁶⁾:

$$X = A[t_1]^{1/2} + A[t_2 - (X_{c1}/B)^2]^{1/2} + A[t_3 - (X_{c2}/B)^2]^{1/2} + A[t_4 - (X_{c3}/B)^2]^{1/2} + \dots$$

$$\dots + A[t_n - X_{cn}^2/B^2]^{1/2}$$

Donde:

X_c/B = Tiempo requerido por la orilla de humedad para alcanzar el frente de carbonatación después del humedecimiento.

t_i = tiempo del período de secado.

La situación extrema para el concreto ocurrirá cuando los poros de este se encuentren completamente saturados. En este caso no habrá carbonatación, ejemplos de esta clase de exposición son las estructuras bajo el agua y estructuras por debajo del nivel del agua residual en los sistemas de drenaje, por lo que el tiempo de iniciación de la corrosión, t_0 , del acero por la carbonatación del concreto esta dada por⁽²⁷⁾:

$$t_0 \text{ [años]} = (L/k)^2.$$

Donde:

L.- es el espesor de la capa de concreto en mm. que cubre al refuerzo.

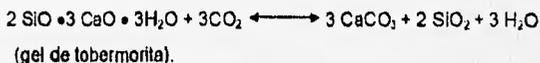
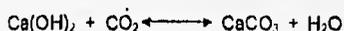
K.- Es el coeficiente de carbonatación .

Para cualquiera de los 5 tipos de cemento portland, se encuentran:

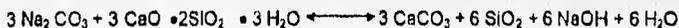
El silicato tricálcico (C_3S), el silicato dicálcico (C_2S), el aluminato tricálcico (C_3A), y el ferrialuminato tetracálcico (C_4AF), los cuales al mezclarse con agua dan los productos de hidratación.

Bajo ciertas condiciones de humedad, el CO_2 presente en la atmósfera reacciona con los productos de la hidratación del cemento (el agente de reacción es en realidad el ácido carbónico y no el CO_2).

Se proponen a continuación algunas reacciones para la carbonatación del cemento portland.



La carbonatación abarca por una parte, a los productos de la hidratación del cemento⁽³²⁾, esto es la pasta, mientras que por otra esta la carbonatación de la solución poro (compuesta predominantemente por KOH y NaOH y prácticamente libre de iones Ca^{2+}).



El compuesto de $3 CaO + SiO_2 + 3 H_2O$ proviene del gel de cemento y el $Ca(OH)_2$ es la cal producida durante el proceso de hidratación del cemento.

4.2) Corrosión en el acero de refuerzo por carbonatación.

Cuando el frente de carbonatación llega al refuerzo, se reduce el pH y la capa pasiva se vuelve inestable iniciándose la corrosión, el proceso de corrosión en este caso es generalizado y homogéneo (fig. 18), tal y como si estuviera simplemente el acero expuesto en la atmósfera sin ninguna protección, pero con la desventaja de que la humedad permanece en el interior del concreto y por lo tanto en contacto con el acero durante más tiempo produciendo a largo plazo una reducción en la sección transversal de la barra y una cantidad significativa de óxidos que pueden inducir esfuerzos que agrieten el recubrimiento o que puedan difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto.

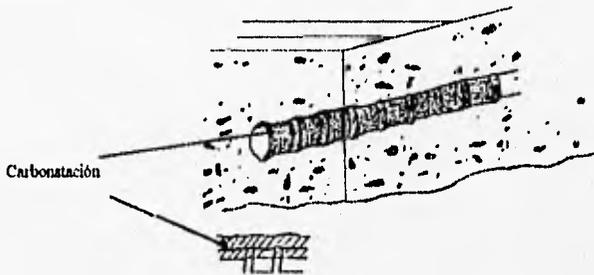


Fig. 18.- Corrosión del acero de refuerzo por carbonatación

Una vez que la barra ya está desprotegida, la presencia de humedad es crucial para la rapidez de corrosión. Según investigadores el ambiente más agresivo cuando el concreto está carbonatado es cuando existen ciclos de secado y mojado⁽¹¹⁾ ya que durante estos periodos alternados el frente de carbonatación avanza durante el periodo de secado y la barra se corroe durante los ciclos de mojado, por el contrario un ambiente seco constante provocará despasivación pero no se desarrollará la corrosión, y un ambiente húmedo constante evitará la carbonatación y la barra permanecerá pasiva a menos que otro agente la ataque.

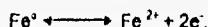
En efecto cuando la carbonatación se produce en un concreto que contiene cloruros, se suman los efectos de ambos provocando una severa corrosión, además por efecto del CO_2 , sobre las fase sólida del cemento, los cloroaluminatos se pueden desintegrar y dejar libres a los cloruros que los mantienen combinados.

Aunque el progreso de la carbonatación es muy lento en concreto masivo y denso, hay dos factores que pueden reducir la vida esperada de servicio, que son la delgada capa de recubrimiento y la existencia de grietas.

La corrosión en el acero de refuerzo es un fenómeno de naturaleza electroquímica ya que se desarrolla en un ambiente húmedo, en efecto la pasta de cemento tiene características que lo pueden considerar como un electrolito.

En algunas ocasiones el rompimiento de la película no es uniforme. Si embargo, en ambos casos la disolución del hierro se lleva a cabo en el ánodo, los iones del hierro entran a la solución como iones Fe^{2+} , debido a la formación de una FEM por la diferencia de potencial al haber contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo.

La dilución anódica del hierro es:



Por cada átomo de hierro diluido quedan 2 electrones en el acero, disminuyendo el potencial eléctrico del mismo, sin embargo, el potencial no puede disminuir infinitamente, por lo que los electrones pasan a través del acero que funciona como contacto eléctrico hasta el cátodo (La superficie cubierta con la película pasivante en la intercara acero/concreto, o hasta la perlita, en caso de que la película pasivante este completamente removida), para formar iones OH^- .

La reducción catódica del oxígeno a iones OH^- es:



Los iones OH^- transportan la carga eléctrica a través del concreto hasta el ánodo, donde reaccionan con el Fe^{2+} para formar hidróxido ferroso por lo que la reacción total es:



El cual a su vez, puede ser convertido a hidróxido férrico por el agua y oxígeno disponibles.



En ausencia de oxígeno se forma:



Se puede observar que los productos de la corrosión del acero ocupan un mayor volumen que el hierro, por consiguiente, al formarse tales productos el concreto puede no soportar los esfuerzos de la expansión de los mismos y romperse, perdiendo sus propiedades físicas y químicas originales.

Esta capacidad de compresión puede ser sobrepasada por los productos de la corrosión del acero como se representa en el gráfico 5 pues dichos productos ocupan un volumen mucho mayor que el del acero.

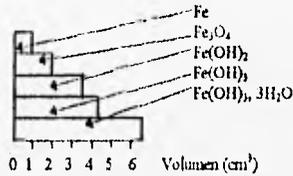


Gráfico 5.- Comparación entre los volúmenes del Fe y los productos de corrosión del mismo⁽²⁷⁾

Por otro lado, se tiene que la velocidad de corrosión es un parámetro que depende de la proporción de los procesos anódico y catódico, puede representarse un control anódico cuando los cambios en la disolución del metal (proceso anódico), determinan los cambios de los parámetros electroquímicos, y un control catódico cuando existe un flujo de oxígeno limitado. Se ha reportado valores para la permeabilidad del oxígeno en concreto de 0.001 a $30 \times 10^{-16} \text{ m}^2$.

Capítulo 5) PARTE EXPERIMENTAL

Existen varias maneras de estimar la vida útil de una estructura de concreto, entre las cuales se encuentran.

1.- Evaluación de las condiciones de protección de las armaduras.

- Medición del espesor de recubrimiento.
- Medición de las concentraciones de iones despasivantes tales como cloro y sulfato.
- Determinación de la absorción de agua y porosidad del concreto.
- Determinación de la resistividad eléctrica del concreto.
- Determinación del frente de carbonatación.

2.- Evaluación de la corrosión en el acero de refuerzo

- Extracción de porciones de armadura para exámenes metalográficos
- Estimación de la velocidad de corrosión.
- Determinación de los potenciales de media celda de la estructura.

3.- Evaluación de la calidad del concreto.

- Ensayo de resistencia a la compresión.
- Ensayo de la velocidad de pulso (ultrasonido).
- Prueba del martillo o rebote (esclerómetro)
- Determinación del contenido de cemento.
- Medida de permeabilidad del concreto.

4.- Evaluación de degradación por agrietamiento.

- Examen visual.
- Sonido de martillo.
- Mapeo de infrarrojo o radar.

5.- Evaluación de su comportamiento mediante.

- Mapeo de grietas.
- Ensayos de carga.

Se recomienda que los ensayos se deben de efectuar en zonas representativas tales como:

- Zonas expuestas a condiciones ambientales más agresivas.
- Zonas sometidas a las mayores exigencias mecánicas y estructurales.
- Zonas que representan los mayores daños o signos evidentes de corrosión.
- Zonas de vientos predominantes y asoleamientos.

La corrosión del refuerzo regularmente se hace visible a través de manchas de óxido y agrietamientos que corren paralelas al refuerzo y para poder determinar las causas de este problema fue necesario realizar una inspección visual preliminar para poder efectuar los ensayos pertinentes sobre la estructura así como recabar la mayor información posible acerca de la vida y funcionamiento de la estructura.

5.1) Inspección preliminar de las estructuras de concreto de los edificios.

La inspección de la obra constituye una etapa muy importante en la evaluación y posterior reparación de las estructuras dañadas por corrosión ya que a través de ella se obtiene información para realizar una inspección detallada que proporcione un diagnóstico.

La inspección detallada cuando es necesaria tiene por objeto evaluar la extensión del deterioro mediante ensayos y mediciones y consiste de los siguientes pasos^(18,19):

- Antecedentes de la estructura donde se muestre la ubicación y datos generales.
- Examen visual general del edificio (fotografiado).
- Selección de zonas para examen detallado de la estructura.
- Determinación de las técnicas de ensayo, medición y análisis más apropiadas.
- Examen visual detallado y preparación de las zonas seleccionadas para su evaluación.
- Realización de mediciones y ensayos en el concreto o en el refuerzo.

5.2) Fundamentos de los métodos seleccionados para la evaluación del estado del concreto reforzado.

Los ensayos realizados para determinar el estado de las estructuras de concreto se hicieron de acuerdo a la disponibilidad del equipo con el que se cuenta en la UNAM.

5.2.1) Potencial de media celda

La naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión en el acero embebido en el concreto es conocida.

Una de las características de estos procesos es el desarrollo de las celdas de corrosión, esto es la coexistencia de áreas pasivas y corroídas en la misma barra tomando un elemento galvánico cortocircuitado.

El voltaje de una celda ΔU , en la microcelda es igual a la diferencia de potencial entre las zonas activas y pasivas del acero (fig. 19) y pueden sobre pasar el valor de 0.5 V.

El flujo de corriente viene dado por la formula:

$$I = \frac{\Delta U}{R_s + R_a + R_c}$$

Donde:

I= Flujo de corriente, mA.

ΔU = Voltaje de celda en el macroelemento, mV.

R_s = Resistencia eléctrica del concreto, Ohms.

R_a = Resistencia de la reacción anódica, Ohms.

R_c = Resistencia de la reacción catódica, Ohms.

Como vemos en la ecuación este flujo es determinado por la resistencia eléctrica del concreto y de la resistencia de las reacciones anódicas y catódicas.

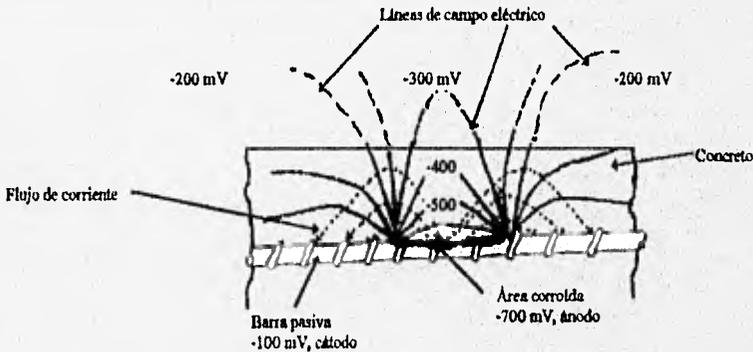


Fig. 19.- Campo eléctrico y flujo de corriente en una microcelda en el refuerzo⁽²⁰⁾

El flujo de corriente en el concreto se vincula siempre con un campo eléctrico, este campo eléctrico se puede medir en la superficie del concreto formando líneas equipotenciales (campo de potencial), que permite la localización de zonas corroídas con valores muy negativos.

Cuando se miden los potenciales en la superficie, estos son valores diferentes a los del refuerzo debido al recubrimiento del concreto, por tanto dichos potenciales se dicen que son potenciales mezclados.

Estas variaciones se deben a múltiples factores tales como :

A) Contenido de humedad

Los potenciales pueden variar según sea el contenido de humedad en unos pocos milivolts e inclusive 100 a 200 mV. Por tanto puede haber zonas secas y húmedas en el mismo elemento y podrán dar diferencias de potenciales que no podrían ser atribuibles a un mayor riesgo de corrosión si no a la diferencia de humedad . Para evitar estos errores se recomienda humedecer ligeramente el concreto en forma homogénea antes de proceder al muestreo de potencial. Si ello no es posible se deberá tener en cuenta muy cuidadosamente la situación de sequedad o humedad en que se encuentran las zonas de la estructura sometidas a supervisión.

B) Contenido de oxígeno

La falta de oxígeno en el refuerzo produce también valores más negativos que si estuviera aireada, estas circunstancias hay que tenerlas presentes en estructuras sumergidas o enterradas donde la disponibilidad de oxígeno es limitada para no atribuir riesgos mayores a los potenciales más negativos.

C) Espesor del recubrimiento

El espesor del recubrimiento tiene un efecto directo en los valores de potencial medidos, cuando se incrementa el recubrimiento los valores de potencial de zonas activas y pasivas se vuelven similares.

D) La presencia de fisuras o grietas en el concreto

Estas grietas o fisuras además de provocar una corrosión localizada sobre el refuerzo hacen variar la resistividad del concreto, por lo que los potenciales pueden resultar falseados por una resistividad del medio heterogéneo.

E) Corrientes erráticas

Estas corrientes normalmente darán lugar a detectar potenciales muy alejados de los valores habituales que se miden en el concreto.

La técnica de mapeo de potenciales ha sido utilizada en estados unidos desde principios de los setentas, para localizar barras de refuerzo corroídas en las estructuras de concreto, su uso e interpretación se describen en la norma ASTM Test Method for Half-Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete (C876-87), la cual se muestra a continuación⁽³⁰⁾.

Método de ensayo estándar para la medición de los potenciales de media celda del acero de refuerzo en el concreto.

