

32
2 es.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"

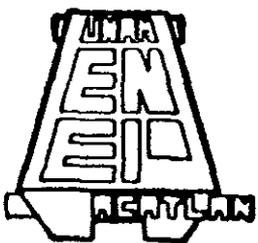
CORROSION DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO



T E S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
LUIS ALONSO ROJAS MARTINEZ

ASESOR: ING. MANUEL GOMEZ GUTIERREZ



ACATLAN EDO. DE MEX.

1998

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

269041



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLÁN"
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

SR. LUIS ALONSO ROJAS MARTÍNEZ.
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.
PRESENTE.

En atención a su solicitud presentada con fecha de 12 de junio de 1998, me complace notificarle que esta Jefatura de Programa aprobó el tema que propuso, para que lo desarrolle como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"CORROSION DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO"

- INTRODUCCIÓN
- 1 EL CONCRETO.
- 2 LA CORROSION.
- 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO
- 4 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEPOS DE CONSTRUCCION
- 5 CAUSAS Y EFECTOS DE LA CORROSION
- 6 PREVENCIÓN DE LA CORROSION.
- CONCLUSIONES

Asimismo fué designado como asesor de tesis el ING. MANUEL GÓMEZ GUTIÉRREZ, pido a usted, tomar nota en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Esta comunicación deberá publicarse en el interior del trabajo profesional.

ATENTAMENTE
" POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU "
Acatlán Edo. de México a 19 de mayo de 1998

Ing Enrique del Castillo Fragoso
Jefe del Programa

**A MI MADRE:
SER SUPREMO
DE MI EXISTENCIA Y
ESTANDARTE DE TODAS
MIS BATALLAS**

**A MI PADRE:
POR SER LA MANO QUE
ME MUESTRA EL CAMINO
Y ME EXHORTA A SEGUIR
ADELANTE**

**A MI TÍA TERE:
POR TODO EL AMOR
Y CARIÑO QUE SIEMPRE
ME HA BRINDADO**

A DIOS:

POR DARMER LA BENDICIÓN DE SER

A MÉXICO:

POR BRINDARME LA IDENTIDAD QUE ME LLENA DE ORGULLO

A MI QUERIDA UNIVERSIDAD:

POR OTORGARME LAS HERRAMIENTAS PARA
HACER MIS SUEÑOS REALIDAD

AL ING. MANUEL GÓMEZ:

POR BRINDARME SU AMISTAD, CONSEJO Y APOYO
EN LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO

AL ING. FELIPE MONTES:

POR BRINDARME SU AMISTAD Y CONSEJO.

ÍNDICE

	PAG.
INTRODUCCIÓN	
1. EL CONCRETO	1
1.1 IMPORTANCIA DEL CONCRETO	1
1.2 TIPOS DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO	3
1.2.1 ELEMENTOS ESTRUCTURALES	3
1.2.2 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONCRETO	3
1.2.3 SUPERESTRUCTURA	4
1.2.4 SUBESTRUCTURA	9
1.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO	19
2. LA CORROSIÓN	22
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA CORROSIÓN	22
2.2 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN	23
2.3 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN	27
3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO	31
3.1 CEMENTOS PORTLAND	31
3.1.1 TIPOS DE CEMENTO PORTLAND	31
3.1.2 COMPUESTOS QUÍMICOS EN EL CEMENTO PORTLAND	33
3.1.3 PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND	35
3.2 AGREGADOS PARA EL CONCRETO (GRAVA Y ARENA)	38
3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS	39
3.3 ADITIVOS PARA EL CONCRETO	53
3.3.1 FUNCIÓN DE ALGUNOS ADITIVOS	57

3.3.2 MATERIALES PUZOLÁNICOS	63
3.4 AGUA	66
4. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS DE CONSTRUCCIÓN	70
4.1 FABRICACIÓN DEL ACERO	70
4.1.1 FABRICACIÓN DEL HIERRO	70
4.1.2 FABRICACIÓN DE LOS ACEROS DE CONSTRUCCIÓN	70
4.2 CONSTANTES QUE DEFINEN UN ACERO DE CONSTRUCCIÓN	76
4.3 OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL ACERO	79
4.4 ACEROS ESTIRADOS EN FRÍO	81
4.5 COMPORTAMIENTO DEL ACERO INMERSO EN EL CONCRETO	84
4.5.1 ENSAYES SOBRE EL CONCRETO REFORZADO	84
4.5.2 IMPLICACIONES	85
5. CAUSAS Y EFECTOS DE LA CORROSIÓN	87
5.1 FUNDAMENTOS DE QUÍMICA	87
5.2 PROTECCIÓN NATURAL DEL CONCRETO	91
5.2.1 ALCALINIDAD	91
5.2.2 PASIVACIÓN Y CAPAS PROTECTORAS	92
5.3 FACTORES INHERENTES AL CONCRETO QUE INTERVIENEN EN LA CORROSIÓN	93
5.3.1 CONDUCTIVIDAD/RESISTIVIDAD	93
5.3.2 PERMEABILIDAD	95
5.3.2.1 PERMEABILIDAD AL AGUA	95
5.3.2.2 PERMEABILIDAD A LOS GASES	97
5.3.3 POROSIDAD DEL CONCRETO	98

5.4 FACTORES EXTERNOS QUE INTERVIENEN	103
EN LA CORROSIÓN	
5.4.1 FACTORES CLIMÁTICOS	103
5.4.1.1 INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE	104
5.4.1.2 EFECTOS DE LA TEMPERATURA	106
5.4.1.3 EFECTOS DE LA HUMEDAD	106
5.4.2 CARBONATACIÓN	108
5.4.3 CLORUROS	116
5.4.4 OTROS	125
5.4.4.1 EFECTOS DE LA ELECTRICIDAD	125
5.4.4.2 SUSTANCIAS AGRESIVAS	127
5.5 MECANISMOS DE LA CORROSIÓN	128
5.5.1 TIPOS DE CORROSIÓN	128
5.5.2 CONDICIONES NECESARIAS PARA LA CORROSIÓN	136
5.5.3 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN	141
ELECTROQUÍMICA	
5.5.4 PROCESO CORROSIVO	147
5.6 EFECTOS DE LA CORROSIÓN	152
6. PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN	159
6.1 RECOMENDACIONES TENDIENTES A	159
PREVENIR LA CORROSIÓN	
6.1.1 RECOMENDACIONES SOBRE EL DISEÑO DE	159
ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO	
6.1.2 RECOMENDACIONES SOBRE EL CEMENTO Y LOS	163
AGREGADOS	
6.1.3 RECOMENDACIONES TENDIENTES A LOGRAR LA	163
REDUCCIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN EL	
CONCRETO	

6.1.4 RECOMENDACIONES SOBRE EL ACERO	166
6.2 REVESTIMIENTOS SOBRE LAS BARRAS DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN	167
6.2.1 REVESTIMIENTOS METÁLICOS	167
6.2.2 REVESTIMIENTOS NO METÁLICOS	170
6.2.3 ACERO INOXIDABLE	174
6.3 INHIBIDORES DE CORROSIÓN	175
6.4 ESPECIFICACIONES TENDIENTES A LA PREVENCIÓN O AMINORACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN	178
CONCLUSIONES	186
REFERENCIAS	188
BIBLIOGRAFÍA	190

INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es un elemento de múltiples aplicaciones y de alta durabilidad, lo que lo convierte en un material de fácil acceso en el medio de la construcción. Sumado a esto, su costo relativamente económico y las ventajas que ofrece, hacen de éste el componente de construcción más importante en el presente siglo.

Pero más aún, a medida en que se desarrolla la tecnología, las innovaciones científicas avanzan y se mejoran los procesos en el campo de la construcción, las solicitudes sobre este material aumentan día con día. Lo anterior permite vislumbrar al concreto reforzado como un material con tendencias al perfeccionamiento.

Dicho perfeccionamiento implica mayores exigencias y un control más rígido sobre las características del material. Lo cual nos lleva a buscar un conocimiento pleno y profundo de todos los factores relevantes del mismo, con el fin de entenderlo, analizarlo y mejorarlo.

Es en este campo donde las patologías sobre el concreto toman especial importancia, al convertirse en el parteaguas entre tener un concreto óptimo y durable o tener un concreto deficiente al que se le pueda exigir muy poco.

Dentro de las patologías encontramos a la corrosión como una causa de degradación y deterioro sobre el concreto reforzado en las obras civiles y de edificación. Para el ingeniero civil, arquitecto o constructor estos temas le señalan dos acciones fundamentales por emprender, que son: prevenir o reparar, de las cuales la primera es la más importante sin lugar a dudas.

La poca información con que se cuenta en el medio respecto al tema, la parcial ignorancia acerca de las causas y efectos de este mal y la curiosidad personal de

buscar el entendimiento de *¿qué es la corrosión?*, son los factores que me han motivado a escribir esta tesis profesional.

No pretendiendo ser éste un texto umbral en la materia; ni ser limitativo en cuanto al contenido de la información; el presente trabajo, busca en forma modesta, ser un medio de consulta de carácter práctico y de fácil acceso a todas aquellas personas que cuenten con los fundamentos básicos en alguna rama de la ingeniería civil y que tengan interés en el tema de la corrosión.

Para alcanzar tal fin, se ha dividido el trabajo en seis partes: La primera de ellas (capítulo 1), tiene como finalidad el ratificar la importancia del concreto a través del tiempo y en la actualidad, mostrando sus múltiples aplicaciones y sus propiedades como elemento de construcción.

La segunda parte (capítulo 2) comienza a involucrarnos en el tema en cuestión "la corrosión", citando el marco histórico de este mal, así como su definición e importancia.

En los capítulos 3 y 4 se hace una descripción de los dos elementos constitutivos del concreto reforzado, concreto y acero respectivamente. Para tal efecto el concreto se analiza desde sus componentes básicos (cemento, agregados, aditivos y agua), con el fin de exponer sus tipos y características fundamentales. En cuanto al acero, se menciona su proceso de fabricación, sus características básicas y su interacción con el concreto.

La importancia de dichos capítulos radica en el hecho de que la corrosión no es un mal aislado, por el contrario, es un mal que se desarrolla en las entrañas del concreto reforzado, reaccionando con algunos elementos del concreto y degradando al acero.

El capítulo 5, es el más relevante en cuanto al contenido de información, ya que nos describe el proceso de la corrosión, sus causas, sus efectos, los factores agravantes que facilitan el ataque corrosivo, así como los mecanismos y tipos de dicho mal.

Cabe destacar dentro de este capítulo, el subcapítulo titulado "Fundamentos de Química", el cual tiene como objetivo dotar al lector (en caso de ser necesario) de los conceptos fundamentales, o más bien, indispensables de química para la correcta comprensión de la corrosión, ya que aunque el presente pretende ser un trabajo de carácter práctico, no se puede desligar el aspecto teórico. Es importante no perder de vista, que en todo momento se ha buscado la sencillez y la fácil interpretación de los conceptos y mecanismos, más que la comprensión de las fórmulas y reacciones.

Finalmente el capítulo 6, que es la parte aportativa del trabajo, pretende dotar a los interesados de una serie de recomendaciones tendientes a prevenir o aminorar la corrosión. Se citan una serie de productos o alternativas constructivas de carácter opcional, así como los criterios o normas de algunos reglamentos de construcción que rigen sobre la materia. No se debe olvidar que las recomendaciones propuestas en este capítulo deben complementar el buen juicio del ingeniero responsable de la obra.

Así que sin más que decir, se deja a consideración y juicio del lector el trabajo.

1.1 IMPORTANCIA DEL CONCRETO

El desarrollo del concreto como material de construcción se remonta varios siglos atrás en los tiempos en que el hombre comenzó a usar arcilla aglutinante para mantener las piedras juntas . Si examinamos los monumentos de épocas remotas, ya se observa el uso del concreto de una u otra forma:

Los egipcios hacían el concreto de cal y yeso calcinados empleando estos elementos juntos o separados, mientras que los griegos mezclaban cal calcinada con conchas marinas sin embargo, entre los pueblos antiguos los que hicieron el mejor concreto fueron los romanos y muestra de ello fue la construcción de los acueductos y la Vía Apia, construídos hace más de 23 siglos, usando para ello, materiales cementantes a base de cal calcinada y posteriormente desarrollaron uno a base de puzolanas y otro ligero de piedra pómez.

Con la caída del imperio romano parece que se olvidó casi en su totalidad lo que se sabía acerca del concreto, hasta 1756 cuando Juan Smeaton, ingeniero inglés, hizo un estudio concienzudo del cemento con motivo de la construcción del faro de Eddystone, cuya construcción dirigía, llegando a la conclusión de que los mejores materiales para hacer cemento hidráulico eran ciertos tipos de piedras calizas con un alto porcentaje de arcillas. En los 50 años que siguieron se realizaron estudios más profundos, hasta que en 1824 un albañil de nombre José Aspdin produjo el primer cemento tipo portland. Lo hizo calcinando en un horno una parte de arcilla y tres partes de piedra caliza, moliendo después el producto hasta convertirlo en fino polvo. Le dio el nombre de portland porque el concreto hecho con ese producto se asemejaba al color de una piedra resistente nativa de Portland, una península inglesa al oeste de la Isla Wight.

El inicio del concreto reforzado ocurrió en la segunda mitad del siglo XIX con la introducción del acero, como material de refuerzo al concreto hecho por Lambot en 1855, en la construcción de barcos de ferrocemento y en 1857, Hennebique construyó la primera estructura de concreto reforzado en Gran Bretaña en el molino de Weaver.

Durante el presente siglo, ha habido un notable desarrollo de este material como se puede apreciar en las grandes construcciones de complejos industriales, vías de comunicación y edificios en todo el mundo. Desde entonces, el concreto reforzado ha tenido una espectacular difusión como material de construcción, debido por un lado al bajo precio del cemento y a la versatilidad para adaptarse a casi cualquier forma geométrica; y por otro, a la buena adherencia que se produce entre el concreto y el acero, que ha hecho posible aprovechar las propiedades mecánicas de ambos materiales: buena resistencia a la compresión del concreto y una excelente resistencia a la tensión del acero.

Además de las ventajas estructurales que resultan de la combinación de ambos materiales, el concreto actúa como barrera física de los armados respecto del medio ambiente, y posee características químicas que ofrecen al acero una excelente protección contra la corrosión. El concreto de buena calidad, posee una considerable resistencia a la mayor parte de los agentes químicamente agresivos que existen en la naturaleza. Convenientemente dosificado, preparado, puesto en obra y curado, resiste casi todos los tipos de terreno y aguas subterráneas.

El concreto reforzado es sin duda el material más importante en la industria de la construcción, ya que ha hecho posible la infraestructura de todos los países del mundo; a través de él, se han expresado los arquitectos e ingenieros más talentosos en lo que va del siglo XX.

La información disponible coincide en señalar que es fundamental el respeto de las reglas y normas en la fabricación del concreto armado, para alcanzar una prolongada vida en servicio del mismo.

