
LA DEGRADACION DEL CONCRETO ARMADO

BEATRIZ POSADA BUSTAMANTE

INTRODUCCION

El concreto u hormigón armado es un material compuesto que posee características notables. La armadura de acero le confiere propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y la flexión, mientras el concreto aporta resistencia a la compresión e inercia química. Por esta razón el concreto armado es un material estructural de gran resistencia y durabilidad, entendida ésta como la capacidad de mantenerse en servicio durante un tiempo prefijado.

El concreto en sí es un material cerámico, en el cual se tiene una mezcla de cemento, agregados, agua y aire. Algunas veces, con el fin de modificar sus propiedades, se le incluyen otros productos como las adiciones y los aditivos.

Los agregados son gruesos como la grava (5-70 mm) o más finos como la arena (menor de 5mm), los cuales se aglutinan con la pasta de cemento y agua.

Es común la creencia de que el concreto tiene una muy larga durabilidad, pero en la práctica esta depende de las circunstancias, ya que el material puede ser afectado por el deterioro del alma de acero, del concreto o de ambos. En esto influyen

factores inherentes al material como la naturaleza de los componentes, la relación agua/cemento, su colocación y curado; además hay factores de carácter externo (cambios de temperatura, acción del agua y los agentes atmosféricos), factores biológicos (microorganismos), factores de servicio (desgaste) y factores físicos o químicos (fenómenos expansivos, ácidos, bases).

El concreto armado es un material estructural de gran resistencia y durabilidad, entendida ésta como la capacidad de mantenerse en servicio durante un tiempo prefijado.

Así pues el deterioro del concreto puede ser debido a mecanismos físicos, químicos o fisicoquímicos; la presencia del acero introduce, además, la posibilidad de un mecanismo electroquímico. En la **tabla 1** se presentan algunas alteraciones del concreto de acuerdo con el "mecanismo".

BEATRIZ POSADA BUSTAMANTE. Ingeniera Metalúrgica, Universidad de Antioquia. Profesora Area de Materiales Producción, Universidad EAFIT.

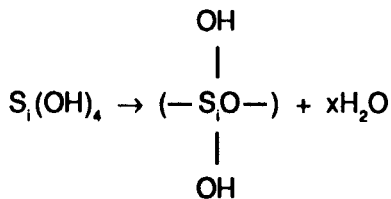
TABLA 1
Mecanismos de Deterioro del Concreto

MECANISMO	REACCION	FENOMENOS DE ALTERACIONES
Físico	Disolución de Compuestos	Aumento de porosidad y permeabilidad de la pasta en el medio, pérdida de masa, de resistencias mecánicas.
Químico	Intercambio de iones de compuestos	Formación de compuestos solubles de la pasta con los medios. Los mismos del mecanismo físico.
Físico - Químico	Formación de compuestos con aumento de volúmen	Formación de compuestos poco solubles y expansivos, aumento de tensiones internas. Fisuración, caída de resistencias mecánicas.
Electroquímico	Formación de celdas, ánodos y cátodos.	Caída de resistencias, pérdida de masa, pérdida de adherencia, fisuración, desmoronamiento, desintegración.

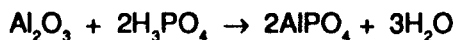
1. EL CEMENTO

Existe una gran variedad de cementos, orgánicos e inorgánicos, que por su mecanismo cementante, pueden catalogarse en: poliméricos, de reacción e hidráulicos.

Los primeros cementan al polymerizar, tal es el caso del silicato de sodio,



Ejemplos de cemento de reacción son las ligas de fosfato:



Es común la creencia de que el concreto tiene una muy larga durabilidad, pero en la práctica esta depende de las circunstancias, ya que el material puede ser afectado por el deterioro del alma de acero, del concreto o de ambos.

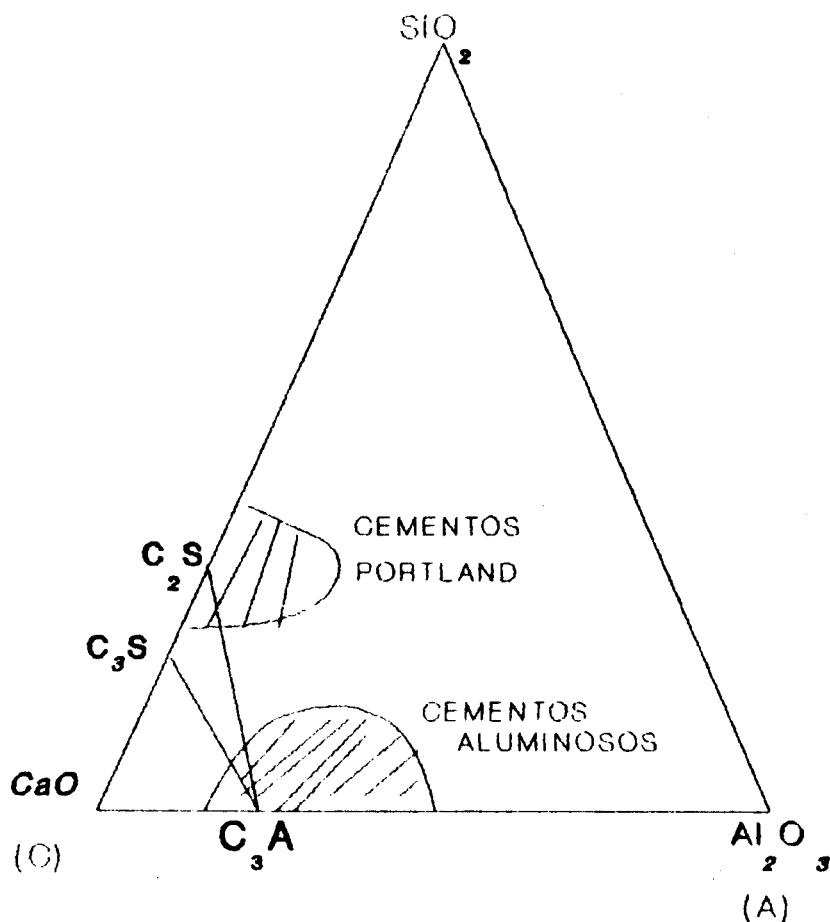
Los cementos hidráulicos aglutinan mediante una reacción de hidratación, entre ellos están el yeso, la cal y el cemento portland.

De todos estos materiales los más usados son los inorgánicos hidráulicos y cuando se habla del concreto ordinario, el ingrediente esencial es la pasta de cemento Portland.

Este cemento fue desarrollado por Joseph Aspdin, un albañil de Leeds, Inglaterra, quien en 1824 recibió una patente para un cemento que él llamó Portland por su parecido a una roca que se encuentra en la isla de Portland. Es una mezcla cerámica artificial que se fabrica a partir de arcilla y piedra caliza. La primera aporta sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en tanto que la segunda proporciona la cal (CaO), los intervalos de composición normal son: 19-25% SiO_2 , 5-9% Al_2O_3 , 60-64% CaO y 2 a 4% FeO , esto corresponde a las zonas que se indican en el diagrama ternario de la **Figura No. 1**. Estos componentes, en la jerga del cemento se denotan como S, A, C, y F respectivamente.

Luego de triturarlas, la arcilla y la caliza se someten a una fusión parcial en un horno a temperaturas entre 1300 y 1500°C, este proceso da origen al clinker, el cual está constituido principalmente por una mezcla de silicato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ o alita, embebido en una matriz también cristalina o mixta, de aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ y solución sólida de cal, CaO , alúmina Al_2O_3 y óxido de hierro Fe_3O_4 , la cual se ha considerado como $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$, pero que puede ir de $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Fe}_3\text{O}_4$ hasta $6\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$, denominada en general, fase ferrita.

FIGURA No. 1
Diagrama Ternario SiO_2 - Al_2O_3 - CaO
Las áreas rayadas indican los intervalos de composición de los cementos Portland y Aluminico (s)



Posteriormente el clinker se muele y se mezcla con un poco (aprox. 2%) de yeso dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, y se obtiene así el cemento Portland comercial. En general la granulometría final puede tener más de 90% de las partículas con tamaño inferior a $44\mu\text{m}$ y cerca de 50% inferiores a $10\mu\text{m}$. En la tabla 2 se indican las composiciones y finuras de los distintos tipos de cementos.