Alcance.-

- 1.- Este método abarca el estimado del potencial de media celda del acero de refuerzo en el concreto, con el propósito de determinar la actividad de corrosión del acero.
- 2.- Este método está limitado por la existencia de un circuito eléctrico. Una superficie de concreto que se ha secado completamente, de tal manera que se comporte como un material dieléctrico, o que haya sido cubierto por una película dieléctrica no se comportará como un circuito eléctrico.

Usos.-

- 1.- Este método puede ser usado para indicar la actividad de corrosión asociada con el acero embebido en concreto en muestras de campo o de laboratorio.
- 2.- Este método es aplicable a cualquier muestra, sin importar el tamaño o la profundidad de la cubierta de concreto sobre el acero de refuerzo.
- 3.- Este método puede ser usado en cualquier momento durante la vida del concreto.
- 4.- Los resultados obtenidos por este método no deberán ser considerados como un medio para estimar las propiedades estructurales del acero o el concreto.

Equipo.-

El equipo de prueba consiste de lo siguiente:

- 1.- Media celda (electrodo) de cobre-sulfato de cobre saturado.

La media celda consiste de un tubo rígido, cuyo diámetro interior no debe ser menor de 1 pulgada (25 mm), con un tapón poroso de madera o plástico que permanezca húmedo por acción capilar, y una varilla de cobre sumergida en una solución saturada de sulfato de cobre.

2.- Unión eléctrica.

Se debe usar un dispositivo de unión eléctrica para proporcionar un puente líquido de baja resistencia eléctrica entre la superficie del concreto y la media celda. Este puede consistir de una esponja humedecida con una solución de baja resistencia eléctrica.

3.- Solución para contacto eléctrico.

Esta solución es la que se aplica a la unión eléctrica. Está compuesta por una mezcla de 5 ml. De agente humectante (disponible comercialmente) con 5 Gal. de agua potable.

4.- Voltímetro.

El voltímetro debe tener la capacidad para ser operado con batería y tener una exactitud de $\pm 3\%$ de la escala mínima. La impedancia de entrada no debe ser menor de 10 millones de ohms operado a una capacidad total de 100 mV. La escala mínima debe ser de 20 mV. o menos.

5.- Hilo con conductor eléctrico.

De longitud no mayor a 150 m. de al menos AWG. No. 24.

Procedimiento.-

1.- Espaciado entre lecturas.

Se considera conveniente un espaciado de 1.2 m. Para la evaluación de puentes. De manera general, un mayor espaciado aumenta la probabilidad de no detectar áreas de corrosión local. El espaciado entre las lecturas debe ser reducido donde las lecturas adyacentes muestren una diferencia algebraica mayor de 150 mV.

2.- Conexión eléctrica al acero.

Hacer una conexión eléctrica directa al acero de refuerzo por medio de un caimán. En algunos casos, esta técnica puede requerir la remoción de concreto para exponer el acero de refuerzo. Conectar el refuerzo metálico a la terminal negativa del voltímetro. Debe determinarse la conductividad eléctrica de los componentes del acero con el acero de refuerzo por la medición de la resistencia entre dos componentes ampliamente separados en la estructura.

3.- Conexión eléctrica de la media celda.

Conectar eléctricamente una terminal del cable a la media celda y el otro extremo a la terminal positiva del voltmetro.

4.- Mojado previo de la superficie del concreto.

Bajo ciertas condiciones, la superficie de concreto debe ser mojada. Una prueba para determinar la necesidad de mojado puede hacerse como sigue:

- Colocar la media celda sobre la superficie de concreto y mantenerla fija.
- Observar en el voltímetro una de las siguientes condiciones:
 - a) El valor de la lectura del potencial de media celda no cambia con el tiempo.
 - b) La lectura del potencial de media celda varía con el tiempo.

De observar la condición a) no es necesario mojar la superficie del concreto, sin embargo, si se observa la condición b), es necesario mojarla durante el tiempo necesario para que la lectura de voltaje permanezca constante durante al menos 5 minutos.

5.- Las mediciones de potencial detectan actividad de corrosión, pero no necesariamente la localización de la corrosión activa. La localización precisa de los puntos que presentan corrosión activa requieren el conocimiento de la resistencia para, con ella, calcular la resistividad eléctrica del material entre la media celda y el acero corroído.

Efectuar mediciones horizontales y verticales asegurarse que la solución cobre-sulfato de cobre de la media celda haga contacto eléctrico simultáneo con el agua.

6.- Cuidados de la media celda.

El tapón poroso deberá estar cubierto cuando no se use por largos periodos para asegurarse de que no se seque.

Registro de los valores de potenciales de media celda.-

Registrar los potenciales eléctricos de media celda lo más cercano a 10 mV. Por convención es usado el signo negativo (-) para todas las lecturas. Reportar todos los potenciales de media celda y corregir por temperatura si el potencial de media celda se encuentra fuera del intervalo 22.2 ± 5.5 °C. El coeficiente de corrección por temperatura es: 0.0005 V, negativo por cada °F para el intervalo de temperatura entre 0 a 49 °C.

Presentación de datos.-

Las mediciones de prueba pueden ser presentados por uno o dos métodos. El primero, un mapa equipotencial, proporciona una delineación gráfica de las áreas donde puede estar ocurriendo la corrosión activa. El segundo método, el diagrama de frecuencia acumulada, indica la magnitud del área afectada del concreto.

1.- Mapa de contorno equipotencial.

Sobre un plano escalado adecuadamente, graficar la localización de los valores de potenciales de media celda del acero en el concreto y marcar el contorno de potenciales iguales. El intervalo de contorno máximo deberá ser 0.10 V.

2.- Distribución de frecuencia acumulada.

Para determinar la distribución de las lecturas de los potenciales de media celda para el concreto, hacer una gráfica de los resultados sobre papel normal milimétrico de la siguiente manera:

- Arreglar y enumerar todos los potenciales de media celda del menos al más negativo.
- Determinar la posición de cada potencial de media celda de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$f(r) = \left(\frac{r}{n+1} \right) \times 100$$

Donde:

f(r).- Es la posición del graficado para el valor observado, %

r.- Es la posición individual del potencial de media celda

n.- Es el número total de observaciones.

- Etiquetar el eje de las ordenadas como "potencial de media celda (mV.,CSE)", donde CSE es la designación del electrodo cobre-sulfato de cobre. Etiquetar el eje de las abscisas como " frecuencia acumulada (%)". Trazar dos líneas Horizontales paralelas que intercepten el eje de las ordenadas en los valores de -200 y -350 mV. Respectivamente.

- Después de graficar los potenciales de media celda , trazar una línea que mejor se ajuste a los puntos.

Interpretación de resultados.-

Los voltajes medidos son referidos a la media celda cobre-sulfato de cobre.

- Si los potenciales en un área son numéricamente menores que -200mV. CSE, hay una probabilidad mayor del 90% que no este presente la corrosión del acero en dicha área al tiempo de efectuar la medición.

- Si los potenciales de un área se encuentran en el intervalo de 200 a -350 mV. CSE, la actividad de corrosión del acero de refuerzo en esta área es dudosa.

- Si los potenciales de un área son numéricamente mayores que -350 mV. CSE, hay una probabilidad mayor al 90% de que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en esa área al tiempo de efectuar la medición.

- En las pruebas de laboratorio donde los potenciales fueron numéricamente mayores de -500 mV. CSE, aproximadamente la mitad de los especímenes se resquebrajaron debido a la actividad de corrosión.

- Al obtenerse lecturas positivas, éstas no deberán ser consideradas como válidas pues esto indica humedad insuficiente.

Reporte.-

El reporte deberá incluir:

- 1.- Tipo de celda usada.
- 2.- La temperatura promedio estimada de la celda durante la prueba.
- 3.- El método de humidificación del concreto y el tipo de unión del voltmetro al acero de refuerzo.
- 4.- Un mapa de contorno equipotencial, mostrando la localización del contacto del acero de refuerzo, o una gráfica de la distribución de frecuencia acumulada de los potenciales de media celda, o ambos.
- 5.- El porcentaje de los potenciales de media celda más negativos que 350 mV.
- 6.- El porcentaje de los potenciales de media celda menos negativo que 200 mV.

Precisión.-

1.- La diferencia entre dos lecturas de media celda tomadas en el mismo punto con la misma celda no deberá exceder 10 mV. Cuando la celda es desconectada y reconectada.

2.- La diferencia entre dos lecturas de media celda tomadas en el mismo punto con dos celdas diferentes no deberá exceder 20 mV.

5.2.2) Resistividad

Los materiales se pueden clasificar de acuerdo a la facilidad con la que pasan corriente como conductores y aisladores, por lo tanto la resistencia eléctrica es la habilidad que posee una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella, su unidad esta dada en Ohms.

La resistencia de un alambre es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal:

$$R \propto \frac{1}{A}$$

La resistividad (ρ) de un material por lo tanto se define como la resistencia de un cubo unitario multiplicada por la longitud y si consideramos a esta de 1cm el área será por lo tanto de 1 cm^2 ; entonces:

$$\rho = \frac{R \times 1 \text{ cm}^2}{1 \text{ cm}}$$

por lo tanto la resistividad tiene unidades de Ohm-cm

La resistividad (ρ) de una sección cilíndrica de longitud L y sección A está dada por⁽¹⁰⁾:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Donde R es la resistencia del material.

En forma general la técnica empleada para evaluar la resistividad consiste en hacer pasar una magnitud de corriente alterna de onda cuadrada de aproximadamente 97 Hz entre dos electrodos (c_1 y c_2) y con la diferencia de potencial a través de los otros dos electrodos se obtiene la resistencia y esta se compara con una resistencia interna estandar mostrando la diferencia en el Indicador de corriente cero, tal como se muestra en la figura 21.

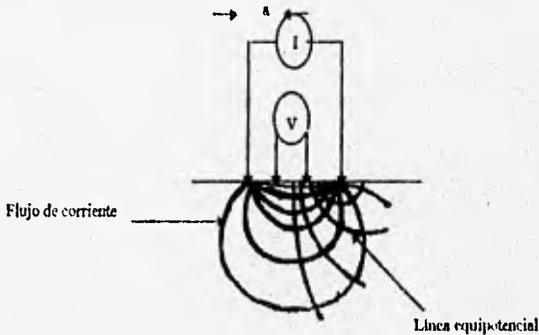


Fig. 21.- Método Werner para determinar la resistividad en el concreto

El valor de la resistencia obtenida se introduce en la siguiente relación para poder obtener el valor de la resistividad.

$$\rho = \frac{2 \pi a V}{I} = 2 \pi R a$$

donde:

a.- Espaciado entre los electrodos en cm

R.- Resistencia en ohms.

Se puede decir que la resistividad es independiente de la forma geométrica del resistor.

Lo contrario de la resistividad es la conductividad, por lo que un material con alta conductividad tiene una resistividad muy baja y viceversa.

De aquí que la resistencia al flujo de corriente es mínima cuando⁽⁶⁾:

- a) El medio presenta baja resistividad
- b) Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
- c) Se tiene un área transversal grande para el flujo de corriente.

Se ha observado un incremento en la resistencia eléctrica en muestras de concreto elaboradas con diferentes tipos de cemento, el cual de manera general, es atribuido a la precipitación del carbonato de calcio, la sílica, la alúmina y los óxidos férricos, esto, además trae como consecuencia que disminuya la permeabilidad del concreto, así como una desaparición de diferentes iones de la solución poro.

La resistividad eléctrica en el concreto se debe principalmente al transporte iónico a través de la red de poros por un electrolito acuoso, debido a ello, la humedad que disuelve las sustancias iónicas del concreto es el parámetro básico en la conducción eléctrica.

Puede verse que al disminuir el contenido de humedad aumenta la resistividad y disminuye el potencial de media celda.

La resistividad y el potencial de media celda son por lo tanto muy sensibles a los cambios en el contenido de humedad.

En la práctica se observa que:

- 1.- La resistividad del concreto aumenta al pasar el tiempo.
- 2.- La resistividad del concreto saturado aumenta con el descenso de la relación agua/cemento.
- 3.- La resistividad del concreto parcialmente saturado aumenta con el aumento de la relación agua/cemento.
- 4.- La resistividad del concreto aumenta con la disminución de la humedad.
- 5.- La resistividad del concreto aumenta con la disminución de la temperatura.
- 6.- El potencial de media celda aumenta con la disminución del contenido de humedad.

Por lo que se ha demostrado que cuando la resistividad es mayor a 12 KOhm-cm, la corrosión es poco probable, entre 5 y 12 KOhm-cm, es probable, mientras que a valores menores de 5 KOhm-cm, la corrosión es muy probable, o más bien segura.

La ley de Hinrichson-Rash⁽²⁹⁾ nos muestra la influencia de la temperatura sobre la resistividad.

$$\rho_1 = \rho_2 e^{a \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Donde:

ρ_1 y ρ_2 , son las resistividades a las temperaturas absolutas T_1 y T_2 .

a = constante (2689 para el intervalo de 6 a 26 °C).

No existe un método establecido como norma para la determinación de la resistividad en el concreto, por lo que el método propuesto esta basado en el artículo de Millard S.G., Harrison J.A, y Edwards A.J.⁽¹⁰⁾

Measurement of the electrical resistivity of reinforced concrete structures for the assesment of corrosion RSK.

Método para la determinación de la resistividad eléctrica del concreto reforzado.

Alcance

- 1.- Este método cubre la determinación de la resistividad del concreto, con el propósito de determinar la actividad de corrosión del acero embebido en el concreto.
- 2.- Este método está limitado por la existencia de un circuito eléctrico. Una superficie de concreto que se ha secado completamente, de tal manera que se comporte como un material dieléctrico, o que haya sido cubierto por una película dieléctrica no se comportará como un circuito eléctrico.

Usos

- 1.- Este método puede ser usado para indicar la actividad de corrosión asociado con el acero embebido en concreto en muestras de campo o de laboratorio.
- 2.- Este método es aplicable a cualquier muestra, pero es bien importante la relación entre el espesor de la cubierta de concreto sobre el acero de refuerzo y la separación entre los electrodos.
- 3.- Este método puede ser usado en cualquier momento durante la vida del concreto.
- 4.- Los resultados obtenidos por este método no deberán ser considerados como un medio para estimar las propiedades estructurales del acero o del concreto.

Equipo

El equipo de prueba consiste en lo siguiente:

- 1.- Cuatro electrodos de cobre-sulfato de cobre saturado.
Cada electrodo consiste de un tubo rígido, cuyo diámetro interior no deberá ser mayor a 4 mm., con un tapón poroso de madera para que permanezca húmedo por acción capilar, y un alambre de cobre sumergido en una solución saturada de sulfato de cobre, la cual es inyectada con una jeringa de vidrio o plástico.

2.- Aparato para la determinación de la resistencia.

El aparato debe ser operado con corriente alterna, con una frecuencia de 50 - 1000 Hz. Y tener una exactitud de $\pm 3\%$, de la escala mínima. El aparato puede ser del tipo Soil Resistance Meter , Model 400, Nilsson Electrical Laboratory Inc. O similar.

3.- Caimanes.