1.2 TIPOS DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

1.2.1 ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Al desarrollar el proceso de estructuración, se estudiarán inicialmente las características principales de los elementos estructurales y la manera en que participan en la formación de una estructura más compleja. Las estructuras están formadas por una serie de elementos más simples, que ya en conjunto comunican propiedades de resistencia, rigidez, etc., a la estructura. La labor del proyectista consiste en seleccionar estos elementos estructurales y combinarlos eficientemente entre sí, para constituir una estructura óptima. La etapa posterior será, el dimensionamiento de dichos miembros o elementos a partir del comportamiento de la estructura bajo la acción de solicitaciones ya definidas.

1.2.2 SISTEMAS ESTRUCTURALES DE CONCRETO

Toda estructura se dimensiona tanto en el aspecto arquitectónico (estética) como en el estructural (resistencia), para servir a una función particular. Forma y función van mano a mano y el mejor sistema estructural, es aquel que llena la mayor parte de las necesidades del usuario, siendo a la vez útil, atractivo y de un costo económico prometedor. Aunque la mayoría de las estructuras se diseñan para una vida útil de 50 años, el registro de durabilidad indica que las estructuras de concreto, dimensionadas de manera adecuada, han tenido por lo general vidas útiles mayores.

1.2.3 SUPERESTRUCTURA

MÉNSULAS

Las ménsulas son vigas pequeñas en voladizo que se proyectan en la cara interior de las columnas, para soportar cargas concentradas pesadas o reacciones de vigas. Son elementos estructurales muy importantes para el apoyo de vigas precoladas, trabes de pórticos y algunas otras formas de sistemas estructurales precolados. El concreto precolado y preesforzado se está utilizando hoy en día con mayor frecuencia en la construcción de claros más grandes, dando como resultado cargas de cortante más grandes en los apoyos. De aquí que el diseño de las ménsulas ha llegado a ser muy importante.

La seguridad total de la estructura puede depender de un buen diseño y construcción de los elementos de apoyo, en este caso, la ménsula necesitará un diseño detallado.

COLUMNAS

Las columnas son los miembros verticales que trabajan a compresión o flexocompresión en los marcos estructurales, y sirven para apoyar vigas cargadas o losas. Transmiten las cargas de los pisos superiores hasta la planta baja y después al suelo, a través de la cimentación. Puesto que las columnas son elementos que principalmente trabajan a compresión, la falla de una columna en un lugar crítico puede causar el colapso progresivo de los pisos concurrentes y el colapso total último de la estructura completa.

En términos económicos y de pérdidas humanas, la falla estructural de una columna es un evento de principal importancia. Es por esto, que se debe tener un

cuidado extremo en el diseño de éstas, que deben tener una reserva de resistencia más alta que las vigas o que cualquier otro elemento estructural horizontal, especialmente porque las fallas de compresión proporcionan muy poca advertencia visual.

Las columnas pueden adoptar distintas formas, según las características del proyecto pero generalmente son de sección rectangular o circular y de eje vertical. El concreto armado presenta la ventaja de poderse adaptar a cualquier forma junto con resistencias altas a la compresión y a la tensión. Es raro que en este tipo de material, para proyectos normales, se lleguen a presentar esfuerzos críticos por pandeo, sin embargo se deben tener siempre presentes a la hora de efectuar el diseño.

MUROS

El diafragma o muro, es un caso particular de columna a la que muchas veces sustituye con ventaja. El tipo de sollicitación más frecuente en un muro es la carga vertical uniformemente repartida. Siempre es conveniente que las cargas verticales se repartan sobre el muro por medio de una trabe rígida, para evitar concentraciones de esfuerzos y agrietamientos. Si se trata de una carga concentrada y grande, probablemente sea más conveniente transmitirla directamente por medio de castillos o columnas. Cabe mencionar que son elementos que aportan gran rigidez a la construcción, estructuralmente hablando.

VIGAS

Las vigas o trabes son elementos estructurales que están sometidos fundamentalmente a flexión, bajo la acción de cargas perpendiculares a su eje. Es

raro encontrar un elemento sometido a flexión pura, más bien se encuentran combinaciones de flexión y fuerza cortante.

En la zona de compresión, las fibras comprimidas se comportan de manera semejante a una columna, por lo que también se pueden presentar los efectos de pandeo. Por lo común una de las dimensiones de la viga, la longitud, es mucho mayor que sus otras dos dimensiones: el ancho y el peralte; en algunas ocasiones, el peralte es de dimensión comparable a la longitud y las vigas reciben el nombre de vigas de gran peralte o vigas diafragma.

VIGAS ACARTELADAS

Si el diseño está regido por flexión, se busca una variación de la sección que se adapte a la variación del momento flexionante a lo largo de la pieza. Las vigas acarteladas podrán desarrollar un momento mayor en los apoyos que en el centro de las mismas, por lo que serán apropiadas cuando se requiera determinada rigidez en los apoyos y no se disponga de espacio en la estructura para la construcción de una sección uniforme.

VIGAS COMPUESTAS

En la sección compuesta, se aprovechan las características de materiales distintos. Así, se puede proyectar una sección en que la zona de compresión sea de concreto y la de tensión esté formada por un perfil comercial de acero. Desde luego es necesario que ambos elementos estén unidos correctamente de tal manera, que puedan transmitir los esfuerzos cortantes que se desarrollan en la superficie de contacto y que la variación de las deformaciones en la sección compuesta sea lineal.

VIGAS "T"

Uno de los sistemas de construcción más comunes en estructuras de concreto consiste en losas soportadas sobre vigas. Las losas y las vigas se vuelan monolíticamente.

En los cálculos de resistencia se supone que la viga actúa conjuntamente con una porción de losa para formar lo que suele llamarse una sección "T"

ARCOS

Los arcos son elementos estructurales con un comportamiento semejante en sus extremos. Se diseñan para soportar un sistema de cargas contenidas en su plano. Las fuerzas internas que se desarrollan básicamente son axiales de compresión.

Los arcos se construyen de materiales particularmente resistentes a compresión como el concreto reforzado. Mediante el diseño de arcos de sección variable, se puede lograr que dentro de ciertos límites, el arco trabaje a compresión aunque esto no sea uniforme en la sección.

PLACAS Y LOSAS

Son miembros estructurales con una de sus dimensiones, su espesor, muy pequeña comparada con las otras dos. Generalmente están sujetas a sollicitaciones perpendiculares. En el caso de que la carga este contenidas en el plano definido por sus lados mayores, podría ser el caso de un muro o diafragma.

Las losas no son más que placas de concreto. Con ellas se forman los pisos de los edificios o construcciones y se transmiten las cargas a las *trabes de apoyo*. Estas mismas losas, cuando el edificio se encuentra sometido a fuerzas laterales, se comportan como vigas diafragmas sometidas a cargas en su plano.

Las losas principalmente trabajan a flexión en una o dos direcciones según las condiciones de apoyo. Así, una losa sobre dos apoyos, se comporta de manera semejante a una viga libremente apoyada. En cambio, una losa apoyada en sus cuatro lados, está sometida a flexión en dos direcciones y cualquier sistema de fuerzas que se aplique se transmitirá a cada uno de los apoyos. Esta transmisión de fuerzas según dos direcciones, se puede realizar al desarrollarse *esfuerzos cortantes simples* y por torsión entre las superficies en contacto de los distintos elementos que constituyen la losa. Así el trabajo de la losa es semejante al de dos trabes normales entre sí y que descansan en cuatro apoyos.

Según el tipo de apoyo las losas pueden dividirse en seis grupos principales:

1. *Losas sin continuidad con los apoyos*. Esto ocurre en las losas soportadas en vigas de acero o muros de mampostería.
2. *Losas coladas monolíticamente con las vigas de concreto sobre las que se apoyan*. Así se obtiene continuidad en los apoyos.
3. *Losas apoyadas directamente sobre columnas*. Son las llamadas losas planas. En este tipo de losas, es muy importante el esfuerzo cortante que se desarrolla en una sección alrededor de los puntos en donde existen fuertes concentraciones de fuerzas, como es el caso de las columnas. En algunas ocasiones, puede ser necesario el engrosamiento de la sección con el fin de resistir el esfuerzo cortante que se desarrolla. Este tipo de losas se puede aligerar con block hueco, o bien dejando huecos interiores, para obtener una losa con menos peso propio.

4. *Losas apoyadas sobre el terreno.* Como es el caso de los pavimentos de concreto.
5. *Losas con lados libres.* Este puede ser el caso de las losas en voladizo o en balcón, la única limitación a este tipo de losas, es que las reacciones que se desarrollan en los bordes apoyados, sean las necesarias para mantener la losa en condiciones de estabilidad. En general, las losas son elementos muy flexibles pero lo son más los extremos libres. Para evitar deformaciones grandes será conveniente rigidizar estas orillas por medio de alguna trabe de borde.
6. *Losas continuas.* Son aquellas que se apoyan de manera continua sobre varios apoyos intermedios. En estos apoyos la losa tendrá capacidad para transmitir momento flexionante y fuerza cortante. A su vez este tipo de losa podrá ser apoyada en un sentido o perimetralmente apoyada.

1.2.4 SUBESTRUCTURA

CIMENTACIONES

Las cargas de piso acumuladas de una superestructura se soportan con subestructuras de cimentación en contacto directo con el suelo. La función de la cimentación es transmitir con seguridad las reacciones muy concentradas de las columnas o los muros, o las cargas laterales de los muros de contención al suelo, sin asentamientos laterales peligrosos para la estructura que se soporta y sin falla del suelo.

Si las cimentaciones de soporte no se proporcionan adecuadamente, una parte de la estructura puede asentarse más que otra parte adyacente y, varios componentes de un sistema de estas condiciones, pueden tener esfuerzos demasiado elevados en las uniones de trabes con columnas a causa de los

asentamientos desiguales de los apoyos, que conducen a deformaciones grandes y por lo tanto agrietamiento.

La disposición de los apoyos estructurales varía ampliamente y las condiciones del suelo difieren de un lugar a otro y también dentro del mismo sitio. Así pues, estos factores y las consideraciones del costo óptimo, gobernarán la selección del tipo de cimentación.

El área de la cimentación debe ser adecuada para soportar las descargas de las columnas, el peso de la cimentación y cualquier sobrecarga, dentro de la capacidad de carga del suelo. Existen cinco tipos básicos de estructuras de cimentación:

1. *Zapatas de muros o corridas.* Estas zapatas consisten en una franja continua de losa, a lo largo del muro y de un ancho mayor que el espesor del mismo. La proyección de la losa de cimentación se trata como un voladizo cargado con la presión distribuida del suelo. La longitud de la proyección, se determina con la capacidad de resistencia del suelo; la sección crítica por flexión se encuentra en el paño del muro. El refuerzo principal se distribuye perpendicularmente a la dirección del muro.
2. *Zapatas aisladas e independientes, para columnas.* Consisten en losas rectangulares o cuadradas, que pueden tener un espesor constante o que se reduce en la punta del voladizo. Se refuerzan en las dos direcciones y son económicas para cargas relativamente pequeñas o para cimentaciones sobre roca.
3. *Zapatas ligadas.* Son similares a las zapatas aisladas, ya que la zapata de la columna exterior y la de la columna interior, se construyen independientemente, sin embargo, están unidas con una viga de liga para transmitir el efecto del

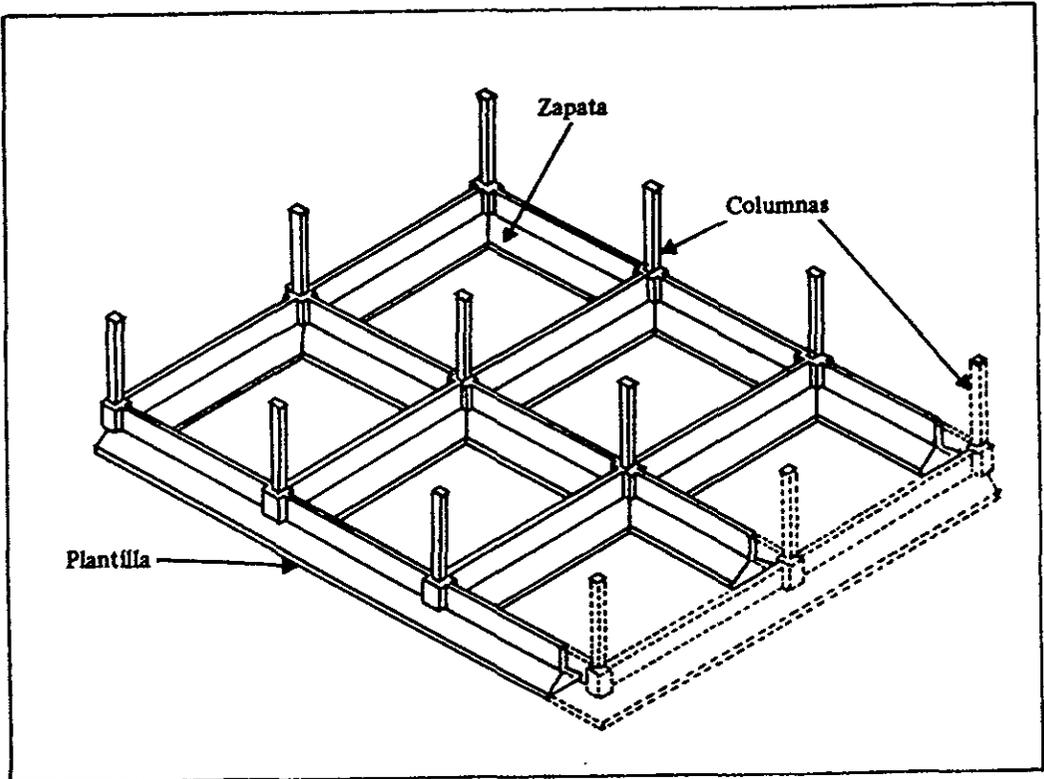
momento flexionante, el cual se produce en la columna exterior debido a la excentricidad de la carga.

4. *Cimentaciones con pilotes.* Este tipo de cimentaciones son esenciales cuando el suelo de desplante consiste de estratos poco resistentes y muy profundos. Los pilotes, según su forma de operar pueden presentar tres modalidades: a) pilotes de punta, los cuales se hincan hasta llegar a roca sólida o un estrato duro. b) *pilotes de fricción*, se hincan a la profundidad necesaria dentro del suelo, para que el pilote desarrolle su capacidad permisible por medio de la resistencia de fricción. c) una combinación de ambos.

Los pilotes pueden ser prefabricados y por lo tanto se hincan en el suelo; o colados en el lugar, haciendo una perforación en la cual se coloca el armado y se rellena con concreto. Los pilotes prefabricados pueden ser de concreto reforzado o presforzado. Otros tipos de pilotes se fabrican de acero o de madera tratada. En todos los tipos, los pilotes deben contar con cabezas de concreto reforzado en las dos direcciones, diseñadas apropiadamente.