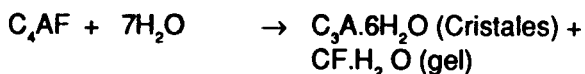
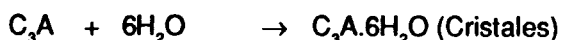
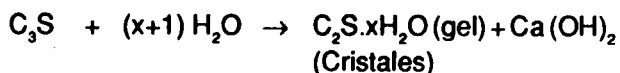
TABLA 2
Composición Típica y Finura del Cemento Portland

TIPO		PORCENTAJE DE COMPUESTOS				FINURA* cm^2/g
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
ASTM						
I	Normal	50	24	11	8	1800
II		42	33	5	13	1800
II	Fraguado rápido	60	13	9	8	2600
III		26	50	5	12	1900
IV	Resistente a sulfatos	40	40	4	9	1980

* Determinada por turbidimetría de Wagner.

1.1 La hidratación

El cemento cuando interactúa con el agua, se disuelve, recristaliza, y se precipita mediante reacciones diversas, de las cuales las principales son las de hidratación:



Los productos hidratados se forman a partir de los respectivos productos anhidros que pasan a la solución. Los primeros tienen menor solubilidad que los segundos y empiezan a cristalizar desde la solución cuando ésta se satura respecto a los anhidros. La hidratación del C_3A ocurre rápidamente con la formación de cristales de hidrato ($C_3A \cdot 6H_2O$), dando como resultado el curado relámpago. Los cristales de hidrato forman una película sobre las partículas de silicato e inhiben la hidratación posterior, así que la dureza se desarrolla de manera lenta e incompleta. Por esta razón es que se añade yeso al clinker, porque éste retarda la disolución del C_3A debido a la formación del sulfoaluminato de calcio o ettringita, que es insoluble y el cual tiene composición variable $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot xCaSO_4 \cdot yH_2O$, donde x varía de 1 a 3 y y de 10.6 a 32.6. Esta reacción evita una elevada concentración de alúmina en la solución y retarda el fraguado inicial del cemento. En la presencia de óxido de hierro la cantidad de C_3A en el cemento se reduce debido a la correspondiente cantidad de alúmina que se combina con el óxido de hierro para formar aluminoferrito tetracálcico. Como este último se hidrata más lentamente que el C_3A , se requiere menos yeso. El aluminoferrito tetracálcico se combina con el agua para formar cristales de aluminato tricálcico y un gel que es probablemente ferrito monocálcico hidratado.

Tanto el silicato dicálcico como el tricálcico se hidratan más lentamente que el aluminato tricálcico y producen una masa amorfa (gel) de silicato dicálcico. El C_3A también libera hidróxido de calcio, que se precipita fuera de la solución saturada como cristales. Se cree que esto es la causa de la tasa de endurecimiento y la resis-

tencia inicial del cemento. Cualquier exceso de agua que entre en las reacciones químicas llenará los capilares porque la presión de vapor de estos es menor que la del agua masiva. El agua capilar tiende a difundirse lentamente a los núcleos interiores de las partículas de cemento, produciendo hidratación.

En las reacciones se observa, que además de los compuestos hidratados responsables de sus propiedades mecánicas, durante la hidratación el cemento forma el hidróxido de calcio o portlandita, $Ca(OH)_2$, material soluble en agua que rellena los poros y da a la masa elevada alcalinidad (pH 12.6).

1.2 Estructura del concreto

El cemento Portland endurecido está constituido por los productos hidratados de calcio y silicato (C-S-H): El gel de tobermorita (aproximadamente $1.7CaO \cdot SiO_2 \cdot xH_2O$), ettringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$), partículas de portlandita ($Ca(OH)_2$), sales hidratadas, sales básicas y otros compuestos. Como en todos los geles se tiene una red de poros capilares y poros de gel. La porosidad de la pasta es de alrededor de 30-40% en volumen, con una distribución de tamaño que va de 0.002 a 10 μm de diámetro. Los poros abiertos son los responsables de la permeabilidad a gases y líquidos; esto es crítico en corrosión, puesto que los iones agresivos, la humedad y el oxígeno, deben difundirse desde la superficie hacia el interior del concreto. Por otro lado el exceso de agua ubicada en los poros e intersticios debilita el material, por lo que se deben tener bajas relaciones agua/cemento, en las mezclas normales las relaciones agua/cemento en peso varían entre 0.33 y 1.00 y más comúnmente entre 0.45 y 0.80

2. DETERIORO DEL CONCRETO

Ya se indicaron los muchos tipos de acciones que pueden deteriorar el concreto. Los agentes agresivos actúan sobre los componentes del cemento o sobre los productos de la hidratación, como se indica en la tabla 3. Un fenómeno muy conocido es el de la carbonatación, que produce pérdida de la alcalinidad. Esto es el resultado de la reacción con gases ácidos como CO_2 y SO_2 presentes en la atmósfera. Estos reaccionan con los álcalis (hidróxidos de calcio, sodio y potasio) neutralizándolos y generando carbonatos y sulfatos lo cual disminuye el pH hasta 9.

Las grietas presentes en el concreto, como consecuencia de la aplicación de esfuerzos mecánicos actúan permitiendo el ingreso de los gases ácidos y aniones agresivos provenientes de la atmósfera.

También las aguas producen acciones de tipo químico sobre el concreto. Las normas relativas a la calidad de las aguas que se utilizan en concreto indican que son agresivas las que contienen nada o muy pocas sustancias disueltas y las que contienen ácidos libres, sulfatos, sales de magnesio o amoníaco en cantidades apreciables.

TABLA 3
Efectos de Algunos Agentes Agresivos sobre los Productos de Hidratación del Cemento

COMPONENTE	ACCION
Tobermorita	CO ₂ , Carbonatación Acidos o formación de compuestos solubles. Pérdida de material y propiedades mecánicas.
Portlandita	Acidos, CO ₂ , sales amonia- cales, neutralización. Sales de Mg (II), intercambio iónico arrastre por disolución.
Aluminatos	Iones Cl ⁻ : formación de sales expansivas. Iones SO ₄ ²⁻ : formación de sales expansivas.

Las aguas muy puras extraen por disolución los compuestos cálcicos del concreto pues solubilizan la portlandita, degradan los silicatos, causan disminución del pH y la pérdida de masa al tiempo que generan capilares cuyo resultado final es la pérdida de resistencia mecánica. Cuando el Ca(OH)₂ es solubilizado se filtra a través del concreto, reacciona con el CO₂ atmosférico y produce la carbonatación, la cual se detecta por la formación de nódulos de color blanco.

Cuando el agua contiene ácido carbónico libre, su poder de extracción aumenta. Los ácidos húmicos a su vez retardan el fraguado del concreto y al endurecido lo deterioran a largo plazo. Los sulfatos solubles reaccionan con la cal y la alúmina generando sulfoaluminatos cálcicos expansivos. Las sales magnésicas producen la sustitución del

calcio por magnesio generando el hidróxido de magnesio que es expansivo. Durante la hidratación, en presencia de la cal, las sales amoniacaes se descomponen en amoníaco y radical ácido, este último forma compuestos solubles con la cal. Las grasas y aceites evitan la adherencia en el acero, causan pérdidas de resistencia y saponifican con la cal.

Uno de los medios mas agresivos para el concreto es el agua de mar, en ella hay una gran variedad de sales y organismos. Además contiene CO₂ y O₂ disueltos y H₂S en ciertas zonas portuarias. El grado de ataque depende de la inmersión y de la acción química en cada caso. Además las fuerzas expansivas generadas conducen a la formación de grietas, aumento de la porosidad y permeabilidad, incremento de las tensiones internas y deterioro final.

En los ambientes industriales además de las acciones químicas, el concreto está sometido a desgaste y tensiones.