Para unir eléctricamente el circuito formado por el concreto en él, con el fondo del mismo con agua, y simular así, la condición de una atmósfera saturada.

Procedimiento.

1.- Espaciado entre los electrodos.

Se considera conveniente un espaciado de 2 cm. Para la evaluación de cubiertas de concreto. Millard⁽¹⁰⁾, encontró que el 77 % de la corriente fluye a lo largo de 4a. es decir, cuatro veces la separación entre los electrodos, por lo que es bien importante que el espaciado entre los electrodos sea como máximo 1/4 del espesor de la capa de concreto de esta manera el error debido a la restricción del flujo es menor al 20 %.

2.- Conexión eléctrica al concreto.

a) hacer cuatro incisiones en el concreto con una broca cuyo diámetro sea igual al diámetro exterior de los electrodos y a una profundidad de aproximadamente 5 mm.

b) Colocar uno a uno los electrodos en cada orificio, poniendo cuidado en que realmente haya contacto entre el concreto y el tapón poroso de cada electrodo, de ser necesario, sujetar con plastilina cada uno de los electrodos.

c) Los dos electrodos del centro, o interiores, se conectan con caimanes a los bornes de potencial del aparato , los electrodos de los extremos se conectan a los bornes de corriente del aparato.

3.- **determinar los valores de resistencia de cada muestra.**

a) Colocar la manija de resolución de barrido en posición de baja (low, hacia abajo), y mantenerla en esa posición, mientras que se coloca la perilla del factor de escala en uno tal que la aguja indicadora sea lo suficientemente sensible para efectuar la lectura, esto es, con la perilla de medición, hacer coincidir la aguja con el centro de la escala. Una vez hecho lo anterior, se libera la posición de baja resolución.

b) Se coloca la manija de resolución de barrido en la posición de fino (hacia arriba), y con la perilla del valor de la lectura se hace coincidir nuevamente la aguja con el centro de la escala.

c) Este último valor, multiplicado por el factor de escala (1, 10, 100, Ohms ó 1, 10, 100, ó 1000 KOhms), es el de la resistencia de la muestra de concreto.

4.- **Cuidados de los electrodos.**

El tapón poroso de cada electrodo deberá permanecer húmedo aún cuando no se use. Para asegurarse que no lleguen a secarse se deberán mantener los electrodos en un vaso con agua destilada.

Verificar que el nivel de la solución saturada de sulfato de cobre permanezca constante en cada electrodo a lo largo de toda la prueba.

Registro de los valores de resistividad eléctrica del concreto.

Registrar los valores de la resistencia eléctrica, ya que con éstos se calcula el valor de la resistividad del concreto.

Presentación de datos.

Las mediciones de prueba deben ser presentados en tablas en las que se indique la etiqueta de la muestra, la lectura de la resistencia, las condiciones del espécimen al momento de efectuar la medición (si se encontraba seco, húmedo o si se dejó en una atmósfera saturada), así como la temperatura ambiental al momento de hacer las mediciones.

Interpretación de resultados

La prueba de laboratorio de los especímenes de concreto indica el valor numérico de la resistencia, con lo cual se calcula el valor de la resistividad. La resistividad es referida a electrodos de cobre-sulfato de cobre.

- 1.- Si la resistividad de una muestra es mayor a 12 KOhms cm., es poco probable que el refuerzo en el concreto se encuentre corroído.
- 2.- Si el valor de la resistividad se encuentra en el intervalo de 5 a 12 KOhm cm., la actividad de corrosión del acero de refuerzo en la muestra es probable.
- 3.- Si la resistividad de la muestra es menor a 5 KOhm cm., la presencia de corrosión activa es muy probable.

Reporte

El reporte deberá incluir:

- 1.- Tipo de electrodos utilizados.
- 2.- Tipo de aparato usado en la determinación de la resistencia.
- 3.- La temperatura ambiental promedio durante la prueba.
- 4.- Las condiciones de prueba de la muestra de concreto.
- 5.- Una tabla en la que se indique el valor de la resistencia eléctrica obtenido, así como la resistividad calculada.

Precisión

- 1.- El valor de la resistencia eléctrica del concreto no debe variar durante al menos 5 minutos.

5.2.3) Carbonatación

El bióxido de carbono al penetrar por los poros del concreto reaccionan con los constituyentes alcalinos formando carbonatos calcicos y produciendo una reducción del valor del pH. La profundidad de la capa carbonatada se llama profundidad de carbonatación y la reducción de su pH. se hace invisible por el cambio de color apropiado.

El indicador que más se utiliza es una disolución al 1% de fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) en alcohol etílico.

Esta solución es incolora en pH inferiores a 8. Para valores de pH superiores a 9.5 se torna de color púrpura.

La tabla 8 muestra los diferentes valores de pH y la coloración que adquiere la fenolftaleína con los diferentes grados de carbonatación⁽¹⁹⁾.

	14	
	13	Alcalinidad cáustica o hidróxido (OH) Alcalinidad carbonato (CO_3)
	12	
	11	Nada de bicarbonatos (HCO_3) Nada de bióxido de carbono CO_2
ROSADO	10	
	9.4	
SIN COLOR	9	Carbonato (CO_3) y alcalinidad bicarbonato (HCO_3) nada de bióxido de carbono libre CO_2 Nada de alcalinidad cáustica (OH)
	8.3	
	8	
NEUTRALIDAD	7	

Tabla 8.- Escala del indicador de fenolftaleína

No existe una norma para determinar el avance de la carbonatación por lo que se limita a una técnica sencilla como lo es el empleo de un indicador ácido-base y se lleva a cabo como sigue⁽¹⁾:

Determinación del frente de carbonatación del concreto

Alcance

Esta técnica estima el frente de carbonatación del concreto reforzado, con el propósito de determinar el estado del concreto.

Usos

- 1.- Esta técnica puede ser aplicada a cualquier muestra, sin importar el tamaño o la profundidad de la cubierta de concreto sobre el acero de refuerzo.
- 2.- Esta técnica puede ser usada en cualquier momento durante la vida del concreto.
- 3.- Los resultados obtenidos con esta técnica no deberán ser considerados para estimar las propiedades químicas del concreto.

Equipo

El equipo necesario es:

- 1.- Taladro o disco esmerilado.
- 2.- Brocha, gotero o aspersor.
- 3.- Frasco gotero con fenolftaleína.
- 4.- Vernier o regla graduada.

Procedimiento

- 1.- Efectuar incisiones en el concreto, con el disco esmerilado o taladro, a diferentes profundidades.
- 2.- Aplicar la solución de fenolftaleína con la brocha, el gotero o el aspersor.
- 3.- Dejar secar la solución de fenolftaleína.
- 4.- Verificar el cambio de coloración a lo largo de toda la incisión.
 - a) Si toda la incisión es del mismo color del concreto, hacer otra incisión aún más profunda y repetir el procedimiento a partir del paso 2, hasta que se observe un frente color rosa, pasar entonces al punto 5.
 - b) Si toda la incisión es de color rosa, pasar al punto 4.

5.- Medir el frente de carbonatación, es decir, la distancia entre la superficie exterior del concreto hasta el punto en donde empieza la coloración rosa.

Registro del valor de frente de carbonatación del concreto

Registre el frente de carbonatación en cm.

Presentación de datos

Presentar los resultados obtenidos en una tabla en la que se indique:

- Procedencia de la muestra.
- Número de la muestra.
- Longitud del frente de carbonatación.
- De ser posible, espesor de la capa de concreto que recubre la varilla.

Interpretación de resultados

El pH de viré de la fenoftaleína se encuentra en el intervalo de 8 a 9.8, presentando una coloración roja en un medio alcalino o básico, y una incolora en medio ácido. Como el proceso de carbonatación es una reacción de neutralización, el concreto no mostrará cambio alguno de color al aplicar la fenoftaleína en las zonas carbonatadas. Un frente de carbonatación muy avanzado, es decir, muy cercano a la varilla refleja una mala condición del estado que guarda el refuerzo.

Reporte

El reporte deberá incluir:

- 1.- Procedencia de la muestra.
- 2.- Método de aplicación de la fenoftaleína.
- 3.- Frente de carbonatación.
- 4.- De ser posible, espesor de la capa de concreto que recubre la varilla de acero de refuerzo.

Cabe señalar que al aplicar los primeros 2 métodos, o los 3 de manera conjunta, se obtiene un análisis bastante confiable del estado que guarda una estructura.

5.3) Procedimientos experimentales empleados para la determinación del estado del concreto reforzado.

La experimentación se inició con la selección de diversos edificios con distintas edades de construcción a los cuales se les pretende determinar el estado en el que se encuentra su estructura.

EDIFICIO	AÑO DE CONSTRUCCION	EDAD EN AÑOS
Química "A"	1954	42
Química "D"	1980	16
Biblioteca de derecho	1992	4

Inicialmente se comenzó con una inspección visual general del concreto en cada edificio para continuar después con una inspección detallada y poder cuantificar la extensión del deterioro mediante ensayos y mediciones con el equipo disponible en la UNAM.

5.3.1) Medición de los potenciales de media celda:

- 1.- A cada columna seleccionada se efectuó remoción del concreto con la finalidad de lograr descubrir la varilla.
- 2.- Se midió el espesor del recubrimiento con un vernier.
- 3.- Se soldó un alambre de cobre a la varilla, mediante pasta de soldadura en frío.
- 4.- Se resanó la estructura con cemento.
- 5.- Se seleccionó un espaciado entre lecturas de 25 cm. en 25 cm. hasta 2.75 m tomando como referencia el piso siguiendo la dirección de la varilla y se midió la temperatura en 3 días diferentes.
- 6.- Se efectuó la conexión eléctrica al alambre de cobre por medio de un calmán llegando este a la terminal negativa del multímetro digital Soar 3400.

7.- Se conectó eléctricamente una terminal del cable a la media celda y el otro extremo a la terminal positiva del multímetro.

8.- Se mojó previamente la superficie del concreto.

9.- Se efectuaron mediciones horizontales (este y oeste de la columna) y verticales (tomando el piso como referencia) asegurándose que el electrodo de cobre-sulfato de cobre (CSE) de la media celda haga contacto eléctrico simultáneo con el concreto (fig. 20).

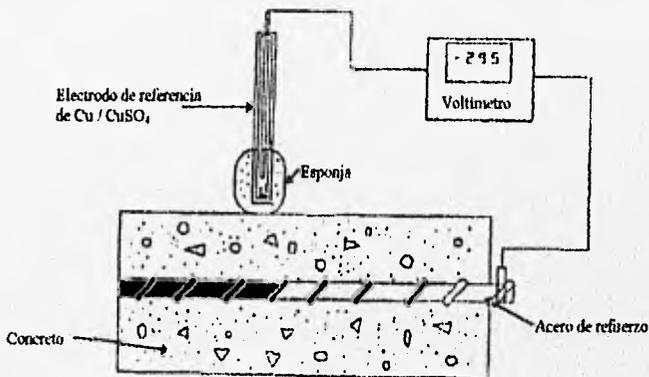


Fig. 20.- Circuito formado con el electrodo de referencia para medir potenciales de corrosión

El potencial electroquímico de corrosión del refuerzo del concreto es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad de las mismas, este método es exclusivamente cualitativo, es decir solo indicara si hay corrosión o no.

5.3.2) Resistividad.

1.- Espaciado entre los electrodos

Se consideró un espaciado de 2 cm. entre los electrodos debido a que el espaciado entre los electrodos debe ser como máximo $1/4$ del espesor de la capa de concreto.

2.- Conexión eléctrica al concreto.

a) Se efectuaron cuatro incisiones en el concreto con una broca de $1/4$ a una profundidad de aproximadamente 0.5 cm.

b) Se Colocaron uno a uno los electrodos en cada orificio, poniendo cuidado en el contacto entre el concreto y el tapón poroso de cada electrodo.

c) Los dos electrodos del centro, o interiores, se conectaron con calmanes a los bornes de potencial del aparato, los electrodos de los extremos se conectaron a los bornes de corriente del aparato (fig. 22).

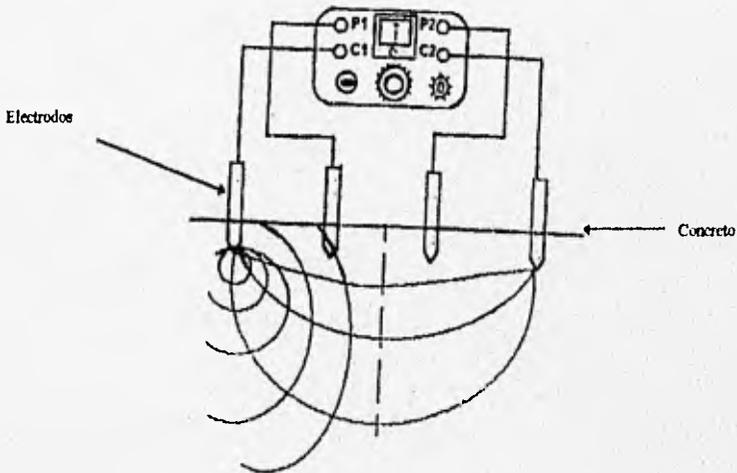


Fig. 22.- Aparato para medir la resistividad en el concreto

3.- Se tomaron los valores de resistencia de cada columna como se describe a continuación.

a) Colocar la manija de resolución de barrido en posición de baja (low, hacia abajo), y mantenerla en esa posición, mientras que se coloca la perilla del factor de escala en uno tal que la aguja indicadora sea lo suficientemente sensible para efectuar la lectura, hacer coincidir la aguja con el centro de la escala. Una vez hecho lo anterior, se libera la posición de baja resolución.

b) Se coloca la manija de resolución de barrido en la posición de fino (hacia arriba), y con la perilla del valor de la lectura se hace coincidir nuevamente la aguja con el centro de la escala.

c) Este último valor, multiplicado por el factor de escala (1, 10, 100, Ohms ó 1. 10, 100, ó 1000 KOhms), es el de la resistencia de la muestra de concreto.

d) Cuidar que el tapón poroso de cada electrodo permanezca húmedo aún cuando no se use, verificando también que el nivel de la solución saturada de sulfato de cobre permanezca constante en cada electrodo a lo largo de la prueba.

e) Se registrar los valores de resistividad eléctrica del concreto así como también la humedad relativa, con un higrómetro (higrometer) Barigo Germany, escala de 20 a 100 % para la humedad y de 10 a 40 °C para temperatura.

5.3.3) Carbonatación

1.- Efectuar incisiones en el concreto, con el taladro, a diferentes profundidades para obtener 1 g. de muestra aproximadamente de concreto.

2.- Introducir esta en un vaso de precipitado con 10 ml. de agua destilada.

3.- Aplicar la solución de fenolftaleína con un gotero.

4.- Verificar el cambio de coloración.

5.- Anotar los resultados.

6.- Repetir el procedimiento para cada columna de concreto seleccionada.

CAPITULO 6) EVALUACION DEL ESTADO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.

Se mostrará a continuación el informe de los resultados obtenidos así como su interpretación y discusión de acuerdo con los criterios de valoración para cada estructura seleccionada de cada edificio.