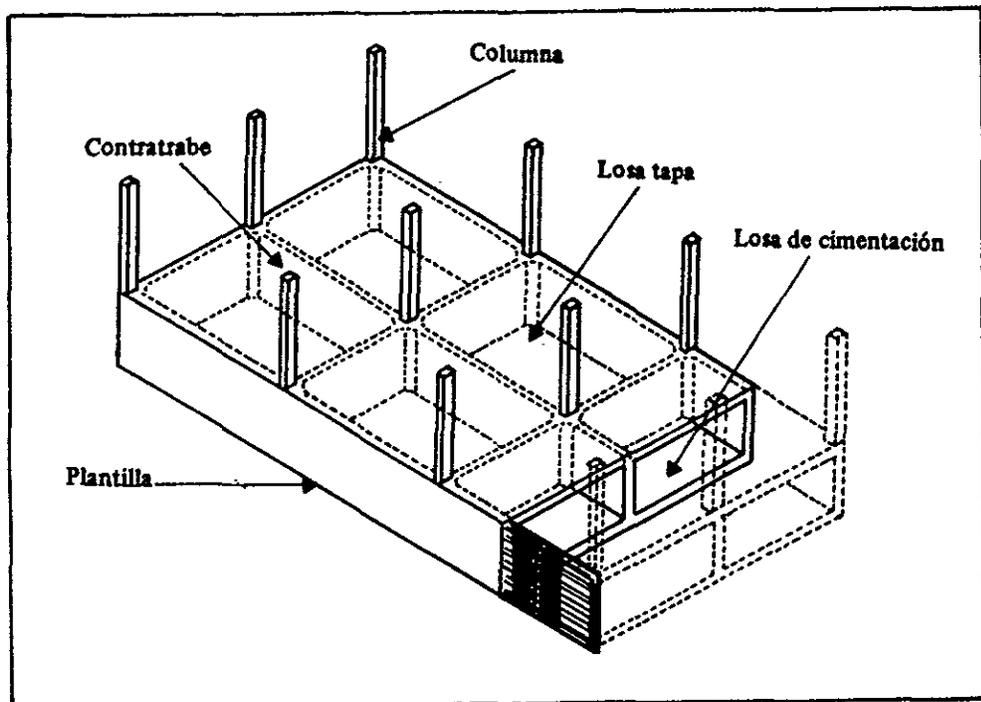
5. *Cimentaciones flotantes o losas de cimentación.* Estos sistemas de cimentación son necesarios cuando la capacidad de resistencia permisible del suelo es muy baja hasta profundidades grandes, lo cual hace que las cimentaciones con pilotes no sean económicas. En este caso, es necesario hacer una excavación lo suficientemente profunda, para que la cantidad de suelo que se remueve sea casi equivalente a la carga de la superestructura. Puesto que es necesario extender la subestructura de la cimentación a toda el área del edificio, se considera que la superestructura flota teóricamente en una balsa. Estas estructuras, que básicamente son sistemas de piso invertidos, se requieren en suelos que se están consolidando en forma continua.

A continuación se ilustraran algunos tipos de elementos estructurales y su interrelación para formar sistemas estructurales comunes:



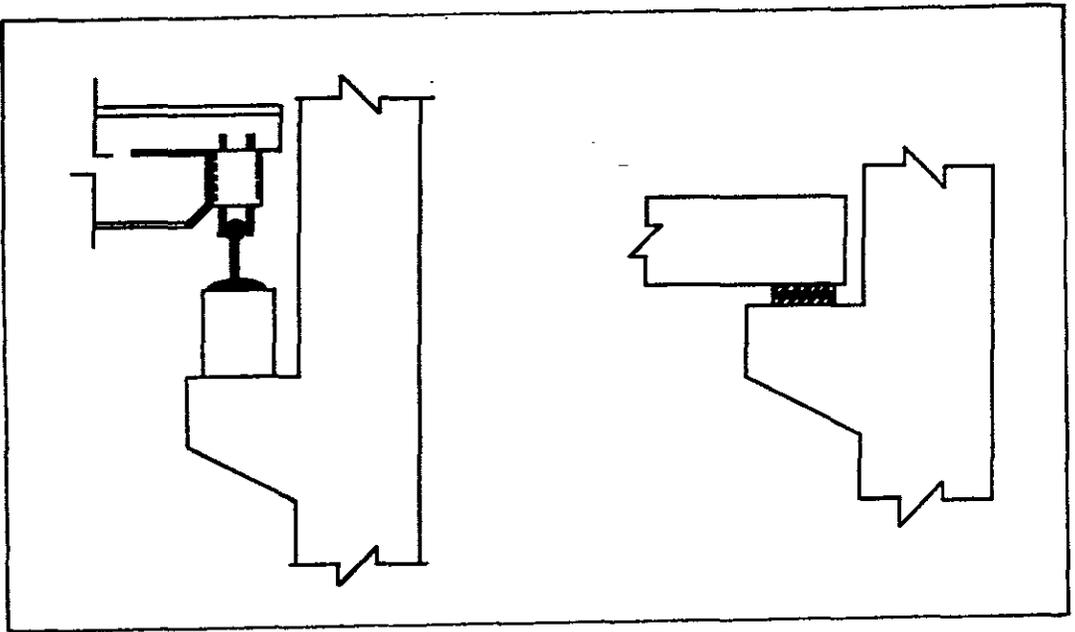
ZAPATAS CORRIDAS EN DOS DIRECCIONES

FIG. 1.1



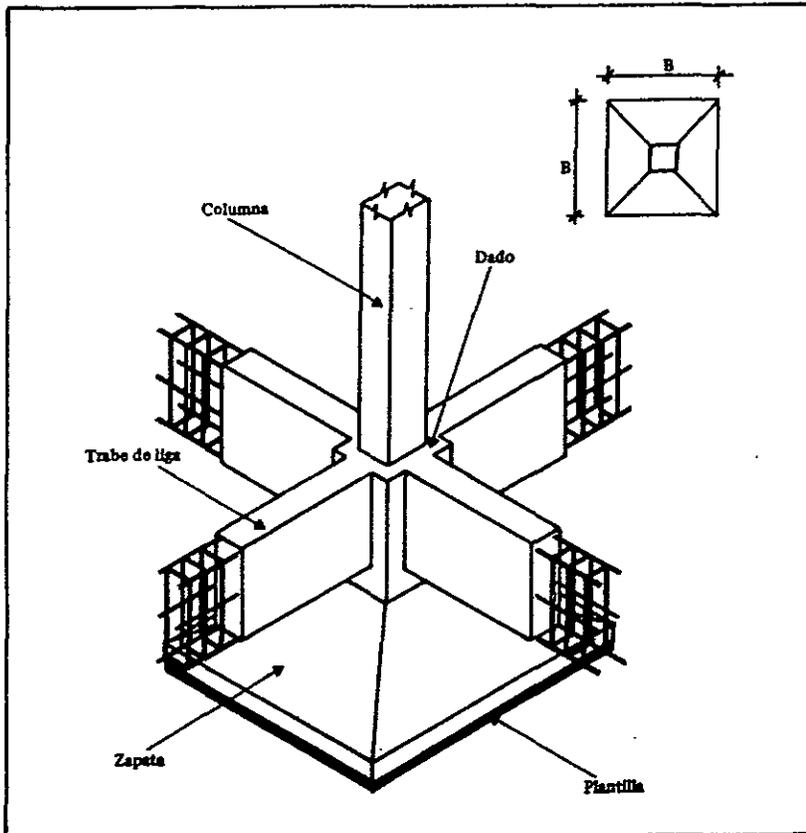
CAJÓN DE CIMENTACIÓN

FIG. 1.2



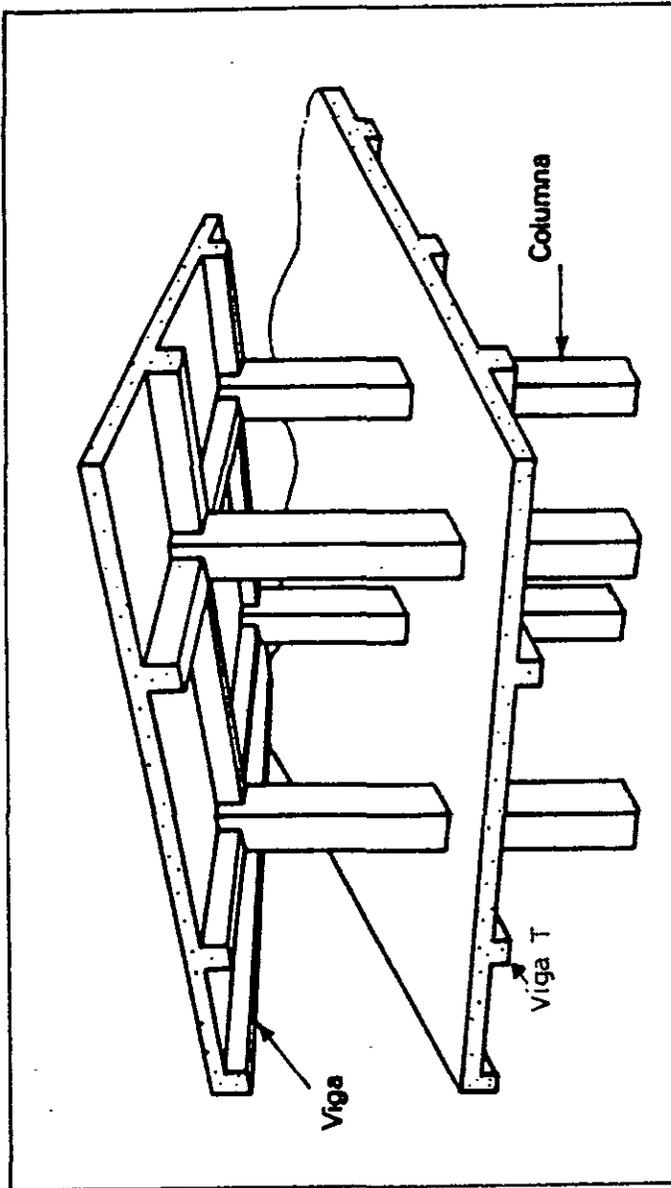
APLICACIONES DE MÉNSULAS

FIG. 1.3



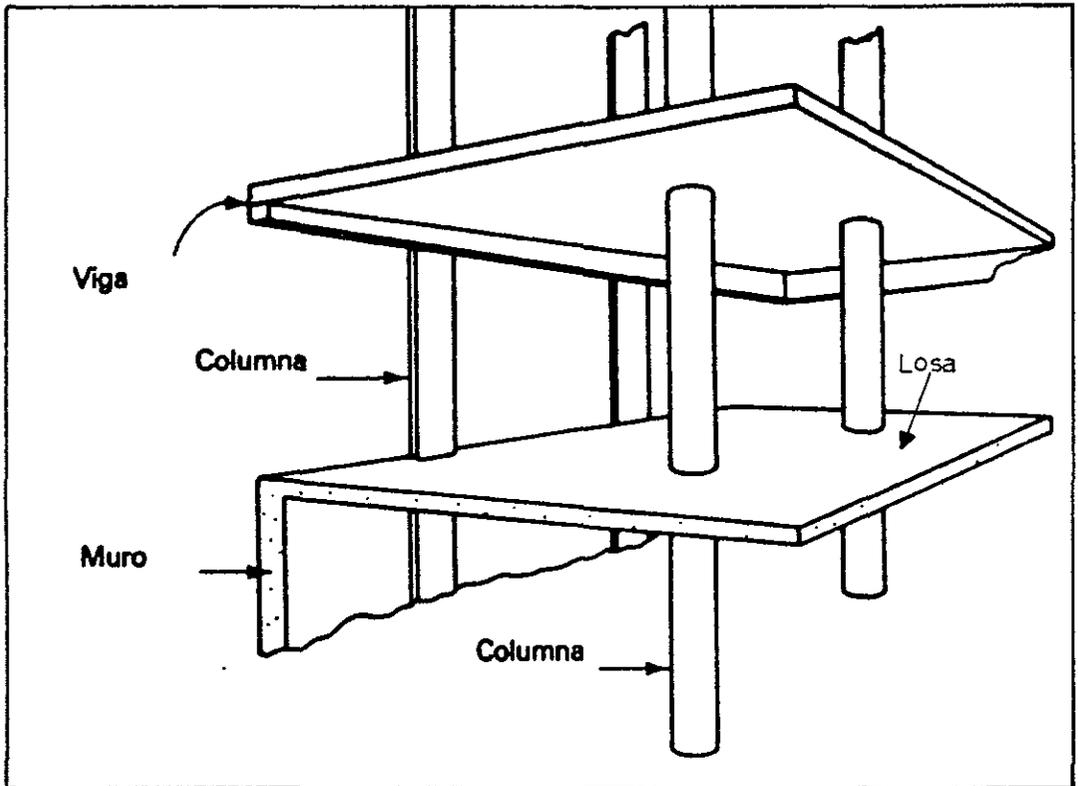
ZAPATA LIGADA

FIG. 1.4



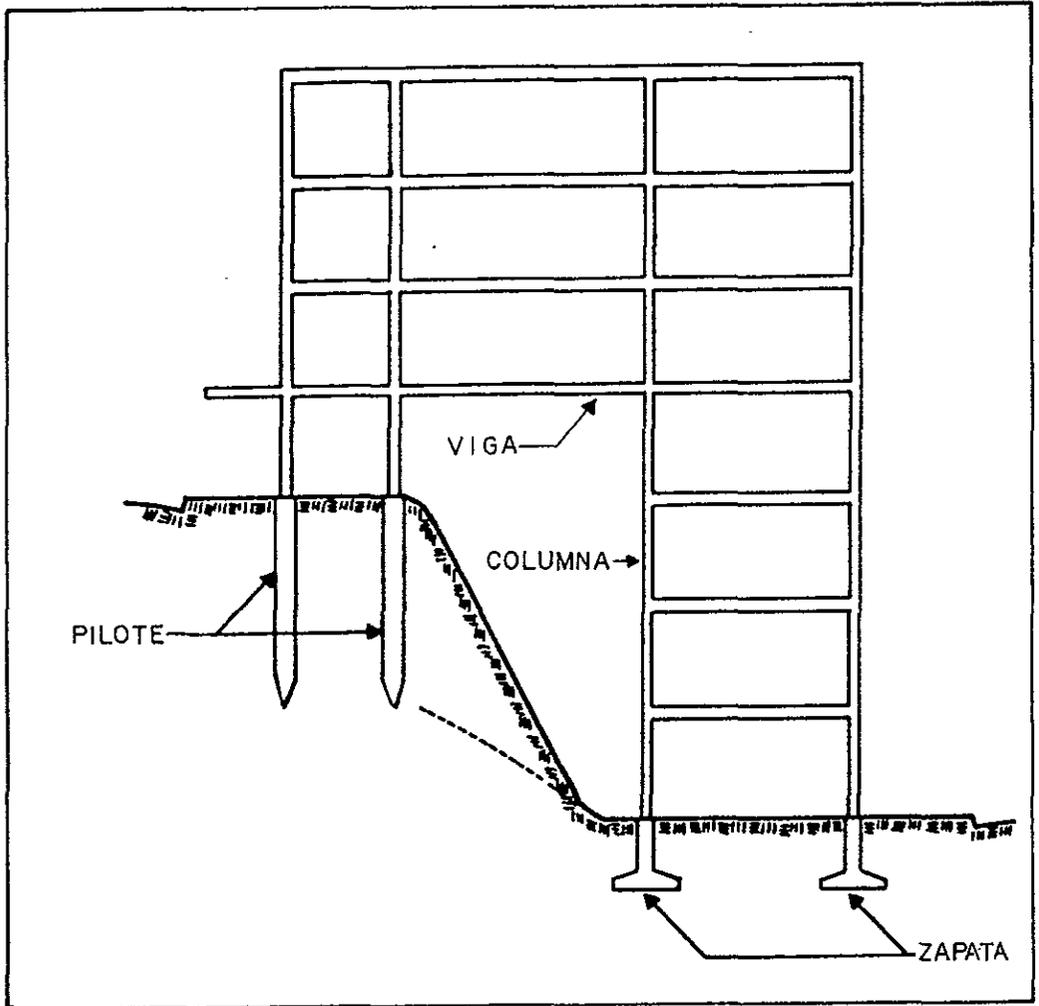
EMPLEO DE VIGAS "T" COMO
SISTEMA DE ENTREPISO

FIG. 1.5



ESTRUCTURACIÓN DE UN
EDIFICIO DE POCA ALTURA

FIG. 1.6



ESTRUCTURACIÓN DE UN EDIFICIO
DE CONCRETO REFORZADO EN DESNIVEL

FIG. 1.7

1.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO

La palabra concreto viene del latín "concretus" que significa compuesto. En efecto, el concreto consiste en una mezcla de agregados pétreos bien graduados unidos con una pasta de cemento y agua.