Las grietas presentes en el concreto, como consecuencia de la aplicación de esfuerzos mecánicos actúan permitiendo el ingreso de los gases ácidos y aniones agresivos provenientes de la atmósfera.

En las alcantarillas, donde se dan las condiciones para la acción de las bacterias, el concreto sufre la acción del ácido sulfúrico generado por estos microorganismos.

En resumen las acciones mecánicas mas peligrosas son la abrasión, y los efectos de los fluidos como la erosión y la cavitación. Las grietas pueden aparecer por cambios volumétricos causados por contracciones de secado, creep y tensiones térmicas. Las cargas aplicadas, en especial de flexión, pueden producir efectos similares.

El fuego, y en general las temperaturas elevadas producen en el concreto armado toda una serie de modificaciones. A temperaturas inferiores a 300°C - 400°C ocurre la remoción del agua combinada químicamente o agua de gel de cemento, esto reduce la resistencia y aparecen fisuras

superficiales. Hacia 400°C el hidróxido de calcio se transforma en cal viva. A 600°C empieza a desintegrarse el concreto debido a las dilataciones diferenciales de los distintos agregados. También la temperatura disminuye drásticamente la resistencia mecánica de la armadura de acero.

3. CORROSION DE LA ARMADURA

Se sabe que la portlandita confiere al concreto una elevada alcalinidad y además pasiva el acero.

En el diagrama potencial pH esquematizado en la Figura No. 2, se observa que este comportamiento de pasivación y protección del hierro es posible para valores de pH entre 12 y 13. La película protectora de óxidos de hierro tiene un espesor del orden de 10^{-3} a 10^{-1} μm . En el mencionado diagrama se observa también que a potenciales elevados, usuales en las armaduras de acero, no se presenta evolución de hidrógeno fragilizante. Es decir que el alma de acero está protegida química y físicamente por el concreto, Figura No. 3. En

FIGURA No. 2
Diagrama de Pourbaix para el Hierro

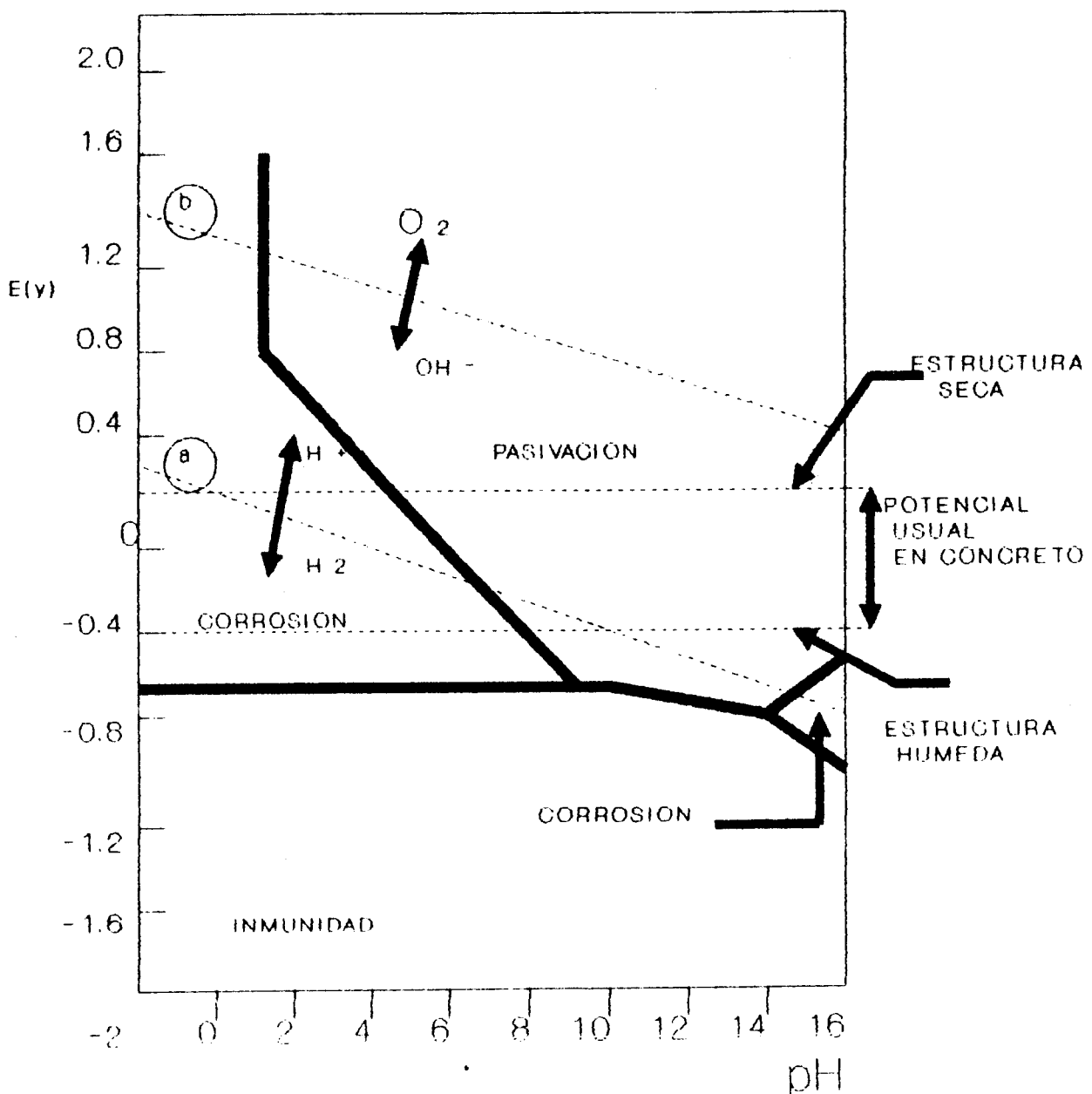
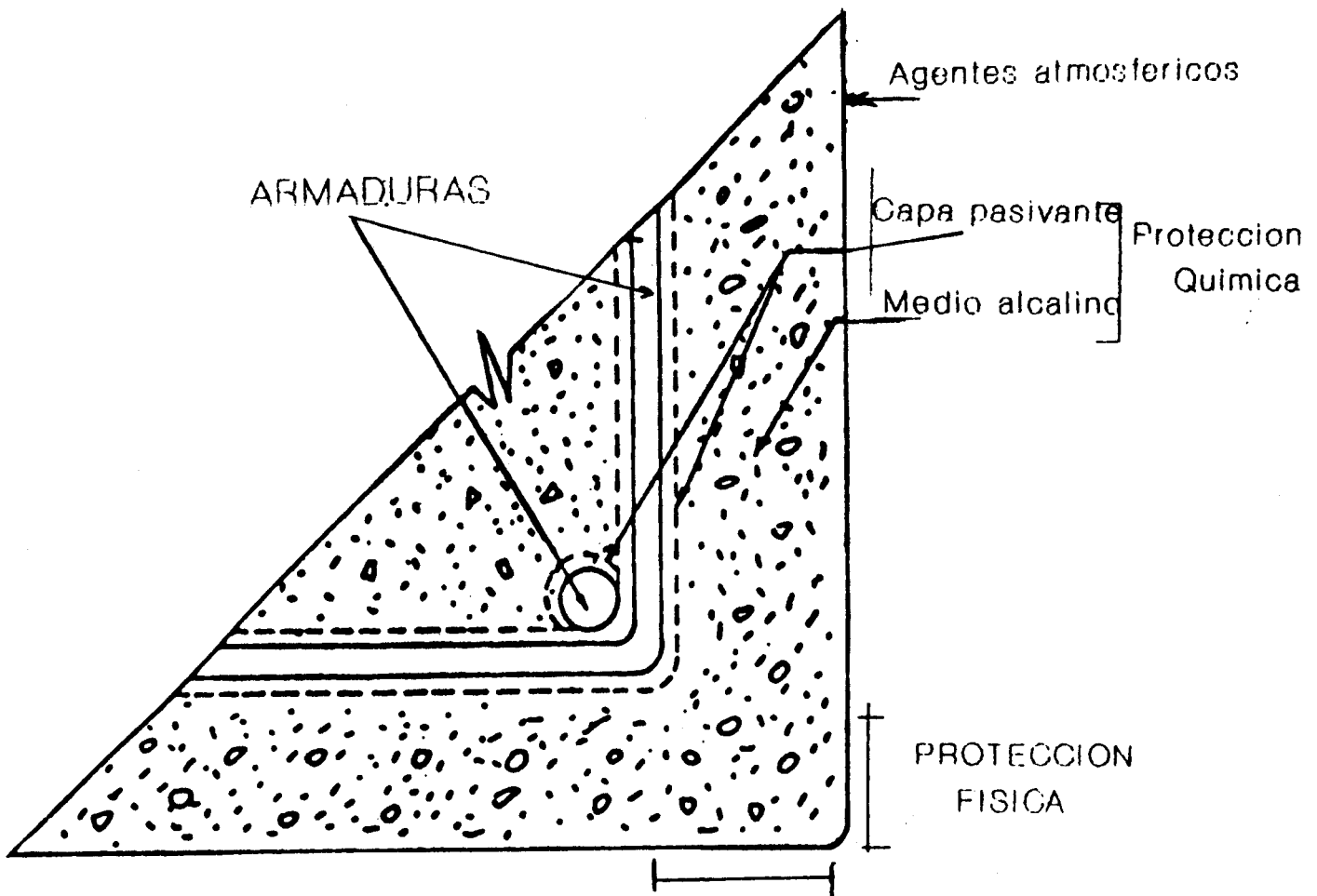