Finalmente se darán a conocer las conclusiones de este trabajo así como ciertas recomendaciones para el buen desempeño de las estructuras durante su vida útil, así como también recomendaciones para su reparación y mantenimiento.

La presentación de resultados de los potenciales de media celda se llevo a cabo a partir de gráficos de frecuencia acumulada debido a que no se dispone de los planos estructurales.

De las estructuras de concreto evaluadas no se disponen tampoco datos debido a que no fueron proporcionados.

No se obtuvieron datos de indicios de corrosión y de mantenimiento alguno debido a que el estudio de la degradación de estas estructuras a nivel de campo es reciente, por lo que no hay registros anteriores.

6.1) Resultados y análisis de resultados de las estructuras de concreto seleccionadas.

6.1.1) Edificio "A"



COLUMNA.- 1
 UBICACION.- 3er. piso del edificio "A",
 subiendo por las escaleras principales.
 OBSERVACIONES.-, columna
 expuesta a exigencia mecánica y
 vientos oredominantes.

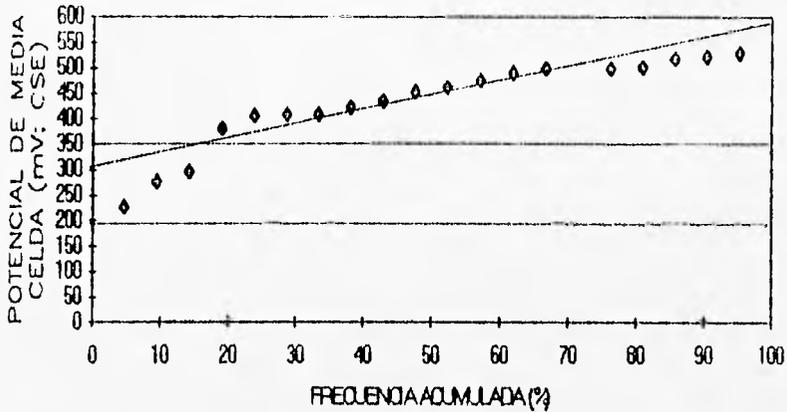
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-297,1	-279,6
50	-409,3	-407,6
75	-454,3	-380,5
100	-408,6	-502,2
125	-228,3	-500,7
150	-463,9	-519
175	-424,4	-434,5
200	-501,8	-524,4
225	-478,3	-531,2
250	-492	-501,1

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	17
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	52
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	5.2
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	3.2X 100	4021.238
HUMEDO	2.1X 1	26.389

COLUMNA 1

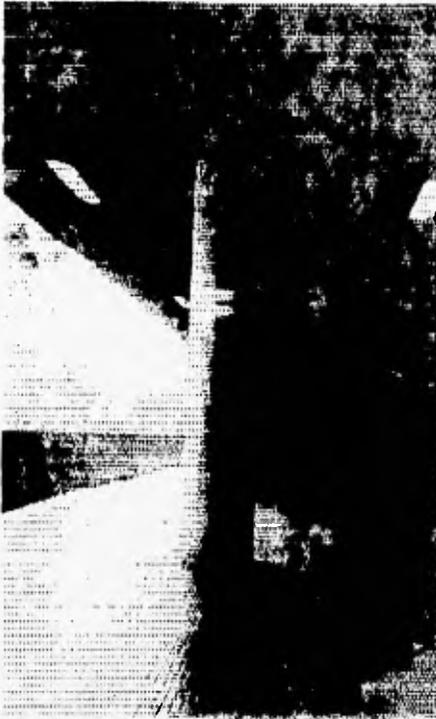


*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	0
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	14.28
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	85.72

Los resultados de la resistividad indica que existe baja posibilidad de corrosión en la estructura. Se puede observar también que el frente de carbonatación no ha avanzado mucho aún a pesar de los años de la estructura.

Los valores de potencial de media celda muestra que existen daños severos por corrosión, lo que indica que la estructura puede tener problemas en cuanto a sus condiciones de funcionamiento.



COLUMNA - 2

UBICACION - 2do. piso del edificio "A",
subiendo por las escaleras principales.

OBSERVACIONES - Columna que muestra
señales de corrosión en la varilla. Esta
expuesta a exigencia mecánica y vientos
predominantes.

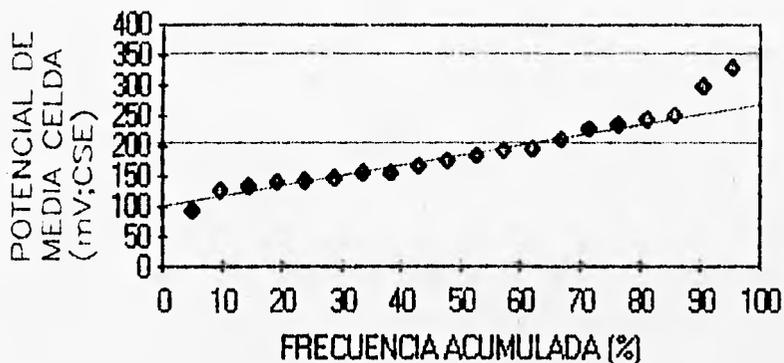
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-236.6	-252.2
50	-193.9	-196.1
75	-157.9	-144.2
100	-142.3	-127.9
125	-94	-177.7
150	-185.7	-167.3
175	-135.5	-156.9
200	-147.5	-228.6
225	-245.5	-212.4
250	-331.7	-299.2

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	17
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	52
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	4.1
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	6.5 X 100	8168.14
HUMEDO	5.1 X 10	640.884

COLUMNA 2



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	61.9
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	38.1
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Los resultados de la resistividad indican que existe baja posibilidad de corrosión en la estructura. El frente de carbonatación ha avanzado apenas a la mitad del valor del espesor de recubrimiento y los valores de los potenciales indican que no existen daños severos de corrosión, por lo que la estructura se encuentra en condiciones de trabajo favorables.



COLUMNA.- 3
UBICACION.- 1er. piso del edificio "A",
 subiendo por las escaleras principales.
OBSERVACIONES.- Columna
 expuesta a vientos predominantes y
 exigencias mecánicas.

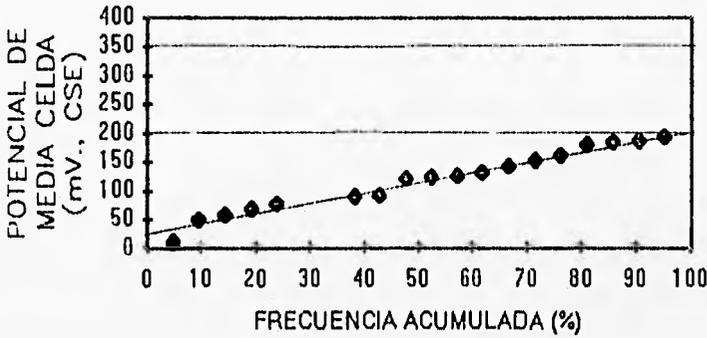
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-125	-163.6
50	-133.2	-185
75	-122.2	-182.1
100	-78	-154.8
125	-12.2	-90.4
150	-58.8	-49.5
175	-93	-90.4
200	-144.5	-90.2
225	-188.2	-127.5
250	-193	-88.1

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	54
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	5.1
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.8

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	2.4 X 100	3015.929
HUMEDO	2.6 X 1	32.672

COLUMNA 3



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Esta estructura muestra valores de resistividad altos y un porcentaje de baja probabilidad de corrosión con respecto a los potenciales. El frente de carbonatación está avanzado, sin embargo la estructura se encuentra en condiciones de servicio favorables.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



COLUMNA.- 4

UBICACION.- Planta baja del edificio "A", a un costado de servicios escolares.

OBSERVACIONES.- Columna que muestra daños por corrosión en la vanilla y esta expuesta a exigencias mecánicas

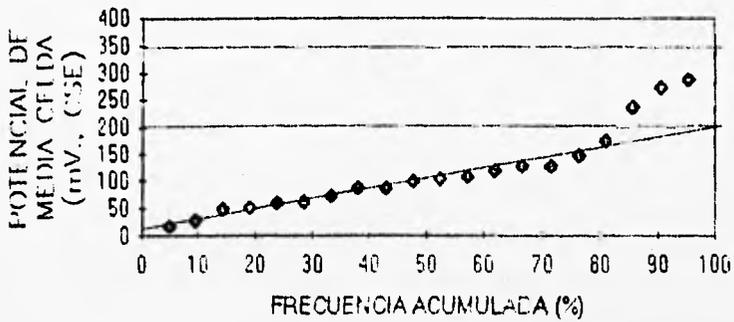
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-288.4	-273.8
50	-147.3	-176.5
75	-49.6	-129.2
100	-236.5	-87
125	-62.1	-60.5
150	-18.4	-29
175	-52.6	-73.3
200	-68.4	-101.5
225	-104.4	-119.9
250	-109.4	-128.8

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	54
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.6
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	9.4 X 10	1181.238
HUMEDO	5.6 X 1	70.371

COLUMNA 4



*NOTA. Todos los valores de los potenciales de media célula son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	80.95
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	19.05
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Esta estructura también al igual que la anterior muestra valores de resistividad altos y un 80.95 % de baja probabilidad de corrosión, aunque el frente de carbonatación se encuentra avanzado, todavía no llega a la varilla de refuerzo, por lo que esta estructura se encuentra en condiciones de servicio que también son adecuadas.



COLUMNA.- 5
 UBICACION.- Planta baja del edificio "A",
 frente al salón de clases No. 2
 OBSERVACIONES.- columna que
 muestra signos de corrosión en la varilla y
 esta expuesta a exigencias mecánicas

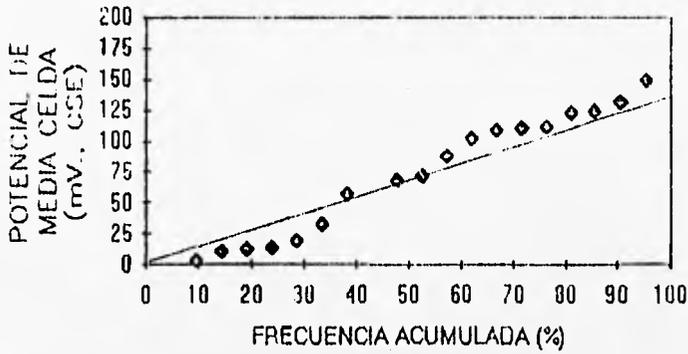
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-109.3	-150.5
50	-68.1	-58.1
75	-15.7	-14.5
100	-12.1	-2.9
125	-102.9	-3
150	-33.4	-68.5
175	-20.5	-72.2
200	-88.3	-111.3
225	-123.3	-124.8
250	-112.2	-132.5

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	54
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.1
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	0.8

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (K Ω - Cm)
SECO	1.2 X 1	15.079
HUMEDO	0.16	2.010

COLUMNA 5



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Esta estructura muestra valores de resistividad bajos y un frente de carbonatación poco avanzado con respecto al espesor de recubrimiento, por lo que existen condiciones para que se favorezca la corrosión, aunque los valores de los potenciales nos indican que todavía no hay daños por corrosión, se debe de tener cuidado con esta estructura.



COLUMNA - 6

UBICACION. - Planta baja del edificio "A",
frente a la Imprenta.

OBSERVACIONES. - Columna expuesta a
exigencia mecánica

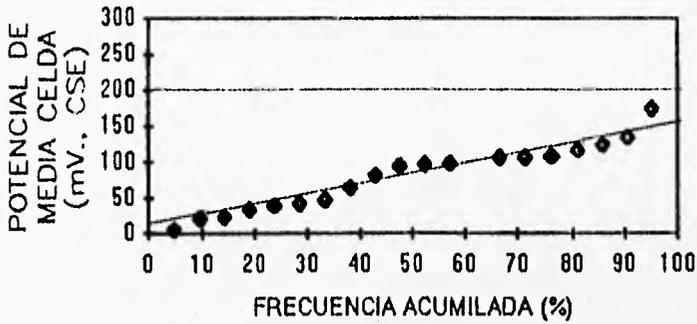
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-124.6	-175.9
50	-44	-107.5
75	-25.3	-99.5
100	-35.4	-135.5
125	-107.5	-117.5
150	-97	-108.8
175	-41	-66.9
200	-6.1	-48.8
225	-83.3	-21.1
250	-109.6	-96.4

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	56
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	1.9
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	1.4

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	2.5 X 10	314.159
HUMEDO	1.6 X 1	20.106

COLUMNA 6



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Esta estructura muestra valores de resistividad altos y un porcentaje de baja actividad de corrosión con respecto a los potenciales, también se observa que el frente de carbonatación se encuentra muy avanzado, sin embargo las condiciones de servicio mostradas son adecuadas.



COLUMNA - 7
UBICACION - Planta baja del edificio "A",
 frente a los laboratorios de física.
OBSERVACIONES - Columna expuesta a
 exigencia mecánica por encontrarse en la
 planta baja del edificio.

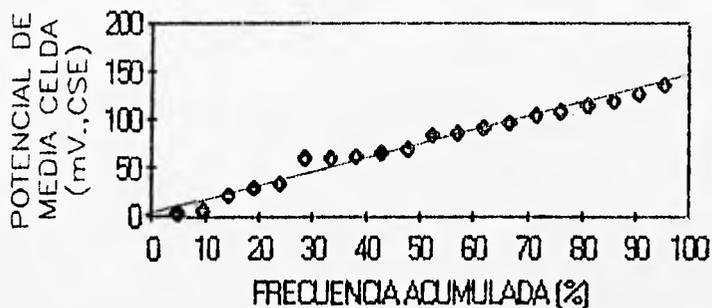
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-128.7	-118.1
50	-86.6	-115.8
75	-91.1	-136.1
100	-66.6	-104.4
125	-59.9	-97.2
150	-34.6	-84.4
175	-7.2	-62.7
200	-22.1	-2.1
225	-69.4	-30.5
250	-108.2	-61.4

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	56
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.1
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	1.4

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	5.2 X 10	779.114
HUMEDO	1.5 X 10	188.495

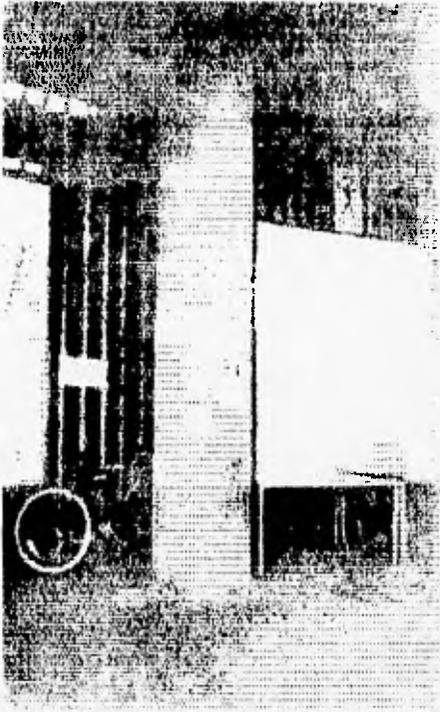
COLUMNA 7



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

La resistividad se encuentra dentro del rango de baja probabilidad de riesgo, el frente de carbonatación no está muy avanzado y los potenciales indican baja probabilidad de daños por corrosión, por lo tanto se encuentra en condiciones de servicio aceptables.