Los agregados generalmente se clasifican en dos tipos: finos y gruesos. Los agregados finos son las arenas que pueden ser naturales o productos de trituración cuyas partículas tienen menos de 1/4 de pulgada de tamaño; los agregados gruesos son los que tienen un tamaño mayor al anterior. La pasta se compone de cemento, agua y a veces de aire incluido. Generalmente esta pasta constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto.

El cemento es una mezcla de materiales, principalmente silicatos y aluminatos de calcio. Cuando fragua se endurece por hidratación de los distintos compuestos que lo constituyen. Durante este proceso, ocurren entre otros, los siguientes fenómenos:

- Conformación de la red de silicatos, que determina la resistencia mecánica del concreto.
- Segregación de hidróxido de calcio, el cual junto con los álcalis provenientes de las materias primas del concreto llevan el pH de la fase acuosa a valores entre 12.6 y 14.0.
- Evaporación del agua agregada en exceso durante el amasado para hacer trabajables las mezclas, lo cual genera una red de poros y canales que llegan hasta la superficie del concreto.

Estos procesos determinan en gran medida el desempeño final del material, por lo cual la formulación, ejecución y curado del concreto deben ser cuidadosos.

La resistencia mecánica del concreto se debe a las reacciones de hidratación del cemento ya que los componentes de éste, se cristalizan progresivamente para formar un gel o pasta la cual rodea los agregados uniéndolos para producir un conglomerado. Tanto la resistencia mecánica como la permeabilidad del concreto, están regidas por la relación agua/cemento (a/c), así cuanto más baja sea esta relación, más alta es la resistencia y es menos permeable. En una primera aproximación, puede decirse que la resistencia del concreto es directamente proporcional al contenido del cemento e inversamente proporcional a la porosidad. Cualquier reducción en la relación agua/cemento mediante el uso de mezclas y granulometrias adecuadas, o agentes fluidificantes, va a repercutir directamente en una elevación de la resistencia mecánica y de la impermeabilidad. Las nuevas tecnologías sobre el concreto de alta resistencia se basan en reducir la porosidad al máximo mediante el empleo de aditivos.

Cuando se utiliza cemento con altas cantidades de alúmina para resistir el ataque de sulfatos, se obtiene una pérdida de un 20 a un 50% de la resistencia mecánica. Esto se debe, a que las reacciones de la alúmina con el agua producen un aumento en la porosidad del concreto causando una reducción en su resistencia

El concreto posee características que hacen que sea el material más usado en la industria de la construcción, tales como: resistencia mecánica, poca variación volumétrica, baja conductividad térmica y resistencia a la penetración del agua, a los ataques químicos y al desgaste; requiere poco mantenimiento cuando se fabrica apropiadamente, etc. Sin embargo, el desconocimiento o la comprensión inadecuada de sus características propician accidentes que causan su degradación prematura.

Aunque por lo general se considera que los agregados son materiales inertes, ciertos tipos no lo son y pueden reaccionar con el cemento portland,

causando expansiones y con ello agrietamientos y desprendimientos. Otra reacción de importancia es la reacción álcali-silice, ya que algunos agregados que contienen silice, son susceptibles de ser atacados por los álcalis que se encuentran en la pasta los cuales, absorben una cantidad considerable de agua provocando, un aumento de volumen y con ello, los consecuentes agrietamientos en los elementos de concreto.

El clima influye en las características del concreto al momento de prepararlo; de este modo, cuando se fabrica éste en clima muy cálido y no se toman las precauciones necesarias, el concreto ya endurecido puede tener los siguientes problemas:

- Menor resistencia a los 28 días, debido a un mayor consumo de agua y/o a niveles más altos de temperatura en el concreto al momento de la colocación o durante los primeros días.
- Mayor propensión a la contracción por secado y al agrietamiento por diferencias de temperatura debidas al enfriamiento de toda la estructura o a diferenciales de temperatura dentro de la sección transversal del miembro.
- Menor durabilidad derivada del agrietamiento.
- Mayor variabilidad del acabado superficial por la presencia de juntas frías o diferencias de color, derivadas de diferentes velocidades de hidratación para distintas relaciones agua/cemento.
- Mayor peligro de corrosión del acero de refuerzo, debido principalmente a un mayor agrietamiento que facilita el ingreso de soluciones corrosivas.
- Mayor permeabilidad .

2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LA CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno que la ciencia empezó a investigar a partir de los trabajos de Ulick R. Evans y sus colaboradores que, en su laboratorio de la Universidad de Cambridge, identificaron en 1923 el mecanismo electroquímico de la corrosión acuosa de los metales.

La investigación en el campo de la corrosión de armados, ha estado siempre con varios años de retraso respecto a los avances conseguidos en otros campos de la corrosión del acero, principalmente por la dificultad que supone el manejo de un electrolito (fase acuosa) que está encerrado en los poros de una estructura pétreo que dificulta el seguimiento visual de los procesos. Electrolito que evoluciona constantemente en el tiempo, debido a la progresiva hidratación del cemento y, por lo tanto, no presenta una composición definida y fácilmente reproducible en todos sus componentes.

No fue hasta 1959 cuando tres investigadores alemanes: Kaesche, Bäümel y Engell, publicaron simultáneamente ensayos en los que aplicaban, por primera vez, técnicas electroquímicas a la medida e identificación del fenómeno de corrosión metálica en contacto con concreto.

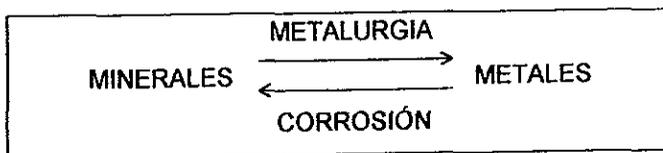
Este hecho fue el punto de partida de un lento pero progresivo avance, que se ha acelerado vertiginosamente en el último quinquenio, pero incluso después de un trabajo intensivo de casi un siglo de duración, no se puede considerar resuelto el problema de la corrosión. Es por eso que en casi todos los países industrializados (Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, España, etc.), actualmente se desarrollen proyectos y programas de investigación al respecto, con el fin de aminorar los problemas causados por la corrosión y reducir los enormes gastos asociados con ésta.

2.2 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN

Una de las manifestaciones más comunes de la corrosión es la herrumbre, la cual es ostensible en las grandes construcciones de concreto reforzado (ver fig. 2.1 y 2.2). Con el tiempo, un metal corroído se desintegra como cualquier otro material en cuya obtención se haya aplicado una gran cantidad de energía. Por esta razón, la *corrosión* puede definirse como un proceso espontáneo de deterioro y destrucción de un material (generalmente un metal); o de sus propiedades debido a su reacción con el medio ambiente.

La mayoría de los metales no se encuentran en estado puro en la naturaleza, sino que están combinados con otros elementos formando diferentes compuestos llamados menas. Para obtenerlos en estado puro, es necesario separarlos de estas menas, lo que requiere invertir una gran cantidad de energía. La cantidad de energía requerida para la extracción de un metal varía de un elemento a otro.

Sin embargo, al separarse, todos los metales almacenan energía, originando de este modo una tendencia a regresar a su estado original (fig. 2.3), es decir, oxidándose.



Esquema ilustrativo mineral/metal

Fig. 2.3

La corrosión ocasiona que el metal regrese a su estado más estable, óxidos y sales. En otras palabras, es la causa de que los metales regresen a su estado original. De esta manera, mientras más energía se necesite para obtener un metal,



MANCHA DE OXIDO SOBRE UNA SUPERFICIE
DE CONCRETO REFORZADO

FIG. 2.1



MANCHAS DE ÓXIDO BAJO LA LOSA
DE UN PUENTE EN UNA ZONA COSTERA

FIG. 2.2

más fuerte será su tendencia a regresar a un estado más estable y tenderá a corroerse con mayor rapidez.

Si conocemos la cantidad de energía requerida para extraer los metales de sus menas y su consecuente tendencia para liberar dicha energía en forma de corrosión, podemos elaborar una lista que muestre la posición de dichos metales y, por lo tanto, su tendencia a corroerse (tabla 2.1).

TABLA 2.1
POSICIÓN DE ALGUNOS METALES DE ACUERDO A LA ENERGÍA
REQUERIDA PARA EXTRAERLOS DE SUS MENAS.

<p>Mayor energía requerida (mayor tendencia a corroerse)</p>	<p>Potasio Magnesio Berilio Aluminio Zinc Cromo Fierro Níquel Estaño</p>
<p>Menor energía requerida (menor tendencia a corroerse)</p>	<p>Cobre Plata Platino Oro</p>

En términos más ingenieriles, bajo el nombre de corrosión química del concreto (del latín *corrodero* = corroer, destruir), se conocen los daños y desperfectos causados en el acero del concreto reforzado, por la reacción química o electroquímica del material con el medio ambiente. De acuerdo a la naturaleza del

medio corrosivo, la corrosión comprende la corrosión química y la corrosión electroquímica.

2.3 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN

Los problemas relacionados con la durabilidad del concreto ocasionan pérdidas económicas, ya sea por la reparación de las áreas afectadas o por la sustitución de elementos que han fallado. Entre los factores que afectan la durabilidad de éste, se encuentra la corrosión del acero de refuerzo que produce agrietamientos, caída de recubrimientos y la consiguiente falla estructural ocasionada por la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto (ver fig. 2.4). Es por esto, que en la actualidad la corrosión del acero de los armados ha sido uno de los problemas que más ha preocupado a los ingenieros por la dificultad en garantizar la durabilidad económica de las estructuras al momento de planificar obras empleando concreto armado, especialmente en ambientes que, como sucede en las zonas marinas y costeras, favorecen la corrosión rápida y generalizada del acero de refuerzo.

El empleo del concreto reforzado como material de construcción aumenta cada día y, puesto que desde el momento de su colocación en la obra le acechan peligros de corrosión y de destrucción, es lógico que el creciente uso de éste haya traído como consecuencia un incremento de casos en que es atacado y destruido. A ello se debe el gran interés despertado por los estudios sobre la corrosión del concreto.

Este incremento en el uso del concreto reforzado ha traído como consecuencia, que a dicho material se le exija cada día más, como la tendencia a reducir las dimensiones de los elementos fabricados, lo cual también ha supuesto la aparición de nuevos riesgos que favorecen la aparición de la corrosión.



DAÑOS ORIGINADOS POR LA CORROSIÓN SOBRE EL
RECUBRIMIENTO DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL
DE CONCRETO REFORZADO

FIG. 2.4

La magnitud de la corrosión del concreto reforzado depende esencialmente del medio exterior, es decir, de las sustancias agresivas y de las condiciones climatológicas. Otro factor del desarrollo de la corrosión es el propio concreto, su composición mineral, forma de fabricación, estructura, edad, etc. Deben también citarse los factores físicos externos; temperatura y presión, que acrecentan o aminoran la acción agresiva. Es necesario medir previamente la importancia de los efectos de la corrosión, ya que ciertas estructuras pueden perder hasta un 50% de su espesor original antes de que exista peligro de pérdida de resistencia, y en cambio, una perforación generada en un ducto de gas, significa un grave problema.

La magnitud de los costos de reparación es una razón más que suficiente para justificar el estudio de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Hace algunos años se hicieron estudios del costo económico que produce la corrosión en algunos países y se encontró que la corrosión consume entre el 2% y el 5% del producto interno bruto (P.I.B.) de cada país (1). Entre un 15% y un 25% de este costo se pudo haber evitado si se hubiese aplicado la tecnología existente para controlarla.

En 1979, los daños causados por la corrosión en puentes y carreteras ascendió a unos 100 millones de dólares y se estimó que la reparación o reemplazo de todas las obras afectados por la corrosión en Estados Unidos, ascendería a unos 100 billones de dólares. Estudios más recientes¹ en este país muestran que anualmente se gastan 48 mil millones de dólares a causa de este problema. Esto incluye las pérdidas directas e indirectas y las relacionadas con el empleo de medios y procedimientos para controlarla.

¹ Datos proporcionados por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos

En México aun no se dispone de cifras que nos den una idea clara del problema, sin embargo, en las últimas investigaciones se ha informado que más del 90% de las industrias presentan algún daño por corrosión (2).

No se debe olvidar que México posee miles de kilómetros de costas y que en ellas hay numerosas obras susceptibles de sufrir daños por corrosión. Es común observar en las costas de Yucatán daños graves por la corrosión del refuerzo en escuelas, iglesias y casas habitación.

Por las razones anteriores, el estudio de la corrosión, así como el desarrollo de métodos de diagnóstico, protección, reparación y sobre todo prevención deben ser de vital importancia, ya que se podrían ahorrar grandes cantidades de dinero en reparaciones y evitar pérdidas económicas. Ya que controlarla evita el deterioro de materiales, prolonga la vida útil, reduce los riesgos de accidentes, anula la paralización por tareas de reparación, disminuye el consumo de energía y los bajos rendimientos de producción.

La velocidad real de la corrosión del concreto reforzado en las obras no ha podido determinarse aun, ya que la intensidad de los procesos de corrosión en la naturaleza depende de múltiples factores, aún no bien conocidos y por lo tanto, no bien apreciados.

3.1 CEMENTOS PORTLAND

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca. Cuando la pasta se mezcla con los agregados (arena y grava, piedra triturada u otro material granular), actúa como adhesivo y une a todas las partículas del agregado para formar así al concreto.

El cemento portland se produce al pulverizar el clínker, que consiste principalmente en silicatos hidráulicos de calcio junto con algunos aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio, además contiene normalmente una o más formas de sulfato de calcio (yeso) como adición en la molienda. Los materiales usados para fabricar cemento portland deben contener proporciones adecuadas de óxido de calcio, sílice, alúmina y componentes de óxido de hierro.

Las materias primas son generalmente una mezcla de material calcáreo (óxido de calcio), como la caliza, marga, creta o coquilla, y un material arcilloso (sílice y alúmina) como la pizarra, esquisto o escoria de alto horno.