FIGURA No. 3
Protección de la Armadura por el Concreto



el mismo diagrama puede determinarse que el estado de pasivación puede perderse al disminuir el pH. Es decir que la corrosión del acero de refuerzo ocurre por la rotura de la película pasivante y tal rotura ocurre fundamentalmente por dos causas: por pérdida de alcalinidad o por la acción de los cloruros.

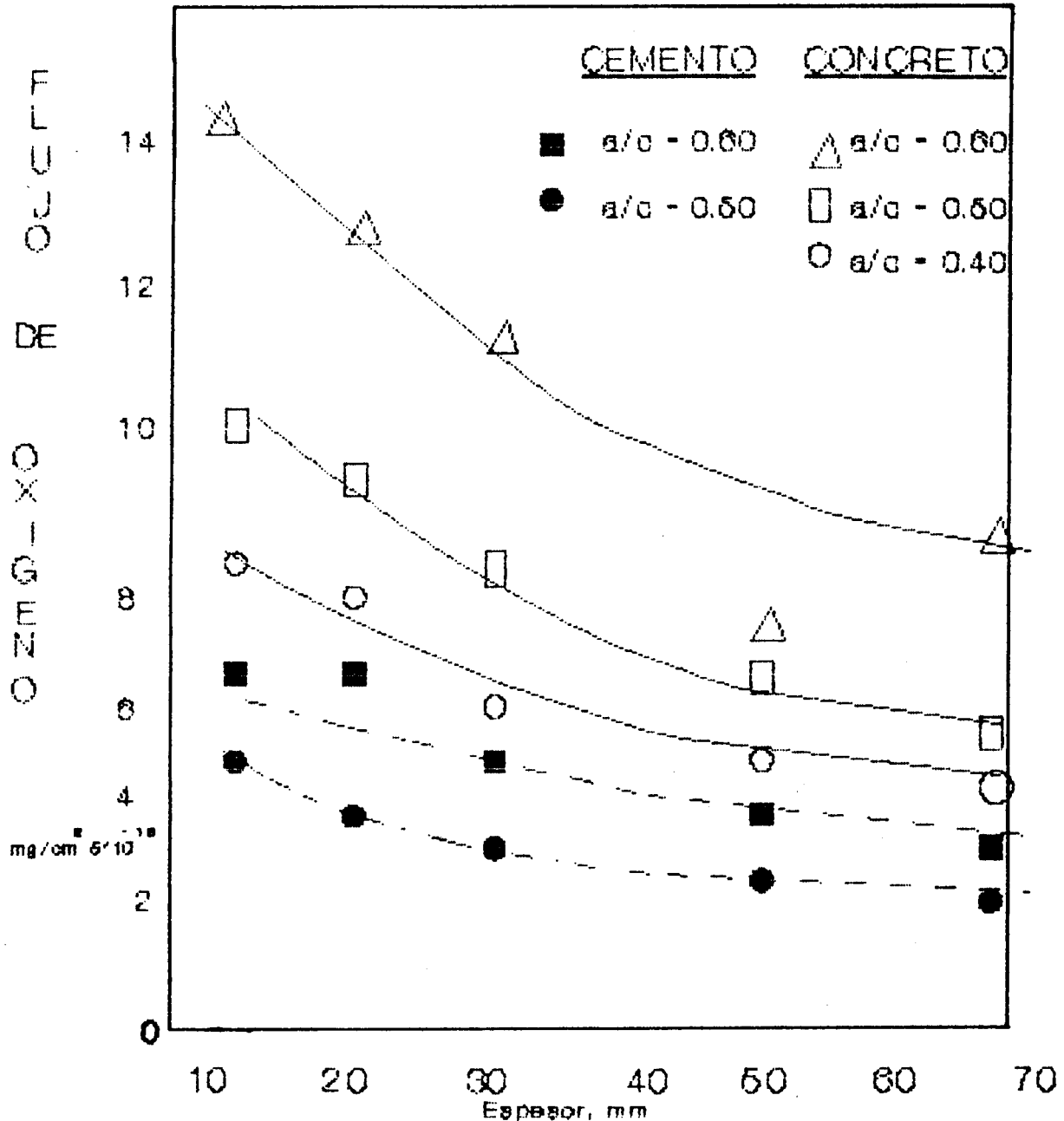
3.1 Acción de los cloruros

Los cloruros pueden llegar al concreto como contaminantes dentro del agua, los agregados o los aditivos. También son el resultado de la penetración de soluciones de cloruros desde el exterior. Esta forma de corrosión del refuerzo es acelerada por la presencia de grietas finas, a través de las cuales pueden penetrar las soluciones de cloruros.

Las aguas muy puras extraen por disolución los compuestos cálcicos del concreto pues solubilizan la portlandita, degradan los silicatos, causan disminución del pH y la pérdida de masa al tiempo que generan capilares cuyo resultado final es la pérdida de resistencia mecánica.

Existe una relación entre velocidad de corrosión, alcalinidad y concentración de cloruros, como se aprecia en la **Figura No. 4**. Se observa que hay un umbral que debe superarse para que empiece el

FIGURA 4
Efecto de la Relación Agua/Cemento y del Espesor sobre la Difusión de Oxígeno a través del Concreto



ataque, el cual corresponde a una relación entre cloruros y oxidrilos mayor o igual a 0.6. En estas condiciones, las regiones de estabilidad en el diagrama E-pH cambian apreciablemente, **Figura No. 5.**

3.2 La carbonatación

La otra manera de romper la capa pasivante es a través de la carbonatación, un proceso que

reduce la alcalinidad del concreto a un pH menor de 10, el nivel por debajo del cual no puede darse la película pasiva. La carbonatación ocurre como resultado de la penetración del dióxido de carbono, sea del aire o de la lluvia ácida, que reacciona con el hidróxido de calcio para formar carbonato, el cual, por hidrólisis genera ácidos.