COLUMNA - 8

UBICACION - Planta baja del edificio "A"

OBSERVACIONES - Columna que presenta daños por corrosión en la varilla y exigencia mecánica.

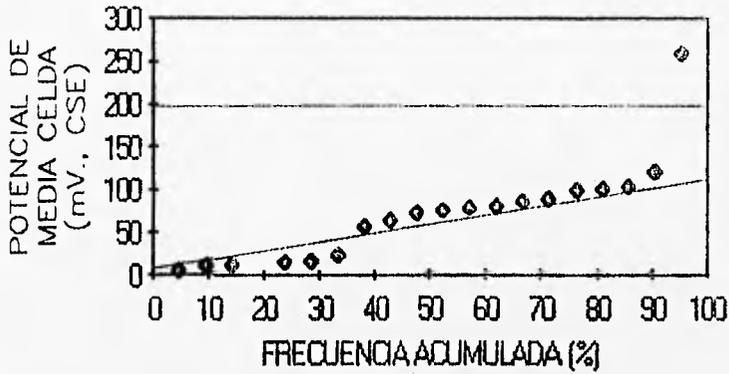
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-101.6	-100.6
50	-80.2	-17.8
75	-5.2	-12.4
100	-16.7	-260.3
125	-16.1	-24.2
150	-65.3	-58.2
175	-76	-81.6
200	-73.8	-11.9
225	-89.2	-87.2
250	-104.9	-122.3

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	56
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	1.8
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	1.3

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.8 X 10	226.194
HUMEDO	2.9 X 1	36.442

COLUMNA 8



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	90.47
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	9.53
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

La resistividad indica baja probabilidad de riesgo, por mostrar valores altos; el frente de carbonatación está muy avanzado con respecto al espesor de recubrimiento y aunque los potenciales indican baja probabilidad de corrosión en la estructura ya existen valores en la región incierta de corrosión.



COLUMNA.- 9

UBICACION.- Planta baja del edificio "A"
OBSERVACIONES.- Columna que muestra daños por corrosión en la varilla. Esta expuesta a asoleamientos, vientos predominantes y exigencias mecánicas.

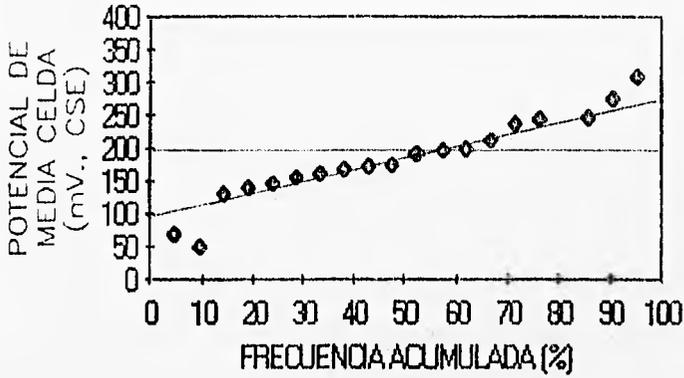
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-174.3	-68.2
50	-237.2	-141.1
75	-200.4	-197.5
100	-132.4	-246.5
125	-49.2	-212.3
150	-244.4	-162.3
175	-246.4	-146.3
200	-308	-192.1
225	-275.8	-168.9
250	-173	-156.4

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	56
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	2
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	1.7

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	2.6 X 10	326.725
HUMEDO	3.1 X 1	38.955

COLUMNA 9



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	61.9
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	38.1
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

La resistividad muestra valores que indican poca probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación se encuentra muy avanzado con respecto al valor de recubrimiento por lo que no tarda en dañar la varilla. Los valores de potencial no indican daños severos por corrosión, por lo que solo se debe tener cuidado en cuanto a la carbonatación ya que podría provocar un aumento en la probabilidad de deterioro, rompiendo la película pasivante de la varilla al llegar a esta.



COLUMNA - 10

UBICACION - Planta baja del edificio "A"
OBSERVACIONES - Columna expuesta a exigencias mecánicas, asoleamientos y vientos predominantes.

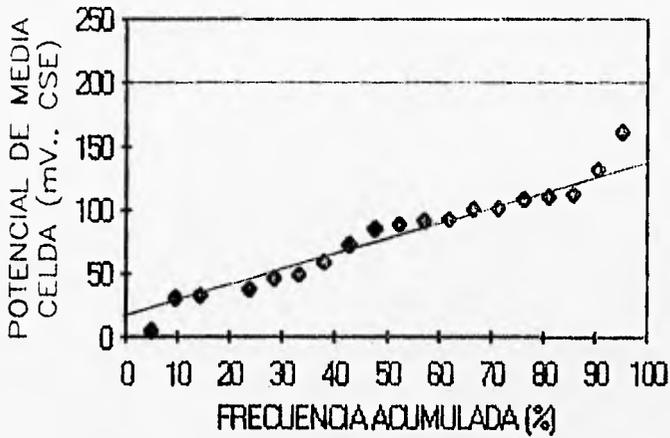
POTENCIAL DE MEDIA CEJADA

DISTANCIA Cm.	POTENCIAL mV.	
	ESTE	OESTE
25	-33.3	-59.5
50	-89.2	-38.8
75	-93	-73.3
100	-31.4	-49.9
125	-102.1	-46.7
150	-91.6	-38.2
175	-113.5	-85.3
200	-162.2	-101.8
225	-109.2	-4.7
250	-111.2	-132.7

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	56
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	4.4
PROFUNDIDAD DE CARBONATAACION (cm)	2.1

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	4.5 X 10	565.486
HUMEDO	1.6 X 10	201.061

COLUMNA 10



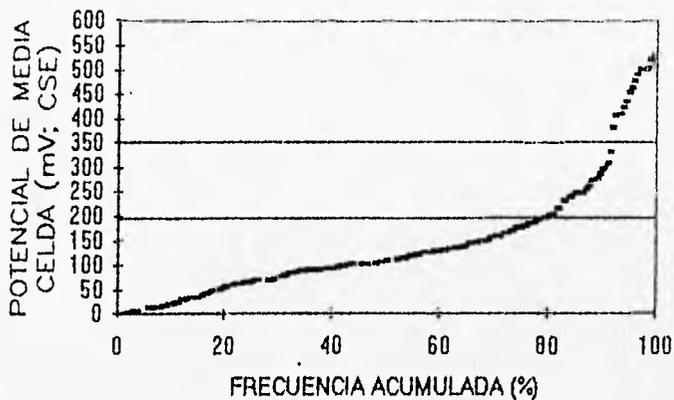
*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Los valores de la resistividad son altos, el frente de carbonatación no está muy avanzado y los potenciales no muestran probabilidad de corrosión por lo que la estructura se encuentra en condiciones de trabajo favorables.

En general la situación que presenta el edificio "A" lo podemos observar a continuación:

EDIFICIO "A"



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	80.099
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	10.945
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	8.856

6.1.2) Edificio "D"



COLUMNA.- 1

UBICACION.- Exterior del laboratorio de fundición, edificio "D"

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a asoleamientos, vientos predominantes, a exigencias mecánicas y ambiente agresivo.

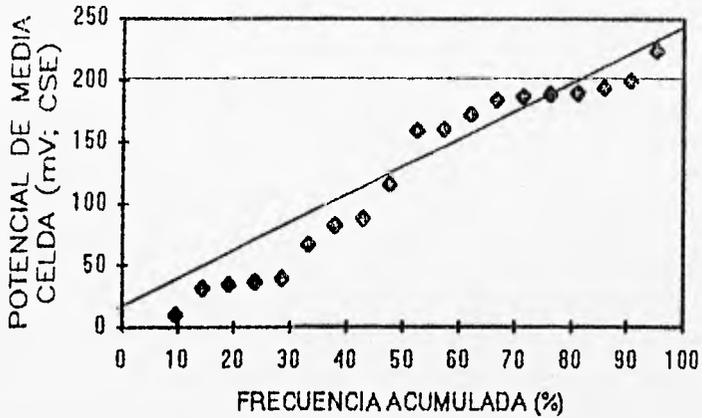
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-83,6	-116,7
50	-10,8	-40,2
75	-10,1	-35
100	-37,5	-224,5
125	-67,2	-161,4
150	-68,5	-32,9
175	-160	-172,8
200	-189,3	-184,7
225	-200,2	-194,4
250	-190,6	-187,5

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	25
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	46
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	5
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ · Cm)
SECO	7.3 X 100	9173.45
HUMEDO	1.2 X 10	150.796

COLUMNA 1



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	90.4
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCERTAS	9.53
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

El frente de carbonatación no está muy avanzado con respecto a el espesor de recubrimiento, los valores de la resistividad no indican probabilidad de corrosión y los potenciales no muestran zonas de intensa actividad de corrosión por lo que la estructura se encuentra en condiciones favorables.



COLUMNA - 2

UBICACION. - Esquina exterior del laboratorio de fundición en el edificio "D"
OBSERVACIONES. - Zona expuesta a asealamientos y vientos predominantes, a exigencias mecánicas y condiciones ambientales más agresivas.

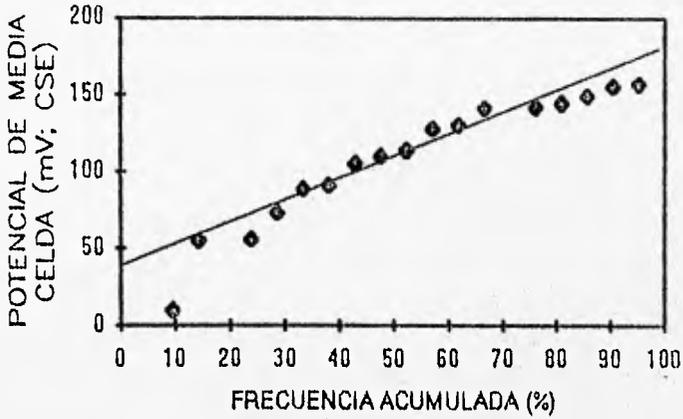
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-110,2	-142,1
50	-56,6	-56,1
75	-10,6	-10,8
100	-55,3	-73,7
125	-89,2	-91,4
150	-105,5	-114,2
175	-128,4	-130,4
200	-141,7	-142,8
225	-144,5	-149,9
250	-157	-155

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	18
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	52
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.5
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.1 X 100	1382.3
HUMEDO	3.1 X 1	38.955

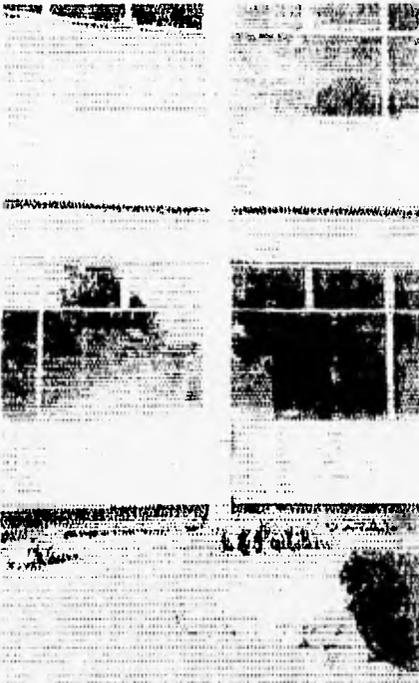
COLUMNA 2



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Los valores de resistividad indican baja probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación no está avanzado pero no lo suficiente como para dañar la varilla y los valores de los potenciales indican que la estructura no muestra daños severos por corrosión, por lo que la estructura está en buenas condiciones de trabajo.



COLUMNA - 3
 UBICACION.- Frente exterior del seminario
 II; edificio "D".
 OBSERVACIONES.- Columna expuesta a
 asoleamientos y vientos predominantes.

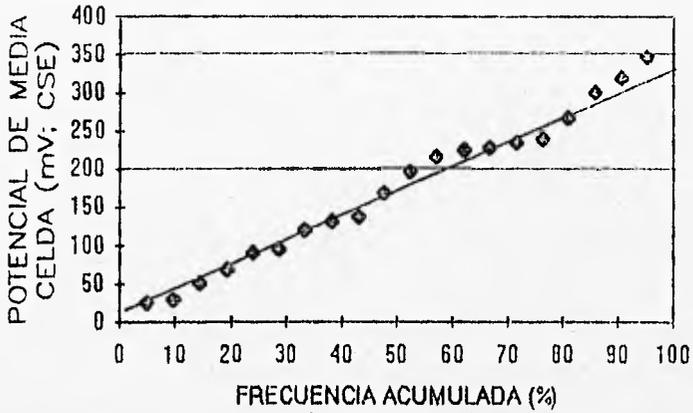
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-266,4	-319,9
50	-234,9	-301,5
75	-216,5	-228,6
100	-225,1	-240,9
125	-168,8	-348,3
150	-196,4	-137,1
175	-51,4	-68,5
200	-24,9	-28,8
225	-95,6	-89,9
250	-129,9	-120,6

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTA (°C)	20
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	54
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.9
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	NO HAY

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.6 X 10	201.061
HUMEDO	1.5 X 1	18.849

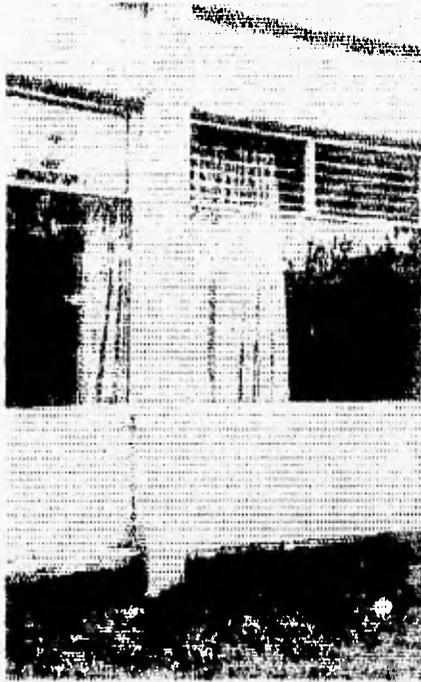
COLUMNA 3



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	52.38
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCERTAS	47.62
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Los valores de resistividad indican baja probabilidad de corrosión, no hay carbonatación en esta estructura ni tampoco existen daños severos por corrosión, por lo que la estructura se encuentra en condiciones adecuadas de trabajo.



COLUMNA - 4

UBICACION.- Exterior del seminario V; edificio "D"

OBSERVACIONES.- Zona expuesta a asealamientos y vientos predominantes.