3.1.1 TIPOS DE CEMENTO PORTLAND

La "American Society for Testing and Materials" (ASTM), estipula ocho tipos de cemento portland, los cuales se ilustran en la tabla 3.1

TABLA 3.1
TIPOS DE CEMENTO

Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal, inclusiv de aire
Tipo II	De resistencia moderada a los sulfatos
Tipo IIA	De resistencia moderada a los sulfatos, inclusiv de aire
Tipo III	De alta resistencia a edad temprana
Tipo IIIA	De alta resistencia a edad temprana, inclusiv de aire
Tipo IV	De bajo calor de hidratación
Tipo V	De resistencia elevada a los sulfatos

TIPO I

El cemento portland de tipo I es un cemento de uso general, el cual es adecuado cuando las propiedades especiales de los demás tipos de cemento no sean necesarias. Se utiliza en concretos que no estén sujetos al ataque de factores agresivos tales como el ataque de sulfatos o el agua.

TIPO II

Se emplea cuando sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de sulfatos, como ocurre en las estructuras de drenaje, pero sin llegar a ser demasiado severas. El cemento tipo II generará normalmente menos calor a menor velocidad que el cemento tipo I.

TIPO III

El cemento portland tipo III proporciona resistencias elevadas a edades tempranas. Química y físicamente es similar al cemento tipo I, excepto que sus partículas han sido molidas más finamente.

TIPO IV

El cemento portland tipo IV se emplea cuando se tenga que mantener en un valor mínimo la cantidad y velocidad de generación de calor provocada por la hidratación. Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos de cemento.

TIPO V

Se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfatos, especialmente donde los suelos o las aguas freáticas contengan fuertes contenidos de éstas sustancias.

La elevada resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico (C_3A).

CEMENTO PORTLAND BLANCO

El cemento blanco es un verdadero cemento portland que difiere del cemento gris exclusivamente en cuanto a su color. Éste es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxidos de hierro y de manganeso.

3.1.2 COMPUESTOS QUÍMICOS EN EL CEMENTO PORTLAND

Durante la calcinación en la fabricación del clínker de cemento portland el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90% del peso del cemento.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	= C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	= C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	= C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	= C_4AF

El conocimiento actual de la química del cemento nos indica que estos compuestos tienen las siguientes propiedades:

- El silicato tricálcico (C_3S) .- Se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana.
- El silicato dicálcico (C_2S) .- Se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.
- El aluminato tricálcico (C_3A) .- Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye levemente al desarrollo de la resistencia temprana. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda fina, retrasa la velocidad de hidratación del C_3A . Sin el yeso, un cemento que contuviera C_3A fraguaría rápidamente. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos.
- El alúminoferrito tetracálcico (C_4AF) .- Reduce la temperatura de formación del clínker, ayudando por tanto a la manufactura del cemento. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a elevar la resistencia.

En presencia del agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta de cemento endurecido en el concreto. Los silicatos de calcio, C_3S y C_2S , que constituyen cerca del 75% del peso del cemento, se hidrata para formar los compuestos de hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio (gel de tobermorita). La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al gel de tobermorita.

El cemento hidratado contiene aproximadamente un 25% de hidróxido de calcio y un 50% de gel de tobermorita en peso. A partir del análisis químico del cemento es posible calcular el porcentaje aproximado de cada compuesto.

3.1.3 PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND

FINURA

La finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia.

La finura se mide por medio del ensaye del turbidímetro de Wagner, el ensaye Blaine de permeabilidad al aire o con la malla con No. 325(45 micras).

SANIDAD

Ésta se refiere a la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. La expansión destructiva retardada o falta de sanidad es provocada por un exceso en las cantidades de cal libre o de magnesia.

CONSISTENCIA

Se trata de la movilidad relativa de una pasta de cemento o mortero recién mezclado o bien a su capacidad de fluir. Durante el ensaye de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal misma que se define por una penetración de 10 ± 1 mm de la aguja de Vicat. La fluidez se determina en una mesa que mide esta característica.

TIEMPO DE FRAGUADO

Para determinar si un cemento fragua de acuerdo con los tiempos especificados, se efectúan pruebas usando el aparato de Vicat o la aguja de Gilmore. Dicho tiempo de fraguado inicial depende del tipo de cemento, de la humedad, de la temperatura, etc., pudiendo ser tan bajo como 30 minutos o tan amplio como dos horas. El fraguado inicial de la pasta de cemento no debe ocurrir demasiado pronto, así como el fraguado final tampoco debe ocurrir demasiado tarde.

FRAGUADO FALSO

Éste se comprueba por una considerable pérdida de plasticidad sin que se desarrolle calor en gran abundancia poco tiempo después del mezclado.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Es la obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 5cm. Estos cubos se hacen y se curan de manera prescrita y utilizando una arena estándar. La resistencia a la compresión está influida por el tipo de cemento.

En general, las resistencias de los cementos no se pueden usar para predecir las resistencias de los concretos con exactitud.

CALOR DE HIDRATACIÓN

Es el calor que se genera cuando reaccionan el agua y el cemento. La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento,

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

siendo el C_3A y el C_3S los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor.

Las cantidades aproximadas de calor generado durante los primeros siete días, tomando como 100% la del cemento portland normal Tipo I, son las siguientes:

Tipo II	moderado	80% a 85%
Tipo III	alta resistencia a edad temprana	hasta 150%
Tipo IV	bajo calor de hidratación	40% a 60%
Tipo V	resistente a sulfatos	60% a 75%

PÉRDIDA POR IGNICIÓN

La pérdida por ignición del cemento portland se determina calentando una muestra de cemento de peso conocido a 900 ó 1000 ° C, hasta obtener un peso constante. Se determina entonces la pérdida en peso de la muestra. Una pérdida por ignición elevada indica prehidratación y carbonatación que pueden ser causadas por un almacenamiento prolongado e inadecuado o por adulteraciones.

EMBARQUE DEL CEMENTO

Un cemento portland demasiado suelto puede pesar únicamente 833 kg/m³, mientras que si se compacta por vibraciones, el mismo cemento puede llegar a pesar 1600 kg/m³. Por este motivo, la práctica correcta consiste en pesar el cemento a granel para cada revoltura de concreto que se vaya a producir.

3.2 AGREGADOS PARA EL CONCRETO (GRAVA Y ARENA)

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto y de 70% a 85% en peso.

Algunos depósitos naturales de agregado, llamados gravas de mina, consisten en grava y arena que pueden ser utilizadas en el concreto luego de un tratamiento mínimo. La grava y la arena naturales, usualmente se excavan o se dragan de alguna mina, río, lago o lecho marino. El agregado triturado se produce triturando roca de cantera, piedra bola, guijarros o grava de gran tamaño. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se utiliza como agregado grueso o fino. Normalmente los agregados se lavan y se separan en la mina o planta.

Los agregados para concreto que se encuentran en estado natural, son una mezcla de rocas y minerales. Un mineral es una sustancia sólida natural que tiene una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de límites muy estrechos. Las rocas, se componen generalmente de varios minerales.

El concreto reciclado, o concreto de desperdicio triturado, es una fuente factible de agregados, sin embargo no se ha podido implementar algún proceso que garantice la calidad y seguridad del producto a costos económicos.

Los agregados deben cumplir ciertas especificaciones para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir de partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

Los agregados que contengan cantidades apreciables de esquisto o de otras rocas esquistosas, de materiales suaves y porosos, y ciertos tipos de horsteno deben evitarse en especial, debido a su baja resistencia al intemperismo y a que pueden ser causa de defectos en la superficie del concreto, tales como erupciones.

A menudo la inspección visual revelará debilidades en los agregados gruesos. Los registros de servicio son de gran utilidad para evaluar a los agregados.

Los agregados más comúnmente empleados, producen concreto fresco o recién mezclado cuyo peso oscila entre 2160 y 2560 kg/m³. Los agregados esponjados de pizarra, arcilla y escoria se utilizan para producir concreto estructural ligero con peso volumétrico entre 1440 y 1920 kg/m³. Otros materiales ligeros como piedra pómez, escoria, perlita, vermiculita y diatomitas, se usan para producir concreto ligero no estructural que pesa de 240 a 1440 kg/m³.

Para producir concreto muy denso y concreto de blindaje contra la radiación, se usan materiales pesados como la barita, limonita, magnetita, ilmenita, hematita, hierro y partículas de acero.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

GRANULOMETRÍA

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. En general, aquellos agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y tienen una curva granulométrica suave producirán los resultados más satisfactorios.

a) *GRANULOMETRÍA PARA AGREGADOS FINOS*

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices (ver fig. 3.1). Los siete tamices estándar para agregado fino tienen aberturas que varían desde la malla No. 100 (150 micras) hasta 9.52 mm (ver tabla 3.2). La granulometría y los límites de ésta, se expresan usualmente como el porcentaje de material que pasa cada malla.

TABLA 3.2
LÍMITES DE LA NORMA ASTM C 33 (NOM-C-111-88) CON
RESPECTO AL TAMAÑO DE LAS CRIBAS

TAMAÑO DE LA MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA EN PESO
9.52 (3/8")	100
4.75 (No. 4)	95 a 100
2.36 (No. 8)	80 a 100
1.18 (No. 16)	50 a 85
0.60 (No. 30)	25 a 60
0.30 (No. 50)	10 a 30
0.15 (No. 100)	2 a 10

Estas especificaciones permiten que los porcentajes mínimos (en peso) del material que pasa las mallas de 0.30 mm y de 0.15 mm sean reducidos a 5% y 0% respectivamente, siempre y cuando:



MUESTRA DE ARENA TAMIZADA QUE INDICA LAS
PROPORCIONES DE LOS DIFERENTES DIÁMETROS

FIG. 3.1

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

1. El agregado se emplee en un concreto con aire incluido que contenga más de 237 kg de cemento por m^3 y tenga un contenido de aire superior al 3%.
2. El agregado se emplee en un concreto que contenga más de 296 kg de cemento por m^3 cuando el concreto no tenga inclusión de aire.
3. Se use un aditivo mineral aprobado para compensar la deficiencia del material que pase estas dos mallas.

Otras recomendaciones de la norma ASTM son:

1. Que el agregado fino no tenga más del 45% retenido entre dos mallas consecutivas.
2. Que el módulo de finura no sea inferior a 2.3 ni superior a 3.1 ni que varíe en más de 0.2 del valor típico de la fuente de abastecimiento del agregado. En caso de que se sobrepase este valor, este deberá rechazarse a menos que se hagan los ajustes adecuados en las proporciones del agregado.

Las cantidades de agregado fino que pasan las mallas de 0.3 mm y de 0.15 mm, afectan la trabajabilidad, la textura superficial y el sangrado del concreto.

b) GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS GRUESOS

Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para tamaños mayores. Para una relación de agua/cemento dada, la cantidad necesaria de cemento disminuye a medida que aumenta el tamaño máximo de agregado grueso.

El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual todo el agregado debe pasar. El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado.

Por lo común, el tamaño máximo de las partículas de agregado no debe sobrepasar:

1. Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
2. Tres cuartos del espaciamiento libre entre barras de refuerzo.
3. Un tercio del peralte de la losa.

Estos requisitos se pueden rebasar si, la mezcla tiene la trabajabilidad suficiente para colocar el concreto sin que se formen alveolados ni vacíos, previa autorización del Director Responsable de Obras.

AGREGADOS CON GRANULOMETRÍA DISCONTINUA

Las mezclas con estos agregados se utilizan para obtener texturas uniformes en concretos con agregados expuestos. También se emplean en concretos estructurales normales, debido a las posibles mejoras en densidad, permeabilidad, contracción, resistencia y consolidación; además de permitir el uso de granulometrías y agregados locales.

Se debe tener precaución, al elegir el porcentaje de agregado fino en una mezcla con granulometría discontinua. Una elección incorrecta, puede resultar en un concreto susceptible de producir segregación o alveolado debido a un exceso de agregado grueso o en un concreto con baja densidad y alta demanda de agua provocada por un exceso de agregado fino.

MODULO DE FINURA

El módulo de finura (MF) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Mientras mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura.

FORMA DE PARTÍCULA Y TEXTURA SUPERFICIAL

La forma de partícula y la textura superficial de un agregado influye más en las propiedades del concreto fresco, que en las de concreto endurecido. Para producir un concreto trabajable, las partículas elongadas, angulares, de textura rugosa necesitan más agua que los agregados compactos, redondos y lisos; sin embargo, la adherencia entre la pasta de cemento y un agregado generalmente aumenta a medida que las partículas cambian de lisas y redondeadas a rugosas y angulares. El agregado debe estar relativamente libre de partículas planas y elongadas.

Los agregados pobremente graduados o angulares pueden ser también más difíciles de bombear.

PESO VOLUMÉTRICO Y VACIOS

El peso volumétrico de un agregado, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal varía de 1200 a 1760 kg/m³.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

El contenido de vacíos entre partículas afecta la demanda de mortero en el diseño de la mezcla. Los contenidos de vacíos varían desde aproximadamente 30% a 45% para los agregados gruesos hasta 40% a 50% para el agregado fino. La angularidad aumenta el contenido de vacíos.

PESO ESPECÍFICO

El peso específico de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9. El peso específico de un agregado se debe determinar secado al horno totalmente.

ABSORCIÓN Y HUMEDAD SUPERFICIAL

Las condiciones de humedad de los agregados se designan como:

1. Secado al horno.
2. Secado al aire, secos en la superficie de la partícula pero conteniendo cierta humedad interior, siendo por lo tanto algo absorbentes.
3. Saturados y superficialmente secos (SSS) no absorben ni ceden agua a la mezcla de concreto.
4. Húmedos, contienen un exceso de humedad en la superficie (agua libre).

La cantidad de agua utilizada en la mezcla de concreto, se debe ajustar a las condiciones de humedad de los agregados de manera que cubra los requerimientos de agua.

El agregado grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción dentro de los rangos de 0.2% a 4.0% y 0.2% a 2.0% respectivamente. Los contenidos de agua

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

libre, normalmente varían desde 0.5% hasta 2.0% para el agregado grueso y desde 2.0% hasta 6.0% para el agregado fino.

Puesto que en algunas ocasiones los agregados finos se entregan en condición húmeda, pueden ocurrir grandes variaciones en las cantidades para las mezclas si se hace la dosificación de acuerdo con el volumen.

RESISTENCIA A CONGELACIÓN Y DESHIELO

La resistencia de un agregado a la congelación y deshielo, está relacionada con su porosidad, absorción, permeabilidad y estructura de poro. Una partícula de agregado puede absorber tanta agua que no pueda acomodar la expansión y la presión hidráulica que ocurre durante el congelamiento del agua. Como resultado se tiene la expansión misma del agregado y la posible desintegración del concreto.

PROPIEDADES DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO

El intemperismo originado por el humedecimiento y secado también pueden afectar a la durabilidad de los agregados. Los coeficientes de expansión y de contracción de las rocas varían con la temperatura y el contenido de humedad. En algunos agregados se producen deformaciones severas si ocurren humedecimientos y secados alternos, y con ciertos tipos de roca esto puede provocar un incremento permanente en el volumen del concreto así como una eventual falla.