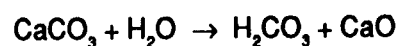
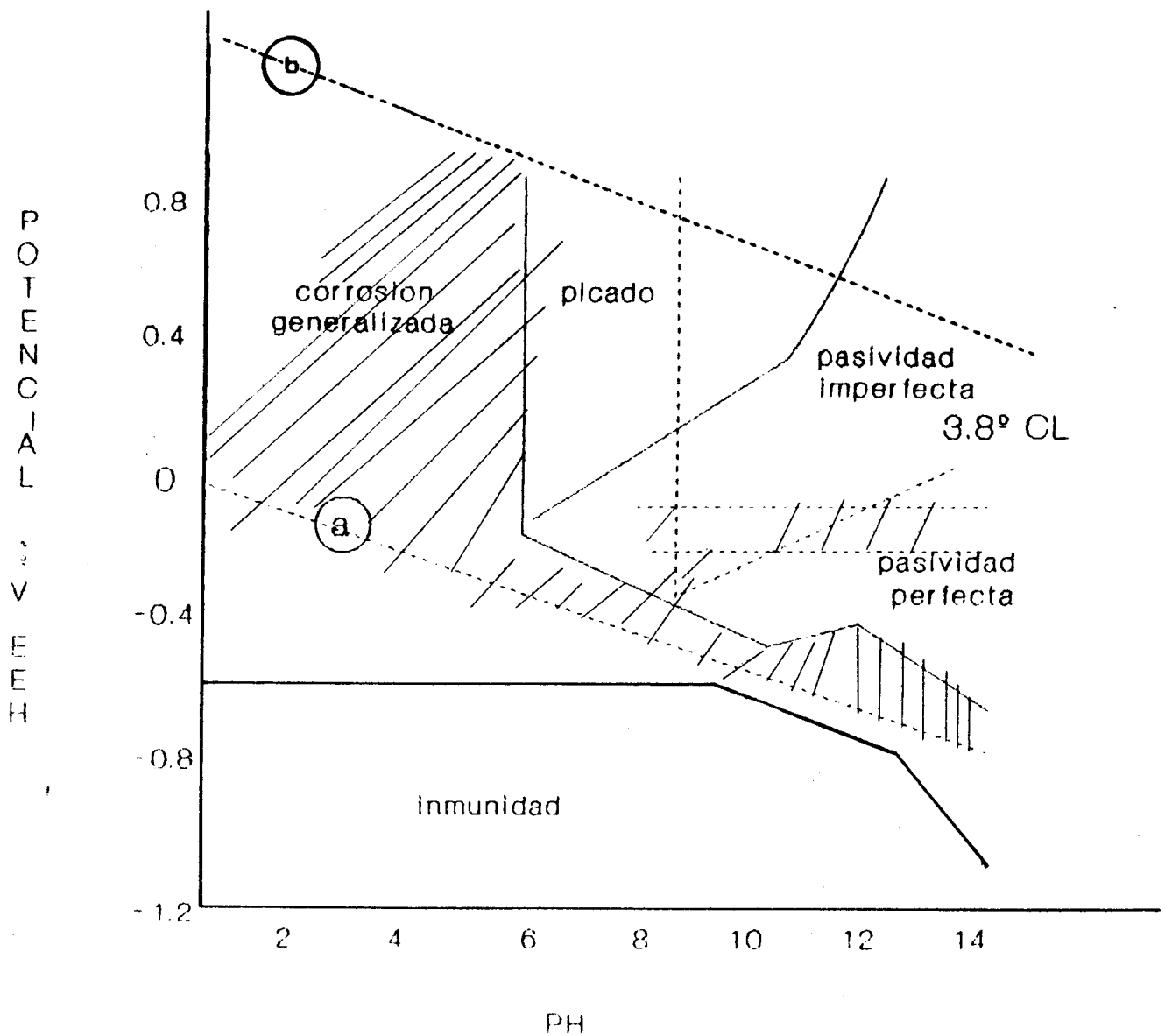


FIGURA 5
Influjo del Ion Cloruro sobre la Corrosión y Pasividad del Hierro

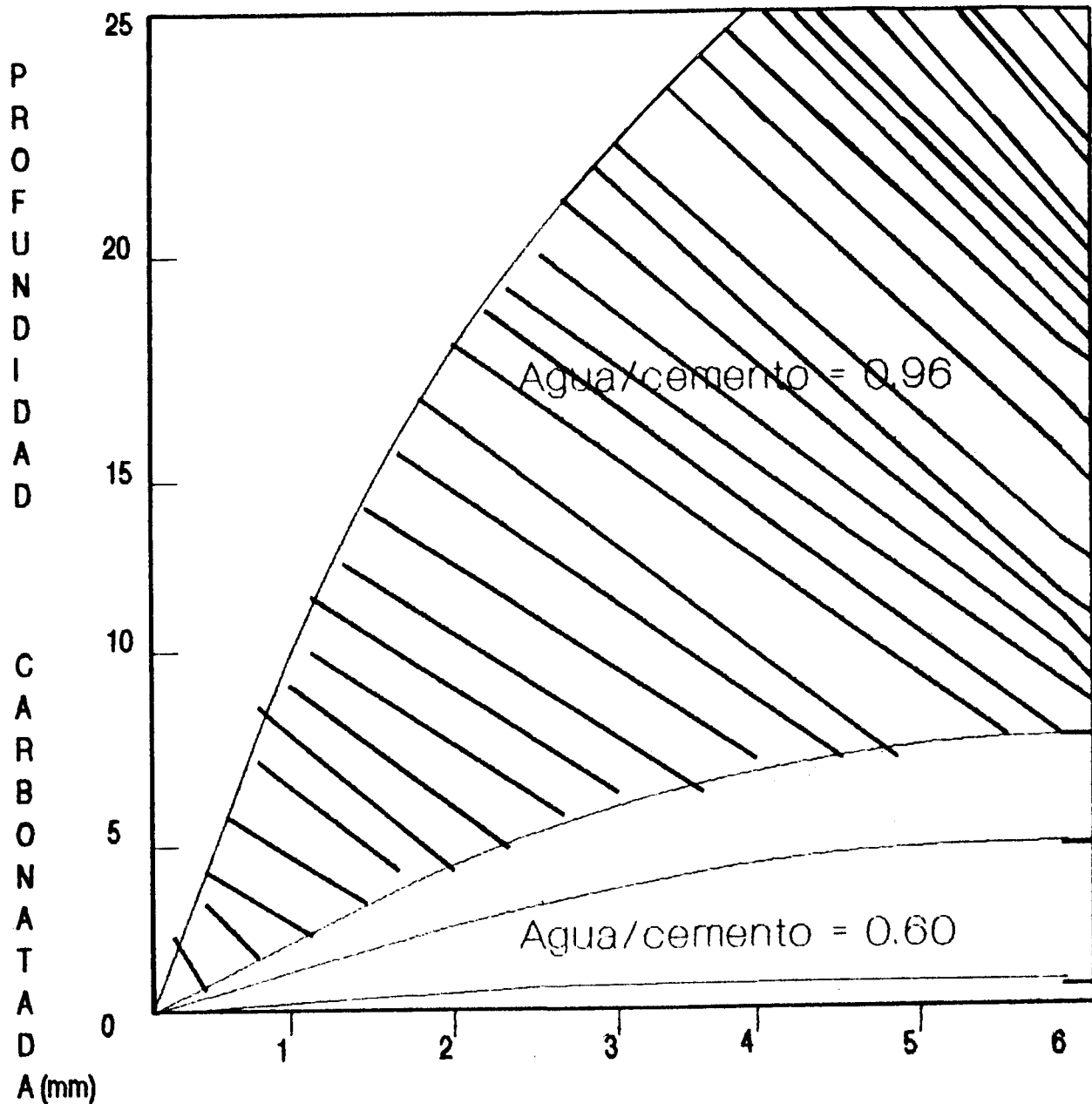


Por otro lado, en la **Figura No. 6** se observa que la profundidad de la carbonatación depende de la difusión y por tanto varía con el tiempo y, lógicamente con la relación agua/cemento y que si esta relación es inferior a 0.6, la carbonatación no penetra más de 5 mm. Aunque este proceso empieza casi inmediatamente después de que se construye la estructura de concreto, transcurre mucho tiempo para que la carbonatación cambie la alcalinidad a una profundidad que afecte el refuerzo.

3.3 Detección

En este campo debe incluirse no solamente la detección sino también el seguimiento o monitoreo, que permite obtener información sobre la velocidad y extensión del proceso corrosivo. Obviamente la forma más común de detección es la inspección visual, la cual permite por ejemplo, observar la aparición de manchas de óxido sobre la superficie, acompañadas de grietas y fisuras; pero debido a

FIGURA No. 6
Variación de la Profundidad de la Carbonatación con el Tiempo y
con la relación Agua/Cemento



sus limitaciones es común que se complemente con otros métodos de inspección.