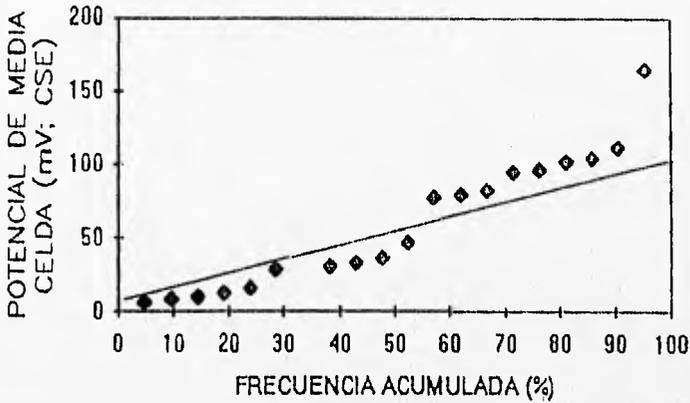
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	OESTE	ESTE
25	-96	-102,2
50	-10,5	-9
75	-16,9	-13,3
100	-83,5	-31
125	-165,9	-37,7
150	-34,4	-29,3
175	-31,6	-47,7
200	-80,3	-78,1
225	-97	-95,9
250	-112,6	-105,7

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	56
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	2.9
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	8.6 X 10	1080.7
HUMEDO	0.22	2.764

COLUMNA 4



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

El frente de carbonatación se encuentra algo avanzado con respecto al espesor de recubrimiento y la resistividad indica una probabilidad alta de corrosión en condiciones de lluvia aunque los potenciales no indican daños severos por corrosión, podrían existir en tiempo de lluvias.



COLUMNA - 5

UBICACION.- Exterior del laboratorio de corrosión (211).

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a asoleamientos y vientos predominantes

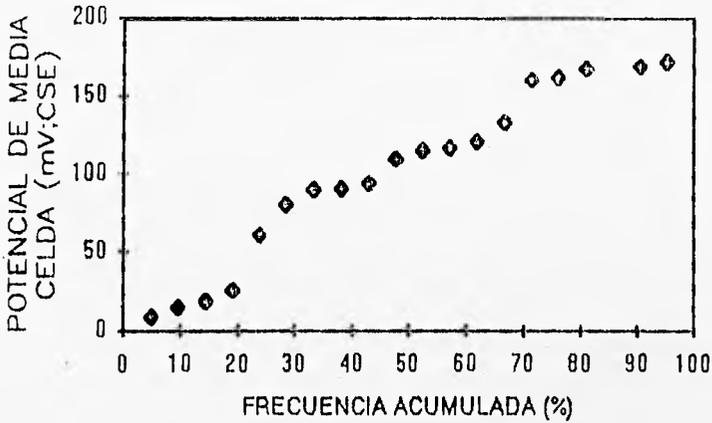
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	OESTE	ESTE
25	-61,4	-15,8
50	-26,3	-19,4
75	-91,3	-81,2
100	-121,1	-117
125	-115,9	-90,5
150	-94,4	-9,2
175	-133,4	-110,7
200	-162,8	-161,7
225	-169,2	-169,3
250	-172,3	-168

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	12
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	58
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.1
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	NO HAY

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ- Cm)
SECO	6.7 X 100	6419.468
HUMEDO	4.9 X 1	61.575

COLUMNA 5



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

No existe un frente de carbonatación, los valores de la resistividad indican baja probabilidad de corrosión y los valores de potencial indican que no hay una probabilidad alta de corrosión, por lo que la estructura se encuentra en buen estado.



COLUMNA - 6

UBICACION.- Interior del laboratorio de corrosión (211).

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a exigencia mecánica y presenta algunos daños en el recubrimiento.

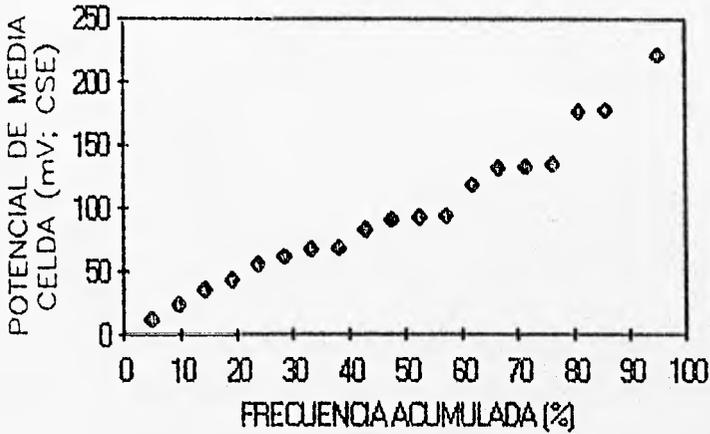
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-93,6	-94,2
50	-132,4	-119,6
75	-222,8	-177,5
100	-222,3	-178,5
125	-135,6	-133,6
150	-84,9	-91
175	-68,5	-62,8
200	-69,8	-43,8
225	-56,2	-36,4
250	-24,4	-12,5

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	13
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	4
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	NO HAY

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	7.3 X 10	917.345
HUMEDO	4.3 X 1	54.035

COLUMNA 6



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	85.71
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	14.29
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Esta estructura no muestra daños por corrosión con respecto a los potenciales ni tampoco esta carbonatada, aunque muestra daños superficiales debido a la humedad, los valores de resistividad no son altos por lo que la estructura se encuentra en buen estado.



COLUMNA - 7
 UBICACION - Frente interior del laboratorio de corrosión (211)
 OBSERVACIONES - Columna expuesta a exigencia mecánica y asfaleamientos

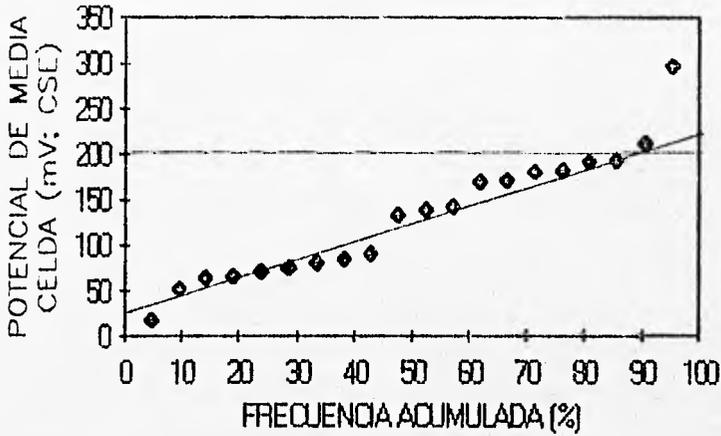
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	OESTE	ESTE
25	-143,3	-170,8
50	-65,2	-18,7
75	-82,4	-182,5
100	-86,4	-139,7
125	-91,5	-298,2
150	-67,6	-211,7
175	-53,9	-181,7
200	-172,8	-133,3
225	-72,6	-192,1
250	-76,2	-194,3

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3.3
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	9.6 X 100	12063.715
HUMEDO	0.5 X 10	62.831

COLUMNA 7



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	85.71
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	14.29
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

El frente de carbonatación se encuentra avanzado con respecto al espesor de recubrimiento, los valores de la resistividad indican baja probabilidad de corrosión y los potenciales no muestran daños severos por corrosión, por lo que la estructura se encuentra en buenas condiciones.



COLUMNA - 8
UBICACION.- Frente interior del seminario V; edificio "D".
OBSERVACIONES.- Columna expuesta a exigencias mecánicas y asealamientos.

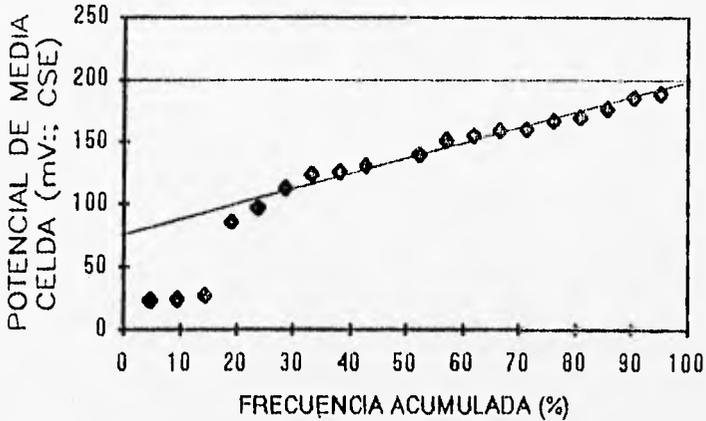
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	OESTE	ESTE
25	-140,9	-106,8
50	-25,7	-170,2
75	-152,9	-160,3
100	-24,2	-140,9
125	-161,2	-131,5
150	-113,6	-156,8
175	-97,2	-189,6
200	-168,5	-177,7
225	-86,6	-28,8
250	-127,9	-125,8

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	4.2
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	2.9

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.09	13.697
HUMEDO	4.8 X 10	603.185

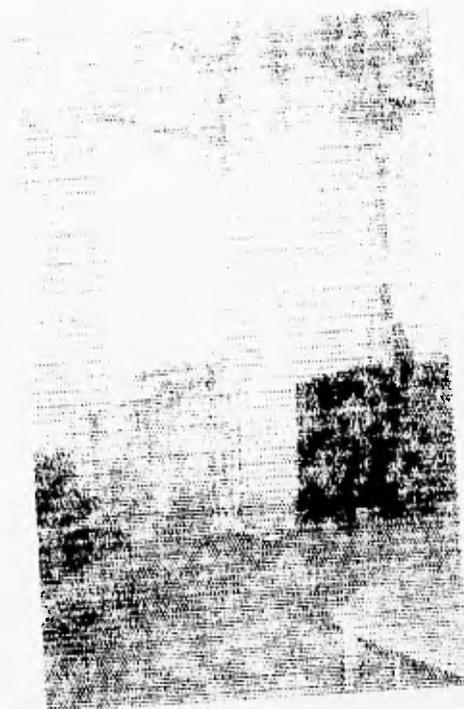
COLUMNA 8



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

El valor de la resistividad se encuentra en un valor cercano a probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación se encuentra algo avanzado y los potenciales no muestran daños severos por corrosión por lo que en algún momento de la vida de la estructura podrían existir problemas por corrosión debido a los valores de la resistividad y el frente de carbonatación.



COLUMNA - 9
 UBICACION - Interior del seminario V.
 edificio "D".
 OBSERVACIONES - Columna que
 presenta daños en el recubrimiento y esta
 expuesta a exigencia mecánica

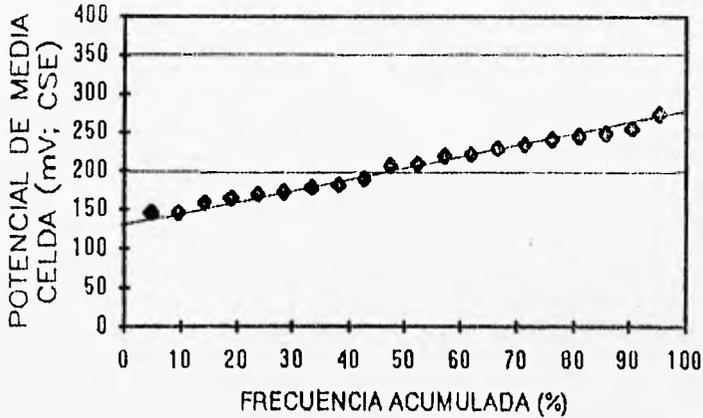
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-146,6	-183,6
50	-166,9	-174,7
75	-231,3	-235,1
100	-242,6	-223,3
125	-191,6	-208,8
150	-249,4	-246,4
175	-274,9	-256,6
200	-221,6	-211
225	-181,8	-171,8
250	-147,3	-160,8

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	13
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	64
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (Cm)	3.5
PROFUNDIDAD DE CARBONATAACION (Cm)	1.1

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	4.4 X 1	55.292
HUMEDO	0.049	0.6157

COLUMNA 9



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	52.85
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	47.15
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

El frente de carbonatación no está muy avanzado aunque los valores de resistividad indican una alta probabilidad de corrosión en tiempo de lluvias, los valores de los potenciales no indican daños severos al momento de evaluar el estado de la estructura, por lo que se encuentra en condiciones favorables de funcionamiento por lo que muy probablemente existan problemas durante el tiempo de lluvias.



COLUMNA - 10

UBICACION.- Interior del laboratorio de procesamiento de minerales; edificio "D".

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a exigencia mecánica, mostrando daños en el recubrimiento debido a que se filtra el agua por la parte superior de la columna.

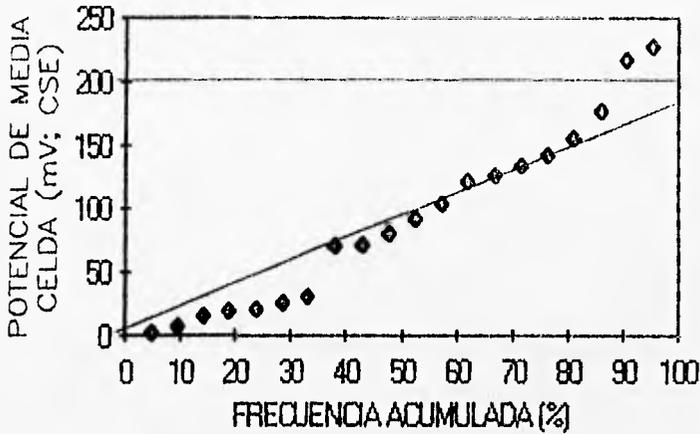
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-104,7	-228,6
50	-127	-217,9
75	-156,7	-177,9
100	-122,2	-142,4
125	-70,8	-92,5
150	-71,1	-134,8
175	-81,5	-31,3
200	-20,5	-16,3
225	-21,4	-1,5
250	-7,7	-26,1

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (Cm)	3.8
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (Cm)	NO HAY

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	3.3 X 100	4146.902
HUMEDO	9.2 X 1	115.610

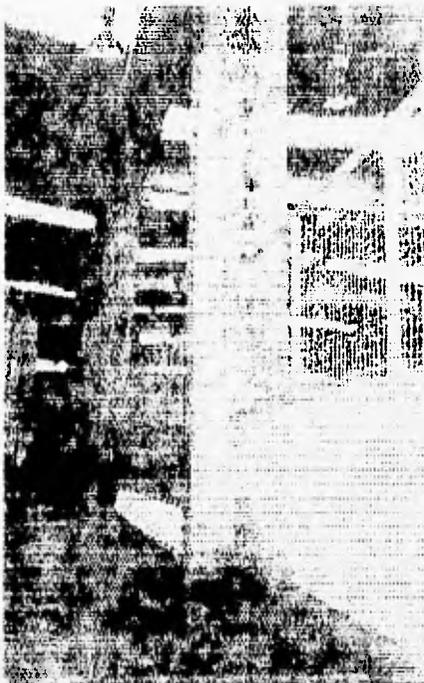
COLUMNA 10



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	85.71
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	14.29
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

No hay presencia de carbonatación, valores de resistividad indican poca probabilidad de corrosión y los potenciales no indican daños severos, por lo que la estructura se encuentra en buenas condiciones, aunque hay que notar que existe infiltración de agua por la parte superior, ocasionando una degradación del recubrimiento superficial.