Mientras no se disponga de pruebas específicas para determinar esta tendencia, un petrógrafo experimentado puede proporcionar gran ayuda para determinar este potencial a la falla.

RESISTENCIA AL DESGASTE Y AL DERRAPAMIENTO

La resistencia al desgaste de un agregado a menudo se emplea como un índice general de su calidad. La prueba más común para determinar la resistencia al desgaste, es la prueba de los Ángeles; en esta prueba, se coloca una cantidad de agregado especificada dentro de un tambor de acero que contiene bolas de acero, se pone a rotar el tambor, y se mide el porcentaje de material desgastado. Las especificaciones fijan a menudo un límite superior para esta pérdida de peso.

La resistencia al desgaste de un concreto, se determina con mayor exactitud por medio de pruebas de abrasión en el mismo concreto.

Para suministrar una buena resistencia al derrapamiento en los pavimentos, el contenido de partículas silíceas del agregado fino deberá ser de al menos el 25%.

RESISTENCIA Y CONTRACCIÓN

La resistencia del agregado, adquiere gran importancia en los concretos de resistencias elevadas. Las resistencias a la tensión de los agregados varían desde 20 kg/cm² hasta 160 kg/cm² y las resistencias a compresión varían desde 700 kg/cm² hasta 2,810 kg/cm².

Los agregados con características de absorción elevada pueden tener características de contracción elevada al secarse. Los agregados de cuarzo y feldspatos junto con las calizas, las dolomitas y los granitos se consideran agregados de contracción baja; agregados como arenisca, esquisto, pizarra, hornblenda y grauvaca se asocian a menudo con contracciones elevadas por secado en el concreto.

RESISTENCIA A LOS ÁCIDOS

La mayoría de las soluciones ácidas desintegran rápida o lentamente al concreto de cemento portland dependiendo del tipo y de la concentración del ácido. A pesar de que éstos generalmente atacan a los compuestos de calcio de la pasta de cemento, no atacan fácilmente a ciertos agregados, tales como los agregados silicosos.

Los agregados calcáreos a menudo reaccionan fácilmente con los ácidos. Con estos agregados el ácido ataca uniformemente a toda la superficie expuesta de concreto, reduciendo la velocidad de ataque a la pasta y evitando la pérdida de partículas de agregado en la superficie.

Se debe evitar usar agregados sílicos cuando se encuentren presentes soluciones fuertes de hidróxido de sodio, pues atacan a este tipo de agregados.

RESISTENCIA AL FUEGO Y PROPIEDADES TÉRMICAS

La resistencia al fuego y las propiedades térmicas del concreto (conductividad, difusibilidad y coeficiente de expansión térmica), dependen hasta cierto grado de los constituyentes minerales de los agregados usados. Los agregados ligeros tienen una mayor resistencia al fuego que los agregados de peso normal debido a sus características aislantes y a su estabilidad a altas temperaturas.

Al quedar expuesto al fuego, un concreto que contenga agregado grueso calcáreo tendrá un mejor desempeño que un concreto que contenga agregado de cuarzo o silicio, como el granito o la cuarcita.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

A aproximadamente 570°C, el cuarzo se expande 0.85% provocando fuerzas destructivas. El coeficiente de expansión térmica de los agregados varía de 0.56×10^{-6} hasta 5×10^{-6} °C.

MATERIALES PERJUDICIALES

Dentro de las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados, se incluyen las impurezas orgánicas, limo, arcilla, esquistos, óxido de hierro, carbón mineral, lignito y algunas partículas suaves y ligeras. Además ciertas rocas y minerales tales como algunos horstenos, el cuarzo deformado y ciertas calizas dolomíticas son reactivas con los álcalis. El yeso y la anhidrita pueden provocar ataque de sulfatos. Algunos agregados como ciertos esquistos, producen erupciones al expandirse simplemente por haber absorbido agua.

Los agregados son potencialmente dañinos si contienen compuestos que reaccionen químicamente con el concreto de cemento portland y que produzcan:

- a) cambios significativos en el volumen de la pasta, del agregado o de ambos.
- b) interferencia en la hidratación normal del cemento.
- c) otros productos secundarios dañinos.

Las impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto, pueden reducir la resistencia, y en algunos casos pueden causar deterioros.

Aún las capas delgadas de limo o arcilla en las partículas de grava pueden ser perjudiciales porque pueden debilitar la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado. Si ciertos tipos de limo o arcilla están presentes en cantidades excesivas, la cantidad necesaria de agua se tiene que incrementar de manera importante. Los terrones de arcilla presentes en el concreto pueden absorber una cierta cantidad de

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

agua de mezclado, ser causa de erupciones en el concreto endurecido y afectar la durabilidad y la resistencia a la abrasión.

El carbón mineral o el lignito, u otros materiales de densidad baja como la madera o los materiales fibrosos, afectarán la durabilidad del concreto si están presentes en cantidades excesivas.

Los agregados pueden contener ocasionalmente partículas de óxido de hierro y sulfuro de hierro que produzcan manchas antiestéticas en las superficies de concreto expuesto.

REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO

Los agregados con ciertos constituyentes minerales (tales como algunas formas de sílice o carbonatos), reaccionan con los altos contenidos de álcalis (óxido de sodio y óxido de potasio) del cemento, en particular cuando el concreto está sujeto a un ambiente cálido y húmedo. Ciertos agregados también contienen álcalis potencial y nocivamente lixivante.

La reactividad expansiva álcali-carbonato solamente se sospecha cuando se emplean calizas dolomíticas de grano extremadamente fino que contengan grandes cantidades de calcita, arcilla, limo o rombos dolomíticos que se encuentren dentro de una matriz de arcilla y calcita fina. La reactividad de los álcalis se ve afectada por la cantidad, el tipo y el tamaño de partículas del material reactivo.

El ablandamiento con caliza (término popular para el reemplazo de aproximadamente el 30% de agregado de grava-arena reactivo por una caliza triturada), es efectivo para prevenir deterioros en algunos concretos. Menores cantidades de polvo de caliza también pueden proporcionar una protección adecuada.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

Por otro lado, los registros de servicio en campo generalmente dan la mejor información para la selección de los agregados.

El examen petrográfico realizado por una persona calificada puede ser de utilidad para identificar a los agregados potencialmente reactivos. El ensaye de barras de mortero se usa para determinar la potencial reactividad expansiva álcali-sílice de combinaciones de cemento y agregados. Los ensayos con barra de mortero se pueden usar ya sea para agregados finos o para gruesos. Generalmente deben transcurrir de tres a seis meses antes de poder obtener resultados.

La prueba química rápida, se emplea para identificar a los agregados silíceos potencialmente reactivos. Se puede completar al cabo de dos o tres días. Las conclusiones que se obtienen se basan en la magnitud de la reacción que ocurre entre una solución de hidróxido de sodio y un espécimen triturado del agregado en cuestión. Este ensaye no es del todo confiable.

Debido a la influencia de ciertos minerales tales como la caliza sobre los resultados de las pruebas, la prueba química rápida deberá ir acompañada de un análisis petrográfico del agregado.

La prueba de cilindro de roca se usa para determinar agregados de roca con carbonatos potencialmente expansivos (reactividad álcali-carbonato). Se miden los cambios de longitud en una muestra que ha estado sumergida en una solución de hidróxido de sodio. Las tendencias expansivas se pueden observar usualmente luego de 28 días de inmersión.

BENEFICIO DE AGREGADOS

Como beneficio de agregados se entiende el mejoramiento de la calidad de éstos por medio de otros métodos de procesamiento tales como:

En la separación en un medio pesado, se hace pasar a los agregados a través de un medio pesado compuesto por minerales pesados finamente molidos más agua en proporciones de modo que tenga un peso específico menor que el de las partículas de los agregados pero mucho mayor al de las partículas deletéreas. Las partículas de mayor peso se hunden y las partículas más ligeras flotan. Este proceso se puede usar cuando las partículas aceptables y las contaminantes tengan distintos pesos específicos.

En el cribado en agua se separan las partículas con pequeñas diferencias de peso específico pulsando una corriente de agua. Las pulsaciones de agua hacia arriba a través de una criba (una caja con el fondo perforado), mueven el material más ligero para formar una capa sobre el material de mayor peso. Posteriormente se retira la capa superior.

La clasificación por corriente ascendente separa a las partículas que tengan fuertes diferencias en sus pesos específicos. Materiales ligeros como la madera y el lignito, se van flotando en una rápida corriente ascendente de agua.

La trituración aparta a las partículas blandas y deleznable de los agregados gruesos. Este proceso es en ocasiones el único medio para que el material pueda ser usado. Desafortunadamente, en cualquier proceso siempre se pierde una parte del material sano y la remoción de las partículas deletéreas puede llegar a ser difícil y costosa.

MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE AGREGADOS

Los agregados deben ser manejados y almacenados de tal forma que la segregación y la degradación sean mínimas y que se evite la contaminación del agregado con sustancias deletéreas.

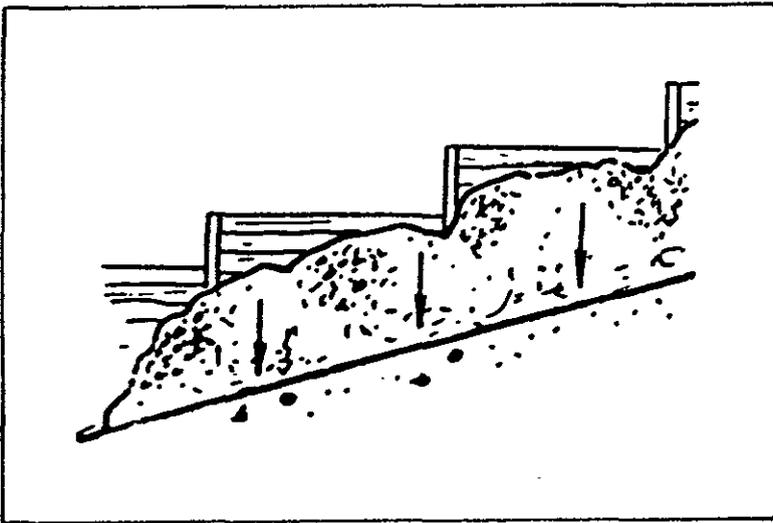
Al almacenar el material en capas delgadas la segregación se vuelve mínima. Los montones no se deberán formar en pilas altas en forma de cono porque esto produce segregación. Los agregados triturados se segregan menos que los agregados redondeados y los agregados de mayor tamaño se segregan más que los de tamaños menores.

Los agregados que han sido lavados se deben amontonar con suficiente anticipación y con la suficiente pendiente para que drenen hasta conservar un contenido de humedad uniforme (ver fig. 3.2). El material fino presenta una menor tendencia a segregarse en estado saturado que en estado seco.

Para evitar la contaminación de los montones de los diferentes agregados se deben usar mamparas o divisiones (ver fig. 3.3). Las paredes divisorias entre los compartimientos de los depósitos deben ser lo suficientemente altas para prevenir el entremezclado de los materiales.

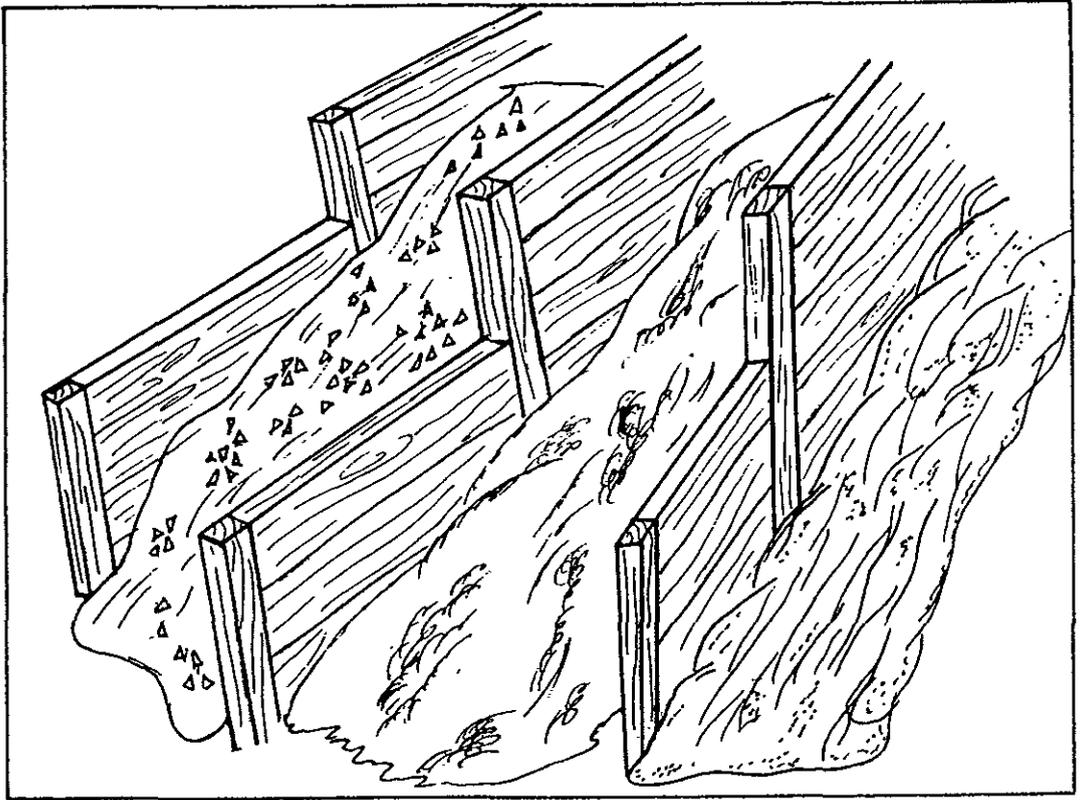
3.3 ADITIVOS PARA EL CONCRETO

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto además del cemento portland, del agua y de los agregados que se incorporan inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo.



APILAMIENTO DE LOS AGREGADOS
PARA EL CORRECTO DRENE DE LOS MISMOS

FIG. 3.2



CORRECTO ALMACENAMIENTO
DE LOS DIFERENTES AGREGADOS

FIG. 3.3

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

El concreto debe ser trabajable, capaz de dársele acabados, fuerte, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades frecuentemente se pueden obtener de una manera fácil y económica seleccionando los materiales adecuados; siempre y cuando se encuentren a la mano; sin que se tenga que recurrir a los aditivos (excepto los aditivos inclusores de aire cuando son necesarios).

Las principales razones del empleo de los aditivos son:

1. Para reducir el costo de la construcción del concreto.
2. Para obtener algunas propiedades en el concreto de manera más efectiva que por otros medios.
3. Para asegurar la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado en condiciones ambientales adversas.
4. Para superar ciertas eventualidades durante las operaciones de colado.

La efectividad del aditivo depende de factores tales como: el tipo, marca y cantidad de cemento; el contenido de agua, la forma, granulometría y proporciones de los agregados; el tiempo de mezclado; la manejabilidad y las temperaturas del concreto y del aire.