Las técnicas no destructivas de sonido y ultrasonido, permiten detectar daños internos. Los métodos magnéticos posibilitan la ubicación de la armadura y la evaluación del espesor de recubrimiento.

El seguimiento de los cloruros exige la toma de muestras (material en polvo o núcleos) y se basa en ensayos químicos volumétricos. Normalmente se evalúa la cantidad de ión soluble en ácido, como lo especifica la norma ASTM C 114.

La detección de situaciones de corrosión también puede hacerse por medida del potencial, lo cual se

hace con una semicelda de cobre/sulfato de cobre y a través de un multímetro de elevada impedancia (más de 10 MOhm de acuerdo con la norma ASTM 876). Esta prueba indica si el material está en estado pasivo, lo cual permite determinar la actividad corrosiva con la tabla siguiente:

$E < -0.35 V_{ESC}$: Más de 95% de probabilidad de corrosión activa

$E < -0.20 V_{ESC}$: Muy baja probabilidad de corrosión activa (<5%)

$E < -0.35 V_{ESC}$ Situación de incertidumbre que se

$E > -0.20 V_{ESC}$: debe aclarar con otros ensayos

Esta tabla debe tomarse como una guía general, pues hay otros factores que complican el proceso. Por eso es más importante la variación del potencial a lo largo de la misma estructura, si ésta es inferior a 100 mV la corrosión no es peligrosa, pero si es superior a 200 mV, el proceso corrosivo será importante.

La velocidad de la corrosión se puede determinar con el uso de sondas. Una técnica consiste en la polarización de alambres embebidas en el concreto, otra consiste en hacer mediciones periódicas de la resistencia eléctrica. Este ensayo exige someter una probeta de espesor mínimo a igualdad de condiciones que el material de refuerzo. Se deben compensar los cambios de temperatura. El sistema usado es un puente AC, que evalúa el cambio de resistencia del espécimen con el tiempo y permite evaluar la corrosión. Su principal limitación reside en que sólo puede considerarse el efecto de pilas locales, mientras en las estructuras reales son muy importantes la macropilas.

La corriente anódica constante y los ensayos galvánicos permiten buena detección. En el primer caso se aplica una pequeña corriente anódica, de 5 a 20 $\mu A/cm^2$ y se sigue el cambio de potencial del acero del refuerzo con el tiempo. El seguimiento mediante la determinación de la resistencia de polarización R_p (norma ASTM G -59), permite evaluar la velocidad instantánea de corrosión.

Las técnicas de impedancia permiten detectar la ruptura de la película pasiva. También se ha usado la polarización cíclica.

La información se complementa con datos sobre la posición de la armadura y su profundidad, la resistividad del concreto, curvas de polarización de

las mismas armaduras y mapeos con ultrasonido, infrarrojo y gamagrafía. Además en el laboratorio se hacen ensayos como: profundidad de la carbonatación, ensayos mecánicos, de adherencia y ensayos de susceptibilidad a la fragilación por hidrógeno.

3.4 Corrección

Una vez detectadas las condiciones corrosivas, es necesario tomar medidas correctivas y entre ellas las principales son: aislamiento de las superficies del concreto frente al medio agresivo, modificación del ambiente para hacerlo menos agresivo, control del flujo de electrones de manera que no ocurra pérdida del metal de la estructura o aplicación de una combinación de las técnicas anteriores. Estas medidas correctivas se concretan mediante los procedimientos que se detallan a continuación.

-Limpieza a fondo de la herrumbre en las zonas de la armadura que se hayan destapado completamente en el proceso de evaluación, seguida del cubrimiento con concreto de alta impermeabilidad con el objeto de aumentar la dificultad de penetración del oxígeno del aire hasta la armadura. No debe usarse argamasa sino concreto o microconcreto con las siguientes características: relación a/c < 0.5, resistencia adecuada a las condiciones locales, cemento Portland común con C_3A entre 5 y 10% y aplicar una pintura de ligazón entre el concreto nuevo y el viejo. En este concreto de recubrimiento es posible usar una emulsión de estireno-butadieno que proporciona una elevada impermeabilidad.

La velocidad de la corrosión se puede determinar con el uso de sondas.

- Aislamiento entre el concreto y el medio agresivo con revestimientos superficiales y membranas, impregnación con polímeros o sobrecapas de concreto polimérico, concreto fluido o de concreto modificado con látex. Estos métodos son adecuados solamente cuando las superficies de la estructura de concreto están accesibles para el tratamiento. En condiciones ideales estas barreras impedirán que los contaminantes perjudiciales continúen penetrando y disminuirán la disponibilidad de oxígeno y humedad necesarios en las reacciones de corrosión. Debe recordarse, sin embargo, que los métodos de aislamiento

no proporcionan un sello perfecto, mucho menos cuando se pueden presentar discontinuidades de cualquier tipo; pero estos métodos pueden reducir sustancialmente la tasa de penetración de contaminantes y retardar el proceso corrosivo alargando sustancialmente la vida útil de la estructura.

- Remoción de especies agresivas para modificar el ambiente, estas especies agresivas pueden ser sustancias químicas como el agua y los cloruros, gases como el oxígeno y el sulfuro de hidrógeno o corrientes eléctricas.

El agua en general se puede eliminar por drenaje hacia afuera de la estructura. Los cloruros se eliminan por electromigración mediante un proceso conocido como remoción electroquímica de los cloruros, para ello la armadura se carga negativamente o sea que hace las veces de cátodo y un trozo de metal noble, rodeado de resina de intercambio iónico hace las veces de ánodo, hacia el cual fluyen los cloruros. Es un método caro y prolongado que sólo puede usarse en casos que realmente lo ameriten.

Los gases indeseables como el oxígeno y el ácido sulfhídrico se pueden retirar mediante procesos químicos que los tornan menos corrosivos. Este método es aplicable sobre todo en estructuras expuestas a las soluciones acuosas.

Una vez detectadas las condiciones corrosivas, es necesario tomar medidas correctivas y entre ellas las principales son: aislamiento de las superficies del concreto frente al medio agresivo, modificación del ambiente para hacerlo menos agresivo, control del flujo de electrones de manera que no ocurra pérdida del metal de la estructura o aplicación de una combinación de las técnicas anteriores.

- Si el problema se debe a corrientes vagabundas, éstas deben interrumpirse ya sea en su origen o por aislamientos y mediante sistemas de conexión que permitan el drenaje de las corrientes eléctricas, también pueden usarse ánodos galvánicos para este propósito. En ciertos casos se pueden examinar los puntos de contacto de la estructura con el suelo (nivel freático) por donde puede penetrar la electricidad y hacerse aislamiento de la estructura en estos puntos (en general puntas de estribo sin recubrimiento). A veces la fuente puede ser interna, debida a una pila generada por la concentración de sales, por ejemplo cuando una parte de la estructura está en contacto con sustancias químicas, o junto al mar recibe sal y humedad por un lado. En este caso debe aislarse esta región cubriendo con pintura o concreto impermeable.

- De acuerdo con el diagrama E - pH al disminuir el potencial, la armadura puede quedar en la región de inmunidad, esto se logra mediante la protección catódica, la cual se puede aplicar mediante ánodos de sacrificio de magnesio, zinc o aluminio. Los ánodos de sacrificio se corroen a tasas relativamente elevadas, para magnesio, aluminio y zinc éstas son 8, 13 y 6 Kg/año respectivamente.

Debido a las elevadas tasas de consumo y las bajas diferencias de potencial (un voltio o menos), se prefiere la protección catódica con corriente impresa usando un rectificador y un ánodo que puede ser de ferrosilicio, grafito o materiales más nobles como titanio-platinizado o niobio-patinizado. Estos ánodos se corroen a tasas inferiores a 0.5 Kg/año. La fuente de corriente puede ser un rectificador, baterías, generadores termoeléctricos o celdas fotovoltaicas. En general la protección catódica es un método muy conocido para proteger el concreto armado, pero su aplicación debe dejarse en manos de los especialistas, debido a los cálculos que son necesarios y a los peligros de la sobreprotección.