COLUMNA - 11

UBICACION.- Interior del laboratorio de hidrometalúrgia; edificio "D".

OBSERVACIONES.- Presenta daños en el recubrimiento y esta expuesta a exigencias mecánicas.

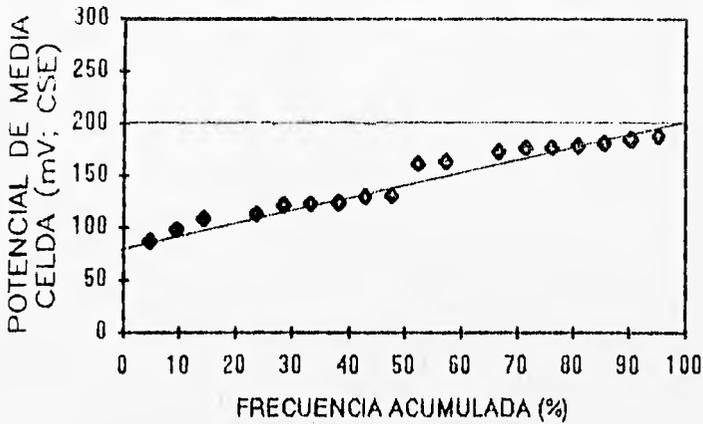
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-181,4	-173,4
50	-113,3	-113,9
75	-98,4	-87,5
100	-131,1	-124,5
125	-122,5	-121,5
150	-161,7	-163
175	-188,8	-176,4
200	-173,7	-185,3
225	-179,3	-177,1
250	-130,7	-109,3

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	14
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	5
PROFUNDIDAD DE CARBONATAACION (cm)	NO HAY

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	6.1 X 100	7665.486
HUMEDO	5.4 X 1	67.858

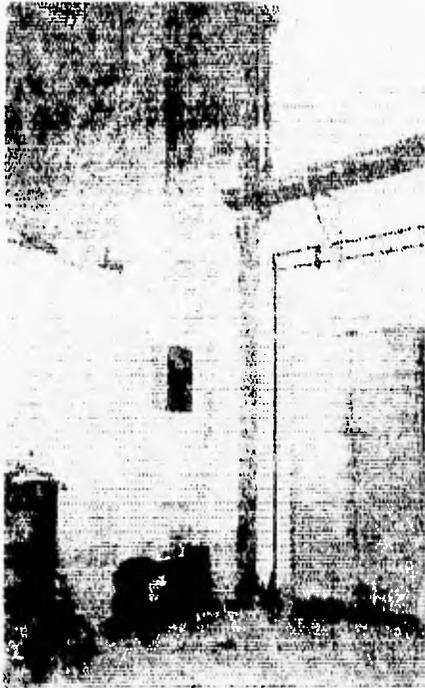
COLUMNA 11



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

La resistividad indica poca probabilidad de corrosión, no mostrándose un frente de carbonatación, los valores de los potenciales no indican daños severos por lo que la estructura se encuentra en buenas condiciones. Aunque no existe una profundidad de carbonatación, también existe una infiltración de agua por la parte superior y degradación del recubrimiento superficialmente.



COLUMNA.- 12

UBICACION.- Interior del laboratorio de fundición: edificio "D".

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a exigencias mecánicas, presentando daños en el recubrimiento en la parte superior debido a una filtración de agua.

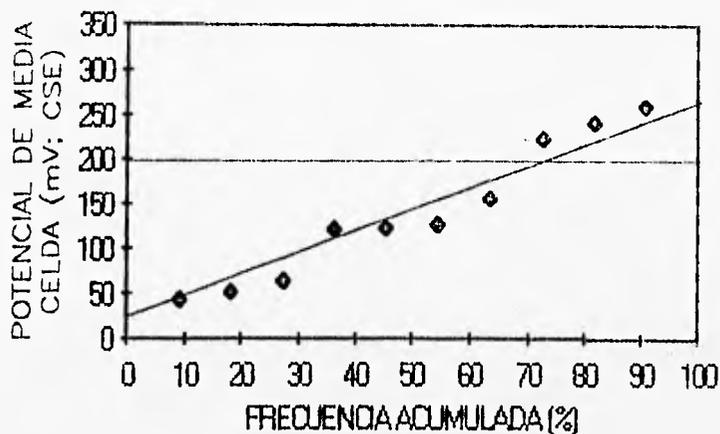
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV
	ESTE
25	-241,5
50	-259,1
75	-223,9
100	-157,8
125	-121,7
150	-51,9
175	-128,8
200	-64,6
225	-43,5
250	-122,6

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	61
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	4.3
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	NO HAY

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	2.7 X 100	3392.920
HUMEDO	4.5 X 1	56.548

COLUMNA 12



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	63.63
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	36.37
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

La estructura se encuentra en condiciones favorables según los resultados obtenidos. No existe un frente de carbonatación y no hay tampoco daños severos por corrosión. Aunque existe infiltración de agua por la parte superior y daños superficiales del recubrimiento.

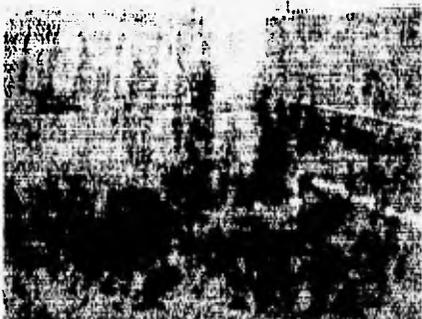


COLUMNA - 13

UBICACION. - Interior del laboratorio de máquinas; edificio "D".

OBSERVACIONES. - Columna expuesta a exigencias mecánicas, a condiciones agresivas, presentando daños en el recubrimiento del concreto debido a una filtración de agua por la parte superior.

POTENCIAL DE MEDIA CELDA

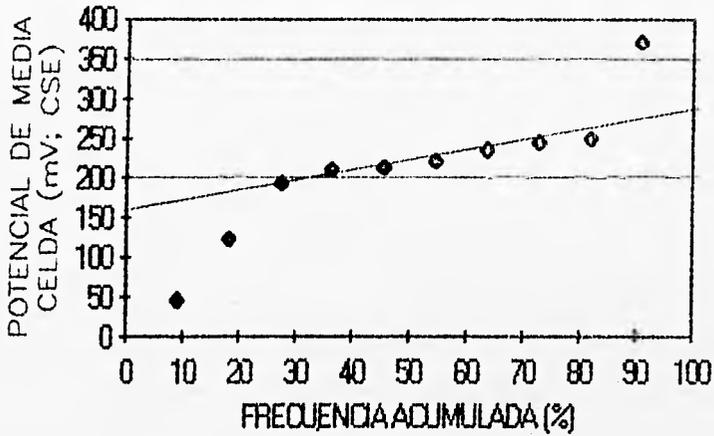


DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV
	OESTE
25	-221,2
50	-193,6
75	-211,5
100	-372
125	-249,5
150	-214,6
175	-245
200	-235,8
225	-22,6
250	-46,1

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	16
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	0.9
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	0.5

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.1 X 10	138.230
HUMEDO	4 6 X 1	57 805

COLUMNA 13



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	27.27
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCERTAS	54.54
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	18.19

Aunque los valores de la resistividad no indican probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación está algo avanzado y existe un 18.19% de daños severos por corrosión, por lo que la estructura necesita reparación ya que muestra problemas de corrosión, también se puede apreciar un pobre espesor de recubrimiento, e infiltración de agua por la parte superior.



COLUMNA - 14

UBICACION.- Exterior del laboratorio de máquinas; edificio "D".

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a asoleamientos y vientos predominantes.

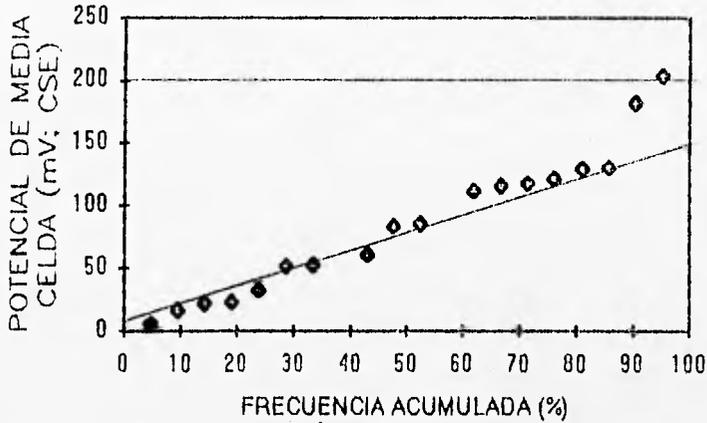
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-129,4	-182,9
50	-112,4	-130,6
75	-112,2	-116,1
100	-84,5	-85,2
125	-204,5	-118
150	-51,4	-61,9
175	-16	-52,6
200	-23,3	-22,7
225	-122,6	-5,4
250	-61,6	-33,3

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	13
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	62
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (Cm)	4.2
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (Cm)	1.2

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.7 X 10	213.628
HUMEDO	1.4 X 1	17.592

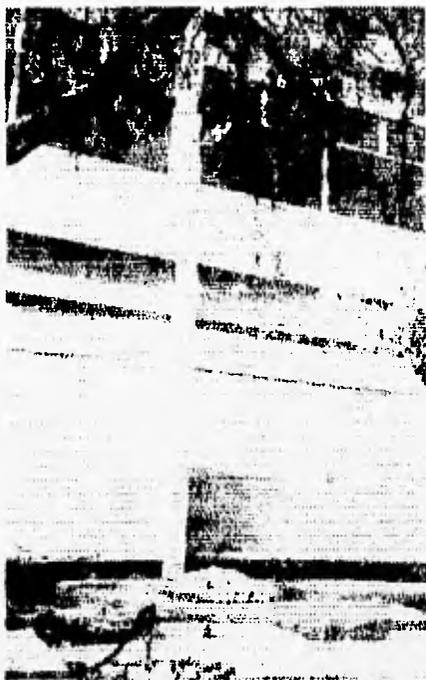
COLUMNA 14



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

Los valores de resistividad indican poca probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación no está muy avanzado y los potenciales no indican daños severos por corrosión.



COLUMNA - 15
 UBICACION - Exterior del laboratorio de
 fotografía; edificio "D".
 OBSERVACIONES - Columna expuesta a
 vientos y asoleamientos

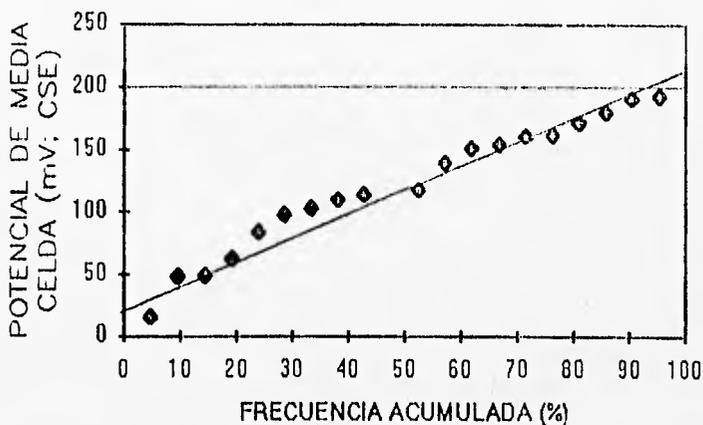
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
25	-62	-48,5
50	-110,3	-103,5
75	-98,1	-16,1
100	-118,8	-84,4
125	-114,3	-49,1
150	-139,7	-118,6
175	-161,5	-151,5
200	-162,4	-154,6
225	-180,1	-171,9
250	-193,2	-191,3

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	60
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	3,3
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION (cm)	1

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	6,1 X 1	76.654
HUMEDO	3 X 1	37.699

COLUMNA 15

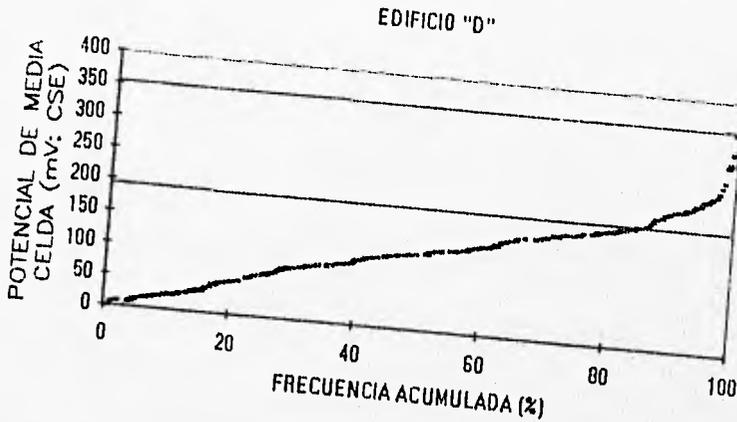


*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

El frente de carbonatación no se encuentra muy avanzado, los valores de la resistividad indican baja probabilidad de corrosión y los valores de los potenciales no muestran severidad de daños, por lo que la estructura se encuentra en buenas condiciones.

En general la situación que presenta actualmente el edificio "D" es:



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	86.071
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	13.209
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0.715

6.1.3) Biblioteca de la Facultad de Derecho "UNAM"



COLUMNA - 1

UBICACION.- Exterior de la biblioteca de la facultad de derecho; en la facultad de Derecho.

OBSERVACIONES.- Columna expuesta a exigencias mecánicas, asoleamientos y vientos predominantes.

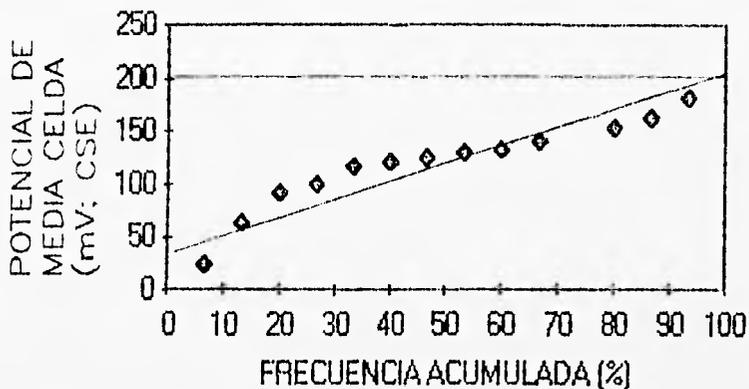
POTENCIAL DE MEDIA CELDA

DISTANCIA Cm	POTENCIAL mV	
	ESTE	OESTE
32	-153	-24,2
64	-64,4	-132,4
96	-129,4	-92,2
128	-162,7	-116,8
160	-153,6	-181,4
192	-124,1	-140,9
224	-100,6	-121,3

TEMPERATURA PROMEDIO AMBIENTAL (°C)	15
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTAL (%)	52
ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (cm)	5.3
PROFUNDIDAD DE CARBONATAACION (cm)	1

CONDICION	RESISTENCIA (K Ω)	RESISTIVIDAD (KΩ - Cm)
SECO	1.4 X 100	1759.291
HUMEDO	2.8 X 1	35.195

COLUMNA 1



*NOTA: Todos los valores de los potenciales de media celda son negativos

% DE BAJA PROBABILIDAD DE CORROSION	100
% DE CONDICIONES DE CORROSION INCIERTAS	0
% DE DAÑOS SEVEROS POR CORROSION	0

La resistividad muestra baja probabilidad de corrosión, el frente de carbonatación no está muy avanzado y los potenciales no indican daños severos, por lo que la estructura se encuentra en buenas condiciones.