Se deben realizar mezclas de prueba con el aditivo y los materiales por utilizar a las temperaturas y humedades que se vayan a tener en la obra. De esta manera se pueden observar tanto la compatibilidad de aditivos y de estos con los materiales a emplear, así como los efectos de los aditivos sobre las propiedades del concreto fresco y endurecido.

3.3.1 FUNCIÓN DE ALGUNOS ADITIVOS

ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE

Éstos se utilizan para incluir intencionalmente burbujas microscópicas de aire; ya que éstas mejorarán drásticamente la durabilidad de los concretos que están expuestos a la humedad durante los ciclos de congelación y deshielo. El aire incluido mejora considerablemente la resistencia del concreto contra el descascamiento de la superficie causado por los productos químicos deshielantes. También se ve mejorada la trabajabilidad del concreto fresco. La segregación y el sangrado se reducen o se llegan a eliminar. Los aditivos inclusores de aire se agregan directamente a los componentes del concreto antes o durante el mezclado.

ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA

Se emplean para disminuir la cantidad de agua de mezclado, reducir la relación agua-cemento, o para aumentar el revenimiento. Los reductores de agua típicos disminuyen el contenido de agua en aproximadamente 5% a 10%, mientras que los reductores de agua de alto rango reducen el contenido de agua de 12% a 30%.

Con los aditivos reductores de agua generalmente se obtiene un aumento en la resistencia porque se reduce la relación agua-cemento.

Dependiendo de su composición química, los aditivos reductores de agua pueden disminuir, aumentar o no tener ningún efecto en el sangrado. Muchos aditivos reductores de agua también pueden retardar el tiempo de fraguado del concreto. Algunos aditivos reductores de agua, como los lignosulfonatos, también pueden incluir algo de aire en el concreto.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

ADITIVOS RETARDANTES

Los aditivos retardantes se emplean para aminorar la velocidad de fraguado del concreto y se emplean en ocasiones para:

1. Compensar el efecto acelerante que tiene el clima cálido en el fraguado del concreto.
2. Demorar el fraguado inicial del concreto o lechada cuando se presentan condiciones de colado difíciles o poco usuales.
3. Retrasar el fraguado para aplicar procesos de acabados especiales.

Debido a que la mayoría de los retardantes también actúan como reductores de agua, se les denomina frecuentemente retardantes-reductores de agua. Los retardantes también pueden incluir un poco de aire en el concreto. En general, el empleo de retardantes va acompañado de una cierta reducción de la resistencia a edades tempranas, pero sin afectar la resistencia a edades tardías.

ADITIVOS ACELERANTES

Se emplean para acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto a edades tempranas.

El cloruro de calcio (CaCl_2) es el material comúnmente usado en los aditivos acelerantes. Aparte del incremento en aceleración de resistencia, el cloruro de calcio produce un aumento en la contracción por secado, una posible corrosión del refuerzo, descoloramiento y posibles descascaramientos.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

El cloruro de calcio no es un agente anticongelante, sin embargo cuando se emplea en cantidades permisibles, reducirá el punto de congelación del concreto en más de unos cuantos grados.

El cloruro de calcio se debe agregar a la mezcla de concreto en forma de solución como parte del agua de mezclado. Los grumos no disueltos en la mezcla pueden causar reventones o manchas oscuras en el concreto endurecido. La cantidad de cloruro de calcio en ningún caso deberá exceder el 2% del peso del cemento. Una sobredosis puede producir problemas en el colado y ser nocivo para el concreto, pues podría provocar un endurecimiento rápido, causar un fuerte incremento en la contracción por secado, corroer al refuerzo y ser causante de pérdidas de resistencia.

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES (REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO)

Los concretos producidos con este aditivo son concretos muy fluidos pero trabajables, los cuales se pueden colocar con poca o ninguna vibración o compactación, pudiendo quedar todavía libres de sangrado o segregación excesiva. El concreto fluido se emplea:

1. En colados de sección delgada.
2. En áreas que tengan el acero de refuerzo cercanamente espaciado o muy congestionado.
3. En colados con tubo-embudo (bajo el agua).
4. Como concreto bombeable para disminuir la presión de la bomba.
5. Para aminorar los costos de manejo.

Los reductores de agua de alto rango, también se pueden emplear para fabricar concretos de baja relación agua-cemento y de alta resistencia. Esta reducción en el contenido de agua y en la relación agua-cemento permite producir concretos con:

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

1. Resistencias últimas a compresión arriba de 700 kg/cm^2 .
2. Mayores adquisiciones de resistencia a edad temprana.
3. Una menor penetración de ion cloruro así como otras propiedades favorables.

El efecto para elevar la trabajabilidad o para producir concretos fluidos es de corta duración, de 30 a 60 minutos, y va seguido por una pérdida muy rápida de trabajabilidad.

El concreto con superplastificante experimenta una menor contracción por secado que un concreto convencional de alto revenimiento y alto contenido de agua, aunque experimenta una contracción por secado similar o mayor que un concreto convencional de bajo revenimiento y bajo contenido de agua.

El concreto con superplastificante tiene vacíos de aire incluido de mayor tamaño que un concreto normal con aire incluido.

INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN

El inhibidor de corrosión líquido más comúnmente empleado, el nitrito de calcio, bloquea la reacción de corrosión de los iones cloruro reforzando químicamente y estabilizando la película pasiva. El ion nitrito provoca que los óxidos de fierro se vuelvan insolubles. En efecto, se evita que los iones cloruro penetren la película pasiva y que entren en contacto con el acero. El nitrito de calcio también es un acelerante.

Otros métodos para reducir la corrosión incluyen el uso de aceros de refuerzo recubiertos con epóxicos. Los epóxicos actúan evitando que los iones cloruro alcancen al acero. Los tratamientos de superficie y las sobrecapas de concreto intentan detener o reducir la penetración del ion cloruro en la superficie del concreto. Como

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

tratamientos de superficie se emplean las silanas, las siloxanas, los metacrilatos, los epóxicos y otros materiales.

AGENTES A PRUEBA DE HUMEDAD

Los aditivos que se conocen como agentes a prueba de humedad comprenden a ciertos jabones, estearatos y productos derivados del petróleo. Pueden a veces reducir la permeabilidad de los concretos que tienen contenidos de cemento bajos, relaciones agua-cemento altas, o deficiencias de finos en los agregados. Su uso en mezclas bien proporcionadas, puede aumentar el agua de mezclado requerida y resultar realmente en un incremento en la permeabilidad, en lugar de una reducción de ésta.

Los aditivos a prueba de humedad se emplean para reducir la transmisión de humedad a través de concretos que estén en contacto con agua o con tierra húmeda. Muchos de estos aditivos no resultan efectivos, especialmente cuando se usan en concretos que están en contacto con agua a presión.

ADITIVOS COLORANTES

Normalmente el peso de los pigmentos no deberá exceder al 10% del peso del cemento. En general el uso de pigmentos en cantidades inferiores al 6% del peso del cemento no afecta a las propiedades del concreto.

El negro de humo sin modificar reduce substancialmente el contenido de aire. La mayoría de negros de humo que se utilizan como colorantes para concreto contiene un aditivo para compensar su efecto en el contenido de aire.

ADITIVOS QUÍMICOS PARA REDUCIR LA REACTIVIDAD CON LOS ÁLCALIS

Algunos productos químicos han tenido éxito para reducir la expansión álcali-agregado. De éstos, las sales de litio y de bario han mostrado reducciones sobresalientes. Sin embargo, los métodos más prácticos para reducir la expansión álcali-agregado consiste en el uso de puzolanas de las cuales se conozca su capacidad para reducir la expansión.

ADITIVOS Y AGENTES PARA UNIR

Los aditivos para unir normalmente son emulsiones de agua de materiales orgánicos entre los que se incluyen al hule, al cloruro de polivinilo, a los acrílicos, a los copolímeros de butadieno estireno y a otros polímeros.

Se les agregan a las mezclas de cemento portland para incrementar la adherencia entre un concreto nuevo y uno viejo. La resistencia a la flexión y la resistencia al ingreso de iones cloruro también son mejoradas. Estos aditivos se agregan en proporciones equivalentes de 5% a 20% en peso del cemento.

Algunos aditivos de este tipo pueden aumentar el contenido de aire de las mezclas a las cuales han sido suministrados.

La superficie deberá estar seca, limpia, sana, libre de mugre, polvo, pintura, grasa y a una temperatura adecuada.

No se debe confundir a los agentes para unir con los aditivos para unir. Los aditivos son ingredientes en el concreto; los agentes para unir se aplican a las superficies de concreto existentes inmediatamente antes de que se coloque el concreto nuevo. Los agentes para unir se utilizan comúnmente en los trabajos de restauración y

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

de reparación y consisten de mortero de cemento portland modificado con polímeros tales como los epóxicos como el látex.

3.3.2 MATERIALES PUZOLÁNICOS

Una puzolana es un material silíceo o aluminosilíceo que por si mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Las puzolanas incluyen algunos compuestos naturales, como la ceniza volante , el humo de sílice y la escoria de alto horno.

PUZOLANAS NATURALES

Como puzolanas se emplean un gran número de materiales naturales, tales como tierras diatomáceas, horstenos opalinos, arcillas, pizarras, tobas volcánicas y piedra pómez. Aunque la mayoría se deben moler antes de ser usadas y muchas se deben calcinar a temperaturas de 650 a 980 °C, con el fin de activar sus componentes arcillosos.

CENIZA VOLANTE

El aditivo mineral más ampliamente usado en el concreto es la *ceniza volante*, la cual es un residuo finamente dividido² que resulta de la combustión del carbón mineral pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. Con la ignición en el horno, la mayor parte de la materia volátil y de carbono existentes en el carbón mineral se calcina. Durante la combustión, las impurezas del carbón mineral³ se funden en

² Polvo que se asemeja al cemento.

³ Como la arcilla, feldespatos, cuarzo y pizarra.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

suspensión y son retiradas de la cámara de combustión por el gas de escape. Mientras transcurre el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica formando partículas esféricas llamadas cenizas volantes. Posteriormente se separan de los gases de escape por medio de precipitadores electrostáticos o con filtros de bolsa. Normalmente no se necesitan procesos adicionales para el empleo de este material.

La mayor parte de las partículas en la ceniza volante son esferas sólidas y algunas otras son cenósferas huecas. También se encuentran presentes plerósferas, que son esferas que contienen a otras de menor tamaño. Los tamaños de estas partículas varían desde menos de una micra hasta más de 100, teniendo un tamaño típico menor a 20 micras. Normalmente el área superficial es de 300 a 500 m²/kg en promedio. La densidad de la ceniza volante generalmente se encuentra dentro del rango de 2.2 a 2.8 y su color va de gris a negro.

Las cenizas volantes consisten principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice, alúmina, hierro y calcio. Aunque también se encuentran presentes, pero en menor cantidad, magnesio, azufre, sodio, potasio, carbono y pequeñas cantidades de compuestos cristalinos.

HUMO DE SÍLICE

El *humo de sílice*, al que también se le conoce como microsílíce, es otro material que se emplea como aditivo puzolánico. Se presenta en forma de polvo de color gris claro a oscuro y en ocasiones gris azulado verdoso, es resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio. El humo de sílice asciende como vapor oxidado en los hornos a 2000 °C. Se enfría, se condensa y se recolecta en enormes bolsas de tela. Entonces se le procesa para retirar las impurezas y controlar el tamaño de las partículas.

El humo de sílice esencialmente consiste en dióxido de sílice⁴ en forma no cristalina. Puesto que es un material susceptible de ser conducido por el aire como la ceniza volante, tiene forma esférica. Es extremadamente fino, con partículas con diámetros menores de una micra y con un diámetro promedio de aproximadamente 0.1 micras, casi 100 veces menor que las partículas promedio de cemento. El humo de sílice tiene un área superficial de aproximadamente 20000 m²/kg. El peso específico de este material se ubica dentro del rango de 2.10 a 2.25 pero puede llegar a 2.55. Su peso volumétrico sin compactar es de aproximadamente 250 a 300 kg/m³.

ESCORIA DE ALTO HORNO

La escoria granulada de alto horno molida, fabricada a partir de la escoria de alto horno de hierro, es un producto no metálico que consiste principalmente en silicatos y aluminatos de calcio y de otras bases que se desarrollan en la fundición simultánea con el hierro en los altos hornos. La escoria fundida a una temperatura de aproximadamente 1500 °C, queda templada rápidamente al enfriarse por inmersión en agua y forma un material granular vítreo parecido a la arena. Este material granular es molido a menos de 45 micras, obteniéndose una finura Blaine de aproximadamente 400 a 600 m²/kg. Esta escoria molida, áspera y angulosa, al entrar en contacto con el agua y algunos activadores (productos propios del cemento) se hidrata y fragua de manera similar al cemento portland. Sin embargo la escoria enfriada al aire no tiene las propiedades hidráulicas que tiene la escoria enfriada con agua.

⁴ Más del 90%.

3.4 AGUA

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga sabor u olor pronunciado se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas no potables pueden ser adecuadas para el concreto.

Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

El agua que contenga más de 2000 ppm de sólidos disueltos deberá ser ensayada para investigar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

CARBONATOS Y BICARBONATOS ALCALINOS

Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio tienen diferentes efectos en los tiempos de fraguado de cementos.

Cuando la suma de sales disueltas exceda 1000 ppm se deberán realizar pruebas para analizar su efecto sobre el tiempo de fraguado y sobre la resistencia a los 28 días.

CLORUROS

Los iones de cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino (pH 12.5) presente en el concreto. El nivel de iones cloruro solubles en el agua en la cual la corrosión del acero de refuerzo comienza con el concreto es de aproximadamente de 0.15% del peso del cemento. Del

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

contenido total de ion cloruro en el concreto, sólo es soluble en el agua aproximadamente del 50% al 85%.

SULFATOS

Un elevado contenido de sulfatos en el agua, se debe a las posibles reacciones expansivas y al deterioro por ataque de sulfatos, especialmente en aquellos lugares donde el concreto vaya a quedar expuesto a suelos o agua con contenidos elevados de sulfatos.

OTRAS SALES COMUNES

No se consideran dañinas las concentraciones inferiores o iguales a 400 ppm de bicarbonato de calcio y de magnesio. Se han obtenido buenas resistencias con concentraciones hasta de 40000 ppm de cloruro de magnesio. Las concentraciones de sulfato de magnesio deberán ser inferiores a 25000 ppm.

SALES DE HIERRO

Las sales de hierro en concentraciones hasta de 40000 ppm normalmente no afectan de manera adversa al desarrollo de la resistencia.

DIVERSAS SALES INORGÁNICAS

Las sales de magnesio, estaño, zinc, cobre y plomo presentes en el agua pueden provocar una reducción considerable en la resistencia y también grandes variaciones en el tiempo de fraguado. De éstas las más activas son las sales de zinc, de cobre y de plomo. Las sales que son especialmente activas como retardantes, incluyen al yodato de sodio, fosfato de sodio, arsenato de sodio y borato de sodio.

CAP. 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CONCRETO

Todas ellas pueden retardar fuertemente el desarrollo del fraguado y de la resistencia cuando se les encuentra en concentraciones de unas cuantas décimas porcentuales del contenido en peso del cemento. Generalmente se pueden tolerar en el agua concentraciones hasta de 500 ppm.