3.5 Prevención

Pero sin duda más importante que la corrección de los problemas corrosivos, es la prevención de los mismos, esto debe tenerse en cuenta desde el principio porque puede lograrse con más facilidad y economía durante las etapas de diseño y de fabricación. Tales prevenciones se resumen a continuación.

En el sentido preventivo es fundamental la calidad del concreto con respecto a la permeabilidad como factor fundamental frente a la posibilidad de difusión de agua, cloruros, oxígeno y dióxido de carbono. La permeabilidad depende de la relación agua/cemento y el tiempo de curado, véase **Figura No. 7**; se observa que en situaciones normales es suficiente con una relación menor de 0.5. Por otro lado en la **tabla 4** se muestra la influencia tan marcada que el tiempo de curado tiene sobre la permeabilidad.

Esta propiedad puede mejorarse con el empleo de algunos aditivos como la emulsión de estireno - butadieno. Por las mismas razones el proceso de fabricación debe evitar todo tipo de grietas y fisuras.

Sin duda más importante que la corrección de los problemas corrosivos, es la prevención de los mismos.

FIGURA No. 7
Efecto de la Relación Agua/Cemento sobre la Permeabilidad de la Pasta Hidratada en Agua

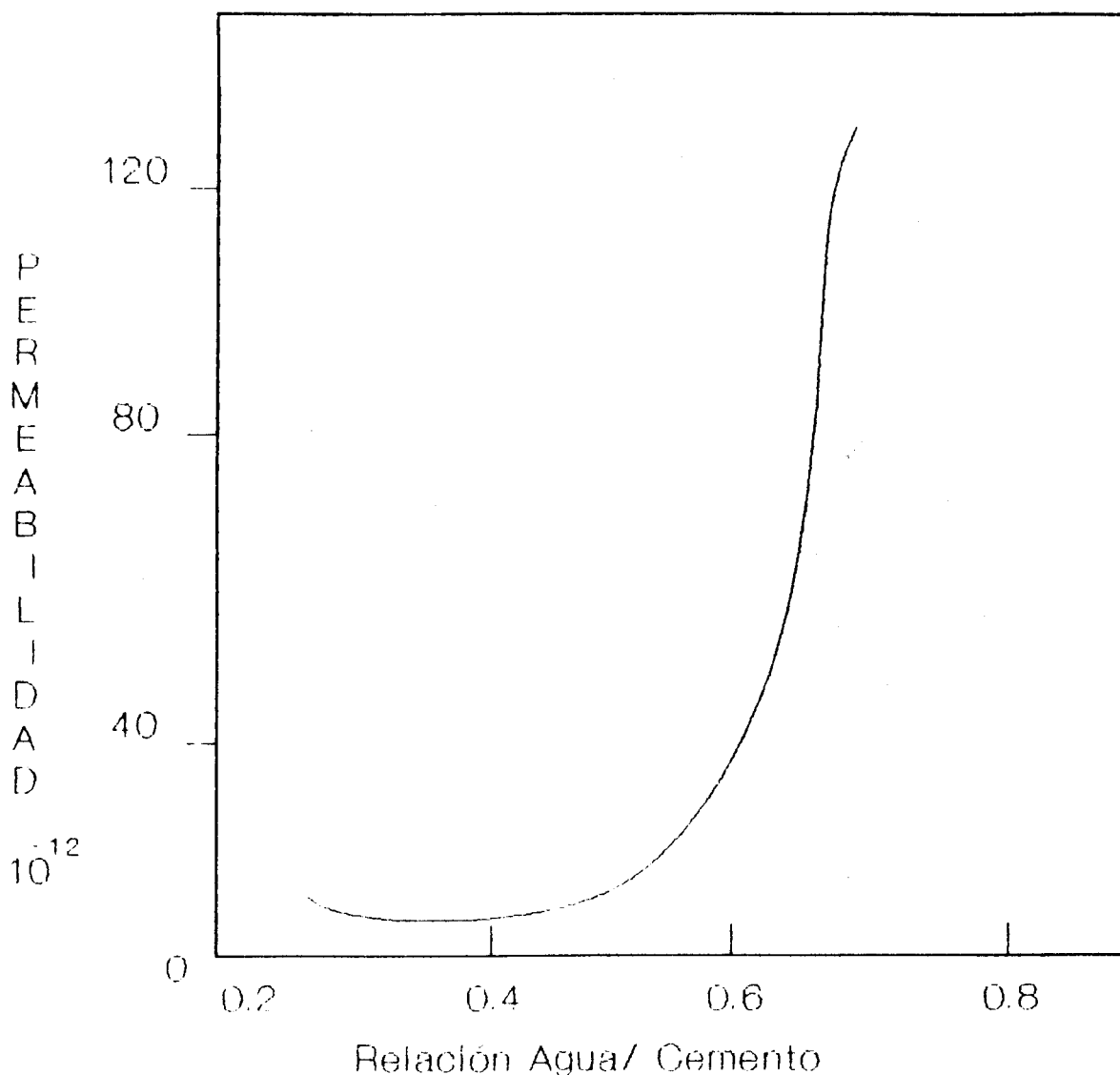


TABLA 4
PERMEABILIDAD DE ACUERDO CON
LA HIDRATACION DEL CEMENTO

DIAS DE CURADO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD
Cemento fresco	1 150 000 000
1	36 000 000
2	2 050 000
3	191 000
4	23 000
5	5 900
7	1 380
12	195
24	46

Para alejar la armadura de los agentes agresivos debe usarse el espesor señalado por las normas (ANSI/ACI-318), que no debe ser menor que el diámetro de las varillas que soportan las cargas y que más precisamente se especifican en la **tabla 5**.

TABLA 5
Valores Mínimos de Espesor de la Capa de
Concreto de Acuerdo con el Medio

Medio	Espesor mínimo (cm)
Interior de edificios	2.0
Aire libre	2.5
En suelo	3.0
Medio muy agresivo	4.0

Pero cuando las especies agresivas se difunden a través del concreto, estas pueden reaccionar con sus componentes ayudando por ejemplo a la penetración de los cloruros, **Figura No. 8**. En este caso deben seguirse de manera más estricta las normas, ya que no hay una relación matemática simple entre espesor, grado de contaminación y profundidad de penetración de las especies agresivas.

El control del contenido de cloruros en las aguas de mezcla es otra medida efectiva para prevenir la corrosión de la armadura, por eso la norma ASTM C114 establece un contenido máximo de 0.20% de cloruros en el cemento para concreto armado y 0.08% en concreto pretensado. Esto porque en el último caso son mucho más críticas las condiciones de ataque comunes con este ión, es decir disminución del área, corrosión bajo tensión y corrosión-fatiga.

Aunque en estructuras que permanecen sumergidas o en las que están siempre secas, respectivamente, hay poco riesgo de ataque debido a la presencia de cloruros en la vecindad de la armadura, lo normal es que su efecto perjudicial sea considerable, por eso se debe tener la menor relación a/c y los mayores valores de densidad, compactación, curado y espesor posibles. Entre los distintos tipos de cementos hay diversos grados de permeabilidad a los cloruros, los menos permeables son los de alto horno, siguen los puzolánicos, luego los Portland comunes y los de mayor permeabilidad son los resistentes a los sulfatos. Aquí se presenta un problema con la recomendación de combatir los cloruros con cemento alcalino y máximo contenido de C₃A, ya que esto no es posible cuando hay ataque de sulfatos.