Al efectuar un seguimiento de una misma varilla a través de los 3 pisos del edificio "A", los cuales corresponden a las columnas 1, 2, 3 y 8, se encontró que la columna 1 mostraba mayor deterioro seguida de la columna 2, posteriormente la columna 8 y por último la que se encuentra en mejores condiciones es la columna 3, la respuesta de la columna 8 es quizá a las condiciones de uso en las que se encuentra tal como se muestra en la fotografía 8.

En cuanto a las columnas que se encuentran en la planta baja del edificio "A", tenemos la siguiente secuencia de deterioro comienza por la columna 9 siguiendo la 4, 8, 6, 10, 5 y 7, lo cual es congruente después de hacer un análisis visual de las columnas.

En el edificio "D". Tenemos que las columnas 1 y 12 son la misma, nada más que la columna 12 se encuentra en el interior del edificio y muestra mayor deterioro así como humedad relativa.

Las columnas 4 y 9, 5 y 6, 7 y 15, muestran el mismo comportamiento que la anterior.

De las columnas 3 y 8, la columna 3 está más deteriorada debido a que se encuentra en el suelo de un jardín que se mantiene en riego constante.

Las columnas 13 y 14, también son las mismas, solo que la que corresponde al interior está más dañada, debido a que existe una filtración de agua por la azotea.

Por desgracia no se pudo determinar el tiempo en el cual llegó el frente de carbonatación a la varilla de refuerzo debido a que no se pudo evaluar el coeficiente de carbonatación (k), por falta de datos como la relación agua/cemento (a/c), empleada la que en mi opinión no se conoce debido a que no se tuvo cuidado en la fabricación del concreto, ni se siguieron las normas de construcción por que al efectuar la medición de los espesores de recubrimiento, la varilla no se encontraba a una profundidad específica si no que existían variaciones.

CONCLUSIONES

La situación general del edificio "A" muestra que existe un 80.099% de baja probabilidad de corrosión y un 10.945% de condiciones inciertas y tan solo un 8.85% se encuentra en condiciones severas.

Encontramos en el edificio "D" que el 86.071% permanece en condiciones de baja probabilidad de corrosión, un 13.209% se encuentra en condiciones inciertas y tan solo el 0.715% en condiciones severas de corrosión, lo cual indica que las estructuras de este edificio se encuentran en mejores condiciones que las estructuras del edificio "A" que es de más edad de construcción.

Los resultados obtenidos en la biblioteca de la facultad de derecho indican que su estado de servicio es favorable, mostrando menores problemas que el edificio "D" y "A" de la facultad de Química.

En general las columnas que muestran mayor problema son las interiores que se encuentran en condiciones de humedad favorables para el desarrollo de la corrosión, con poca luz y ventilación.

El frente de carbonatación se encuentra avanzado en algunas estructuras pero no ha llegado aún a la varilla, mostrando tan solo valores de potencial en la región incierta de corrosión.

La resistividad es alta casi para todas las columnas y solo en algunas disminuye notablemente como para favorecer la degradación de la estructura en condiciones de humedad, es decir en época de lluvias.

Todavía no existe un método específico para calcular la vida residual de una estructura de concreto completamente confiable, por lo que nos limitamos a un método cualitativo, es decir solo nos da una idea del estado en el que se encuentran las estructuras mostrando aproximadamente la situación de corrosión-pasividad.

El monitoreo de la corrosión es importante tanto para evitar fallas inesperadas como para evitar pérdidas innecesarias en la reparación de las estructuras, ahorrando tiempo y dinero.

Finalmente queda a un futuro muy próximo, la determinación de la velocidad de corrosión ya que este método se encuentra en etapa de desarrollo, por lo que dejó las conexiones eléctricas en las estructuras de concreto seleccionadas para su posterior monitoreo en las distintas épocas del año.

RECOMENDACIONES

El concreto se dañaría menos si las especificaciones que rigen su fabricación fueran correctas y además se tomaran en cuenta, pero para poder fijar estas especificaciones es necesario primero conocer las causas y los mecanismos que producen su deterioro, por lo que es preciso realizar más estudios acerca del comportamiento del concreto así como de los materiales que lo constituyen así como también un estudio preliminar de las propiedades que necesitara en determinado ambiente para permitir su buen desempeño bajo las condiciones de servicio dadas.

Por lo tanto es necesario aparte de conocer sus características, será necesario un análisis del medio ambiente y las características que deberá tener el concreto de acuerdo a su aplicación, para seleccionar el tipo de cemento más adecuado.

Por otro lado es necesario también dar mantenimiento a las estructuras existentes, ya que en muchas ocasiones se construye una determinada obra y después se deja al olvido sin tener el cuidado de darle mantenimiento.

Evitar contactos prolongados innecesarios del concreto con agua, tales como desagües y agua estancada.

Distribuir correctamente el refuerzo para disminuir los riesgos de fisuración del concreto.

Extremar las precauciones para asegurar un espesor de recubrimiento homogéneo.

Trabajar con una relación agua-cemento baja para obtener concretos de baja permeabilidad.

Obtener una buena compactación del concreto así como una distribución homogénea de los agregados.

Como alternativas para la recuperación de una estructura dañada sin efectuar la remoción y parcheo de concreto tenemos:

- Realkalinización.

Cuando se aplica una capa protectora con una resistencia a la difusión de dióxido de carbono de al menos 50 m., los iones hidroxil (OH⁻) empiezan a emigrar de la parte no carbonatada a la carbonatada ocasionando que ocurra una realkalinización y una subsecuente repasivación, siempre y cuando el refuerzo no este más alejada de 20 mm. de la superficie no carbonatada, de lo contrario será necesario remover y reemplazar la cubierta de concreto.

- Realcalinización forzada.

Este método consiste en una pasta altamente alcalina que es aplicada sobre la superficie, mientras una malla que funciona como ánodo es embebida en la pasta, el ánodo es conectado al refuerzo por medio de una fuente de corriente directa y se procede a aplicar un potencial relativamente alto, la solución alcalina fluirá hacia el interior del concreto debido a fuerzas osmóticas electrolíticas y cuando se eleva el pH lo suficiente en el cátodo (varilla), se forman iones OH^- , produciendo una realcalinización.

No hay suficientes datos para mencionar las posibles desventajas y la seguridad del método.

- Protección catódica.

El principio de la protección catódica es el de disminuir artificialmente el potencial de acero disminuyendo la densidad de corriente y por lo tanto la velocidad de corrosión del ánodo.

El método consiste en sujetar un ánodo sobre la superficie del concreto, convirtiendo al acero en un cátodo artificial, por medio de una fuente de corriente directa, la corriente fluirá a través de concreto del ánodo hasta el cátodo ocasionando que los aniones se moverán al ánodo del sistema y los cationes en dirección opuesta, aumentando de este modo la alcalinidad.

Los tipos de ánodos empleados pueden ser:

Revestimientos conductores - Consiste en una capa que cubre completamente la superficie del concreto, este puede ser un mortero, asfalto o pintura que se hace conductora por medio de la adición de partículas de carbón, como ejemplos podemos nombrar a una capa de asfalto conductor con ánodos de silicón de hierro y sistemas de pinturas conductoras.

Anodos distribuidos.- Estos son ánodos discretos colocados a cierta distancia sobre la superficie del concreto, existen diversos sistemas disponibles entre los cuales tenemos a ánodos de malla metálica, ánodos desnudos y lejas de óxido de titanio.

Anodos de sacrificio.- Consiste en una capa metálica que actúa como ánodo, este puede ser zinc pulverizado aplicado en una capa sobre el concreto y conectado eléctricamente al refuerzo, teniendo la ventaja que no necesita de una fuente eléctrica externa.

Las desventajas de estos tipos de sistemas es que no todos los componentes del sistema tienen la misma durabilidad, lo cual debe de ser tomado en cuenta, así como también instalar el sistema con el cuidado y las precauciones adecuadas ya que en ocasiones existen defectos como la erosión del revestimiento asfáltico.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- R. Baboian: "Corrosion a Problem of International Importance" Corrosion Testing and Evaluation. Silver Anniversary Volume, American Society of Testing and Materials STP 1000, Philadelphia, 1990, pp. 7-13.
- 2.- Avila/ Genescá. "Más Allá de la Herrumbre". La Ciencia Desde México No. 9, Edit. Fondo De Cultura Económica. pp, 17, 39-41.
- 3.- Geoff Mays. "Durability of Concrete Structures, Investigation, Repair, protection". School of Mechanical, Materials and Civil Engineering RMCS (Comfield) E & FN. SPON, 1992.
- 4.- J.A. González Fernández. "Influence of the Degree of Pore Saturation on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel Reinforcement". Cement & Concrete Research, Vol. 23 USA, 1993, pp. 368-376.
- 5.- Corrosion Basics
NACE
- 6.- Oxidación y Corrosión.
Edit. Imusa.
- 7.- J. Genescá. "Apuntes del Curso Fundamentos de Corrosión".
Primer Simposio Mexicano y Segundo Taller Internacional en Corrosión Metálica.
- 8.- "Cracking in Concrete Structures". Condensation of ACI Committe 224's "Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. ACI 224. 1R-84
Structural Repair- Corrosion damage and Control
Seminar Course Manyal/ SMC-8(85).
- 9.- M.I. Javier Alberto Gonzáles Alonso. "Apuntes de Estructuras de Concreto II". Ediciones Universidad Autónoma de Yucatón.
1991. pp. 1-11
- 10.- S. G. Millard. J.A. Harrison A.J. Edwards. "Measurement of the Electrical Resistivity of Reinforced Concrete Structures for the Assessment of Corrosion Risk".
The British Journal of Non- Destructive Testing
Vol. 31, No. 11, Nov. 1989.
- 11.- A. Rosenberg, C. Hansson, C. Andrade. "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete".
Materials Science of Concrete, 1989.
- 12.- S. Felgu. C. Andrade "Manual de Inspeccion de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras" C. N. I.
M. Madrid, España, 1989
- 13.- W. López, J.A. González. C. Andrade. "Influence of Temperature on the Service Life of Rebars".
Cement & Concrete Research. Vol. 23. 1993 pp. 1130-1140.
- 14.- R. Hope, J. Page & A. I.P " Corrosion Rates of Steel in Concrete"
Cement & Concrete Research. Vol. 16, USA, 1986, pp. 771-781.

15.- C.L. Page, K.W. J. Treadway. "Aspects of Electrochemistry of Steel in Concrete".
Nature, Vol. 297. 13 May 1982. p. 109

16.- A. Saetta, B. Schrefler, & R. Vitaliani. "The Carbonation of Concrete and the Mechanism of Moisture, Heat and Carbon Dioxide Flow Through Porous Materials".
Cement and Concrete Research, Vol. 23. 1992. pp. 761-772.

17.- D.W.S. Ho. & R.K. Lewis. "Carbonation of Concrete and its Prediction".
Cement & Concrete Research, Vol 17. 1987, pp. 489-507.

18.- C. Andrade / S. Feliú. "Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras". Centro
Nal. de Inv. Metalúrgicas / Inst. Eduardo Torroja de Ciencias de la construcción.
Madrid. España, 1989.

19.- Borrador del Manual de Inspección de la Red Iberoamericana DURAR.
Universidad Autónoma de Campeche.

20.- Elsener, B. and Bohni. H. "Potencial Mapping and Corrosion of Steel in Concrete".
Corrosion Rates of Steel in Concrete. ASTM STP 1065. N.S. Berke. V. Chaker and D. Whiting, Eds,
American Society For Testing and Materials, Philadelphia, 1990. pp. 143-156.

21.- Miranda Hernández, Margarita y López González Walter. "Estudio de la Velocidad de Corrosión de los
Refuerzos Metálicos en Estructuras de Concreto.
Tesis. Fac. de Química UNAM. 1988.

22.- Petterson, Karin. "Corrosion Threshold Value and Corrosion Rate in Reinforced concrete Swedish
Cement and Concrete"
Research Institute Stockholm, 1992. Report CBI-R-92-2 de 93769989.43 pp.

23.- Kobayashi. K. And Uno. "Influence of Alkali on Carbonation of Concrete" Part y, Preliminary Test with
Mortar Specimens, Cement and Concrete Research, Vol. 19. 1989. pp. 821-826.

24.- Pourbaix. Marcel "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" Pergamon, Press Oxford,
1966. 644 pp.

25.- Joshi, P.S. " Stimulated Decomposition of $Fe(OH)_2$ In Depresence of Awt Chemicals and Metallic
Surfaces- Relevance to Low Temperatures Feed Water Line Corrosion" The Journal of Science and
Engineering Corrosion, Vol. 49, No. 4 April 1993. pp. 300-309.

26.- Bijen, J.M.J.M. " Heron Maintenance and Repair of Concrete Structures Section Material Science"
Department of Civil Engineering Delft University of Technology Delft, the Netherlands, Vol. 34, No.2, 1989. 82
pp.

27.- Vesikari, Erkki " Service Life of Concrete Structures With Regard to Corrosion of reinforcement,
Concrete and Silicate Laboratory Valtion Teknillien Tutkimus Keskus, Tutkimutsia" Espoo Finland, August
1988, pp. 53

28.- Parrot. L.J. & Killoh "Carbonation in a 36 Years Old, in- situ concrete" Cement and Concrete Research,
Vol 19. 1989, pp 649-656.

29.- Carpio, J.J. " A Case Study of Severe Corrosion a 3 Km. Legth Bridge Over Seawater NACE '94
Conference, march 1994.

- 30.- ASTM C-876-87-10 "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete".
- 31.- Alanis, Irene, Luisa, Valentini, Cristobal. (CYTED) "Corrosión del Acero en Estructuras de Hormigon Armado". Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología Para el Desarrollo. San Martín Argentina.
- 32.- Harit, William & Balamuralkrishna, R. "Influence of Chlorides, Carbonation and Surface Films on Corrosion of Steel In Concrete" Final Report, Florida Department of Transportation Materials office, September 30, 1990, 78pp.
- 33.- Alcocer Ortiz Ivan. "Carbonatación de Estructuras de Concreto"
Tesis UNAM 1994
- 34.- Salazar Castillo René "Estudios de Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado en el Puerto de Progreso, Yuc."
Tesis Universidad Autónoma de Yucatán, 1995