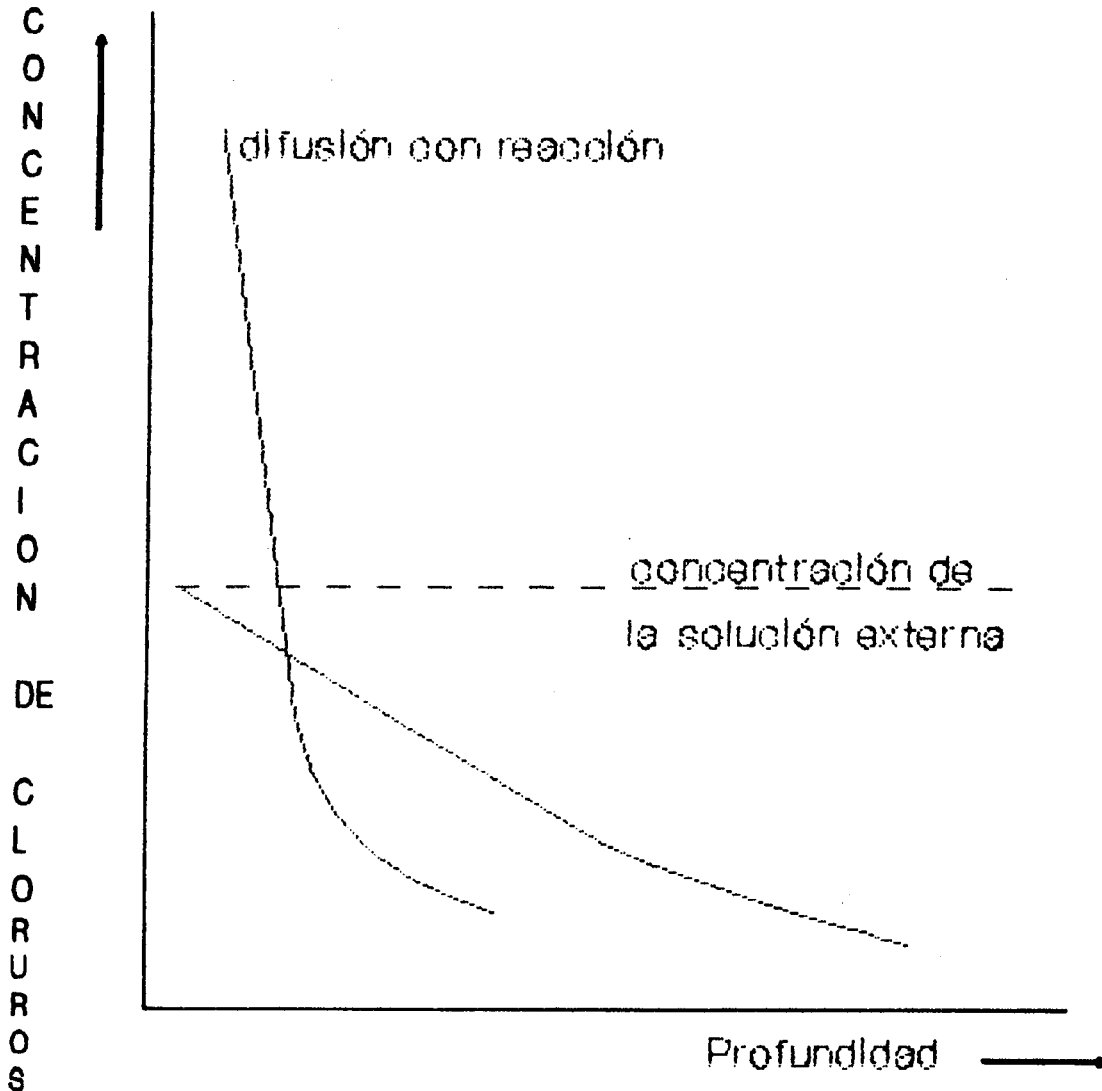
El empleo de membranas impermeables proporcionan una capa a prueba de agua a través de las cuales no pueden pasar los cloruros. Sin embargo, como se aplican en el sitio, son susceptibles a la intemperie y otras formas de ataque físico y cualquier hueco, desgarre o rotura permite el paso de los cloruros. Mas aún la complejidad de muchas estructuras hace imposible la protección de las superficies con membranas.

En el sentido preventivo es fundamental la calidad del concreto con respecto a la permeabilidad como factor fundamental frente a la posibilidad de difusión de agua, cloruros, oxígeno y dióxido de carbono.

Para evitar problemas de corrientes, es buena práctica cortar la continuidad eléctrica en la armadura y procurar una elevada resistividad eléctrica en el concreto por compactación, control de la humedad, granulometría y tipo de cemento, por ejemplo usar los de alto horno o puzolánicos en vez de los otros. Se pueden emplear también, para prevenir la corrosión, los aditivos inhibidores como cromatos, fosfatos, hipofosfatos, nitritos.

En cuanto al alma de acero su comportamiento frente a la corrosión sólo experimenta cambio significativo si el acero es muy distinto como es el caso de los aceros inoxidables, cuyos costos son prohibitivos. La estructura se puede recubrir como

FIGURA No. 8
Gradiente de Concentración de Cloruros Según si hay o no Reacciones Químicas durante la Difusión



en el caso del acero galvanizado, pero las ventajas de la protección con este recubrimiento de zinc no son muchas en un medio alcalino como el concreto; muestran mejores perspectivas los recubrimientos epóxicos. La protección catódica es sin duda una de las medidas de prevención de la corrosión de las armaduras que más se está imponiendo.

4. CONCLUSION

De una manera muy resumida se ha pretendido dar una visión de los distintos agentes que deterioran el concreto armado, ya sea por su acción sobre el concreto en sí, o sobre la armadura. Se ha determinado su origen y se han reseñado los métodos de detección, corrección y

prevención del problema corrosivo. Se espera que esto pueda ser útil, sobre todo a los constructores, quienes muchas veces preocupados por los problemas económicos, de resistencia mecánica o de diseño, olvidan principios fundamentales necesarios en la preservación del material y en el aseguramiento de una adecuada durabilidad.

REFERENCIAS

- [1] Blevot, J. Patología de las construcciones de hormigón armado. Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A., 1977.
- [2] Portland Cement Association. Principles of quality concrete. New York: John Wiley, 1980.

-
- [3] Del Vasto, S. y R. de Gutiérrez. Corrosión en concreto armado, Primer Encuentro Nacional sobre Corrosión y Protección. U. de A., Medellín 1992.
- [4] Armaduras de Concreto. Fundamentos de ingeniería de corrosión y protección. Medellín: Grupo de Corrosión, U. de A., 1992.
- [5] Allied Bar Coaters. Reinforcement Corrosion - Solving the Problem", En: Anti - Corrosion, July, 1989, p.8.
- [6] Taylor, H.W.F., The chemistry of cements. New York: Academic Press, 1974.
- [7] Berke, N.S and M.C Hicks. Electrochemical Methods of determining the Corrosivity of steel in Concrete. En: Corrosión testing and evaluation: Silver anniversary volume, ASTM STP 1000, R. Babolan and S.W. Dean, Eds., Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990, p.425.
- [8] Berke, N.S. Corrosión rates of steel in concrete. En: ASTM Standarization News. March, 1986.
- [9] Berke, N.S. et al, Protection against chloride-induced corrosión. En: Concrete International. December, 1988.
- [10] Fernández C., M., Patología y terapéutica del hormigón armado, Madrid: Editorial Dossat S.A, 1984.
- [11] Basillo, F.A. Corrosao das armaduras do concreto armado. En: Corrosao & Protecao, Fevereiro 1988, p.20.
- [12] Boyd, W.K. and K.L Tripler, Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete. En: Materials Protection. No. 10, 1967, p.40.
- [13] Locke, C.E and A. Siman. Electrochemistry of Reinforcing steel in Salt Contaminated Concrete. En: Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, ASTM STP 713, Philadelphia, American Society for testing and Materials, 1980.
- [14] Lankard, D.R., "Cement and Concrete Technology for the Corrosion Engineer". En: Materials performance, August, 1976, p.24.
- [15] American Concrete Institute, Corrosion of Metals in Concrete. En: Journal of ACI, Vol. 82, 1985, p.3
- [16] Woods, H., Durability of Concrete Constructions, American Concrete Institute, Monograph No. 4, Detroit 1968.
- [17] Bizok, I., Concrete Corrosion and Concrete Protection, Budapest: Akadémiai Kiadó, 1964.
-