Otra sal que puede ser dañina al concreto es el sulfuro de sodio; aún la presencia de 100 ppm requiere de ensayos.

AGUA DE MAR

El agua de mar que contenga hasta 35,000 ppm de sales disueltas, generalmente es adecuada como agua para fabricar concreto simple, más no es adecuada para producir concreto reforzado con acero y no deberá usarse en concretos presforzados debido al riesgo de corrosión del refuerzo, particularmente en ambientes cálidos y húmedos. El agua de mar no se deberá usar para producir concretos que tengan agregados potencialmente reactivos con los álcalis.

AGUAS ÁCIDAS

El agua de mezclado que contiene ácidos clorhídrico, sulfúrico y otros ácidos inorgánicos comunes en concentraciones inferiores a 10,000 ppm no tiene un efecto adverso en la resistencia. Las aguas ácidas con valores pH menores de 3.0 pueden ocasionar problemas de manejo.

AGUAS ALCALINAS

Las aguas con concentraciones de hidróxido de sodio de 0.5% en peso del cemento, no afectan en gran medida la resistencia del concreto, sin embargo mayores concentraciones la pueden reducir.

AGUAS DE DESPERDICIOS INDUSTRIALES

Las aguas de desperdicios industriales como las de curtidoras, fábricas de pinturas, plantas de coque, y plantas químicas y galvanizadoras pueden contener impurezas nocivas para el concreto, así que siempre que se pretenda su uso para tal fin, serán indispensables ensayos y pruebas de laboratorio.

INFLUENCIA DEL AZÚCAR

Una pequeña cantidad de sacarosa, de 0.03% a 0.15% del peso del cemento, normalmente retarda el fraguado del cemento. Menos de 500 ppm de azúcar en el agua de mezclado, generalmente no produce un efecto adverso en el desarrollo de la resistencia.

SEDIMENTOS O PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

Se puede tolerar en el agua aproximadamente 2,000 ppm de arcilla en suspensión o de partículas finas de roca. Cantidades mayores podrían no afectar la resistencia, pero bien podrían influir sobre otras propiedades del agua. Cuando se regresan finos de cemento al concreto en aguas de enjuague recicladas, se pueden tolerar 50,000 ppm.

INFLUENCIA DEL ACEITE

Concentraciones de aceite mineral mayores de 2.5% del peso del cemento pueden reducir la resistencia del concreto en más del 20%.

4.1 FABRICACIÓN DEL ACERO

4.1.1 FABRICACIÓN DEL HIERRO

El componente básico del acero es el hierro. Éste no se encuentra en estado puro en la naturaleza, sino bajo la forma de óxidos de distintas clases llamados minerales de hierro. Para obtener acero es necesario someter los minerales de hierro a una serie de procesos para eliminar impurezas y obtener la aleación requerida. Esta serie de procesos consiste esencialmente en lo siguiente: se mezcla el mineral de hierro con carbón de coque y piedra caliza y se introduce la mezcla en un alto horno donde es sometida a temperaturas elevadas. A la mezcla fundida se le inyecta aire, con lo que se reducen los óxidos de hierro. El producto resultante, llamado arrabio o hierro de primera fusión, contiene entre otras impurezas aproximadamente 3% de carbono, 1.5% de sílice y cantidades menores de manganeso y fósforo. Este material es poco apropiado para aplicaciones estructurales por su fragilidad.

Para obtener un material más dúctil, es necesario eliminar la mayor cantidad de impurezas posibles y lograr un contenido adecuado de carbono. Las impurezas se eliminan quemándolas mediante la introducción de aire en la masa fundida, obteniéndose así hierro casi puro. Para lograr las características resistentes requeridas se agrega carbono, y en ciertos casos, otros elementos. El resultado de esta etapa son elementos de acero relativamente grandes denominados lingotes.

4.1.2 FABRICACIÓN DE LOS ACEROS DE CONSTRUCCIÓN

Recibe el nombre de acero una aleación de hierro y carbono que se obtiene tras los procesos de fusión o afino de chatarra o arrabio. Su contenido en carbono no debe exceder del 1.7% y está siempre presente como carburo de hierro distribuido a través de la masa.

El acero es muy fuerte y dúctil; sin embargo, conforme el contenido de carbono aumenta, el acero se hace más resistente y duro, pero menos dúctil y resistente al impacto. Los aceros que contienen entre 0.5% y 1.5% de carbono son capaces de ser endurecidos y templados por un tratamiento térmico. Los aceros al carbono se dividen en aceros suaves o de bajo carbono y aceros de alto carbono que en algunas ocasiones son conocidos como aceros para herramienta o incorrectamente, aceros colados.

Los diferentes grados de los aceros al carbono son:

- Acero suave, tiene un contenido de carbono menor que 0.1%. Es blando y dúctil y se usa para tubos, barras para remachar, láminas para estampado profundo y prensado. Estos aceros no se usan en máquinas porque son blandos, pero pueden soldarse fácilmente.
- Aceros de bajo carbono. Tienen un contenido de carbono arriba de 0.1% pero menor de 0.35%, es duro y menos dúctil que el acero suave, se usa para secciones estructurales y placas, barras para maquinado y forjado y para fundiciones de acero. El acero de bajo carbono se suelda fácilmente y tiene buenas propiedades mecánicas.
- Acero de medio carbono. Tiene un contenido del 0.35% al 0.7%. Es más duro, resistente y menos dúctil que el acero de bajo carbono, aunque es más difícil de soldar y maquilar.
- Acero de alto carbono. Tiene un contenido de 0.7% al 1.5%. Esta clase de acero es duro y de menor ductilidad que los aceros al bajo carbono y es casi siempre llevado a un tratamiento térmico (por ejemplo, endurecido y templado), antes de ser usado. Sus propiedades varían con el contenido en carbono y el método de tratamiento térmico. Es muy difícil de soldar.

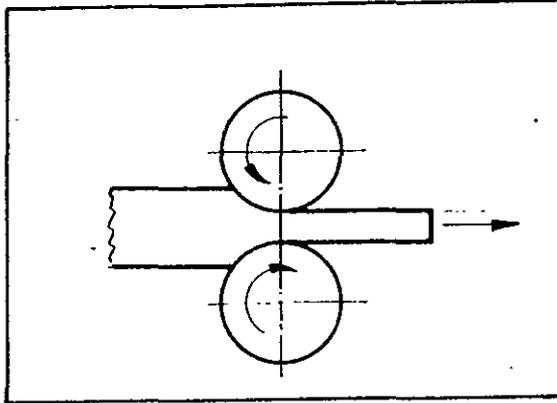
La mayoría de los aceros para construcción empleados por los ingenieros, son de bajo carbono o acero suave, contienen de 0.1% a 0.5% de carbono y se produce por el proceso de horno de hogar abierto:

En este método, un mineral de bajo grado puede ser usado con chatarra para producir acero de alta calidad. Una carga de arrabio fundido o barra, conjuntamente con desperdicios seleccionados y fundentes adecuados, es fundido mediante la combustión de gas o de aceite, pudiendo tomar 14 horas eliminar todas las impurezas. Se agregan pequeñas cantidades de manganeso y silicio para desoxidar el metal. Posteriormente el material pasa a los hornos de afino, de donde sale en estado líquido y se le hace solidificar en forma de lingotes. Estando los lingotes al rojo se les hace pasar por una serie de cilindros paralelos, que al comprimirlos los estiran y reducen su sección (ver fig. 4.1), hasta que por último las muescas o canales de los cilindros acabadores les forzan a tomar la forma y sección requerida (ver fig. 4.2). Esta operación recibe el nombre de *"laminado en caliente"*.

El acero normalmente empleado en el concreto reforzado tiene forma de barras de pequeños diámetros y gran longitud, de sección sensiblemente circular, siendo los diámetros mostrados en la tabla 4.1 los más comunes.

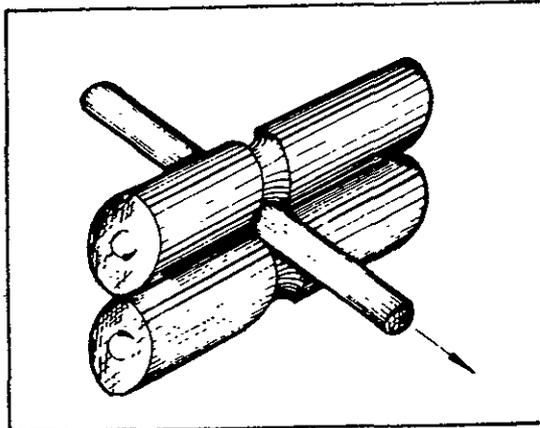
Por la forma de su superficie, las barras podrán ser lisas o corrugadas, llevando estas últimas unas protuberancias o resaltes que facilitan su adherencia al concreto (fig. 4.3).

Cuando la sección no sea circular constante, lo que ocurre en el caso de las barras corrugadas, se toma como diámetro nominal de la barra el del círculo de área igual a su sección transversal.



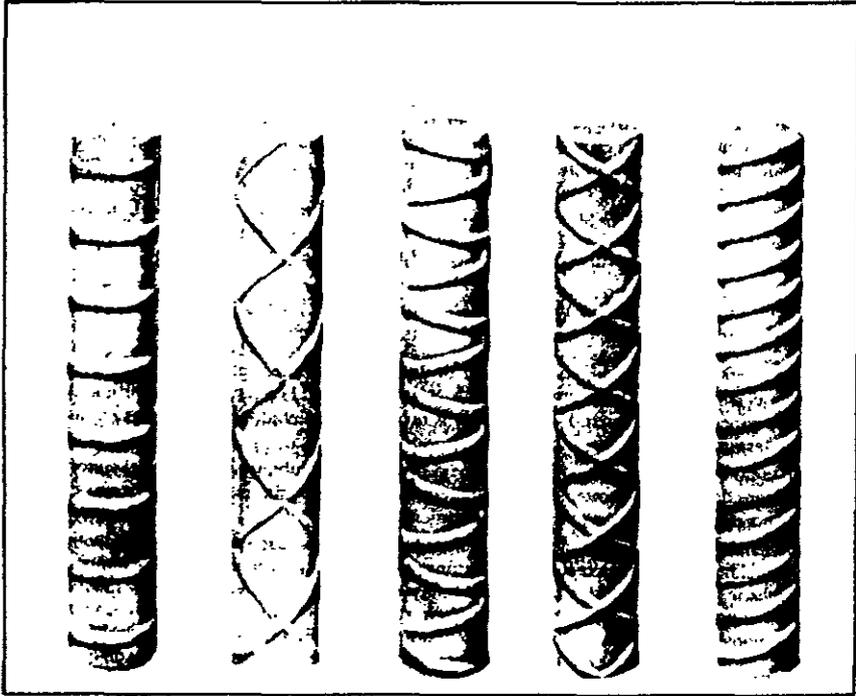
CILINDROS DE LAMINACIÓN

FIG. 4.1



CILINDROS ACABADORES

FIG.4.2



ALGUNOS TIPOS DE BARRAS
CORRUGADAS DE REFUERZO

FIG. 4.3

TABLA 4.1
DIAMETROS DE LAS BARRAS DE ACERO MAS USUALES

DIA METRO		SECCION cm ²	PESO KILOS/METRO
PULGADAS	mm		
1/4	6.4	0.32	0.251
5/16	7.9	0.49	0.384
3/8	9.5	0.71	0.557
1/2	12.7	1.27	0.996
5/8	15.9	1.99	1.560
3/4	19.1	2.87	2.250
1	25.4	5.07	3.975
1 1/4	31.8	7.94	6.225
1 1/2	38.1	11.40	8.938

Las longitudes en que se presentan las barras mostradas en la tabla 4.1, son variables dependiendo del proveedor, pero por razones de fabricación y transporte, las longitudes más usuales que se presentan en el mercado son:

- Para los primeros diámetros, unos 50 metros, en rollos de 1 metro de diámetro.
- Para los diámetros de valor medio, unos 12 metros en horquillas de unos 6 metros de longitud.
- Para los 3 ó 4 últimos diámetros, barras rectas de una longitud aproximada de 6 a 7 metros.

Con el fin de distinguir de forma fácil los diferentes grados y tamaños de las barras, lo cual es necesario para evitar el uso accidental de barras de menor resistencia o menor tamaño que los requeridos para el diseño, todas las barras corrugadas se suministran contramarcadas. En estas marcas se identifica la

siderúrgica que las produce (usualmente una inicial), el número del tamaño de la barra y el tipo de acero; y una marca adicional para identificar los aceros de alta resistencia.

4.2 CONSTANTES QUE DEFINEN UN ACERO DE CONSTRUCCIÓN

VARIABILIDAD E ÍNDICE DE RESISTENCIA

El índice de resistencia más comúnmente utilizado para identificar un acero es el esfuerzo de fluencia. El empleo de este índice, así como de las demás características de los diagramas esfuerzo-deformación en la predicción del comportamiento de elementos estructurales tiene limitaciones, puesto que las condiciones reales de uso de la estructura pueden no corresponder a las condiciones en que se efectúan los ensayos estándar. Los ensayos se efectúan bajo ciertas condiciones de velocidad, por lo cual debe esperarse que la resistencia de los elementos estructurales varíe según las condiciones de carga mencionadas, lo que debe tenerse en cuenta al establecer correlaciones entre los índices de resistencia y el comportamiento probable de los elementos estructurales. Así, las temperaturas bajas y la deformación rápida tienden a aumentar el esfuerzo de fluencia y la resistencia pero disminuyen la ductilidad. A temperaturas altas sucede lo contrario.

PRUEBA DE TENSIÓN

En la máquina universal se ensaya a tensión una probeta de acero hasta que se rompa. Se dibuja un diagrama esfuerzo-deformación unitaria, en el cual las ordenadas representan las cargas unitarias que soporta la probeta, y las abscisas, los alargamientos unitarios que experimenta.

Es importante referir los ensayos a probetas estándar, puesto que los resultados difieren según el tamaño y la forma de éstas. Se considera que las curvas esfuerzo-

deformación en compresión tiene la misma forma que las de tensión. Tanto el área como la longitud sobre la que se miden los alargamientos son estándar.

Durante el ensayo, y posteriormente en el diagrama (ver fig. 4.4), se pueden observar las siguientes fases o períodos:

- 1) Pequeños alargamientos proporcionales a los esfuerzos a que está sometido el material. Si cesa el esfuerzo, la probeta recobra sensiblemente su anterior longitud. Es el período elástico.
- 2) A partir de cierta carga, los alargamientos dejan de ser proporcionales a los esfuerzos y se hacen cada vez mayores. Cuando la carga cesa, la probeta queda alargada, con un aumento de longitud apreciable. Es la fase plástica.
- 3) Al alcanzar la carga cierto valor, se produce en una zona limitada de la probeta, una disminución brusca de sección acompañada de un alargamiento localizado en esta zona. Es el alargamiento final y la ruptura (estricción).

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Tomando como base los anteriores fenómenos se definen los números índice de la calidad de un acero de construcción:

- Tensión máxima de ruptura o carga de ruptura: valor máximo de la ordenada en el diagrama esfuerzo-deformación. Se mide en kilogramos por centímetro cuadrado.

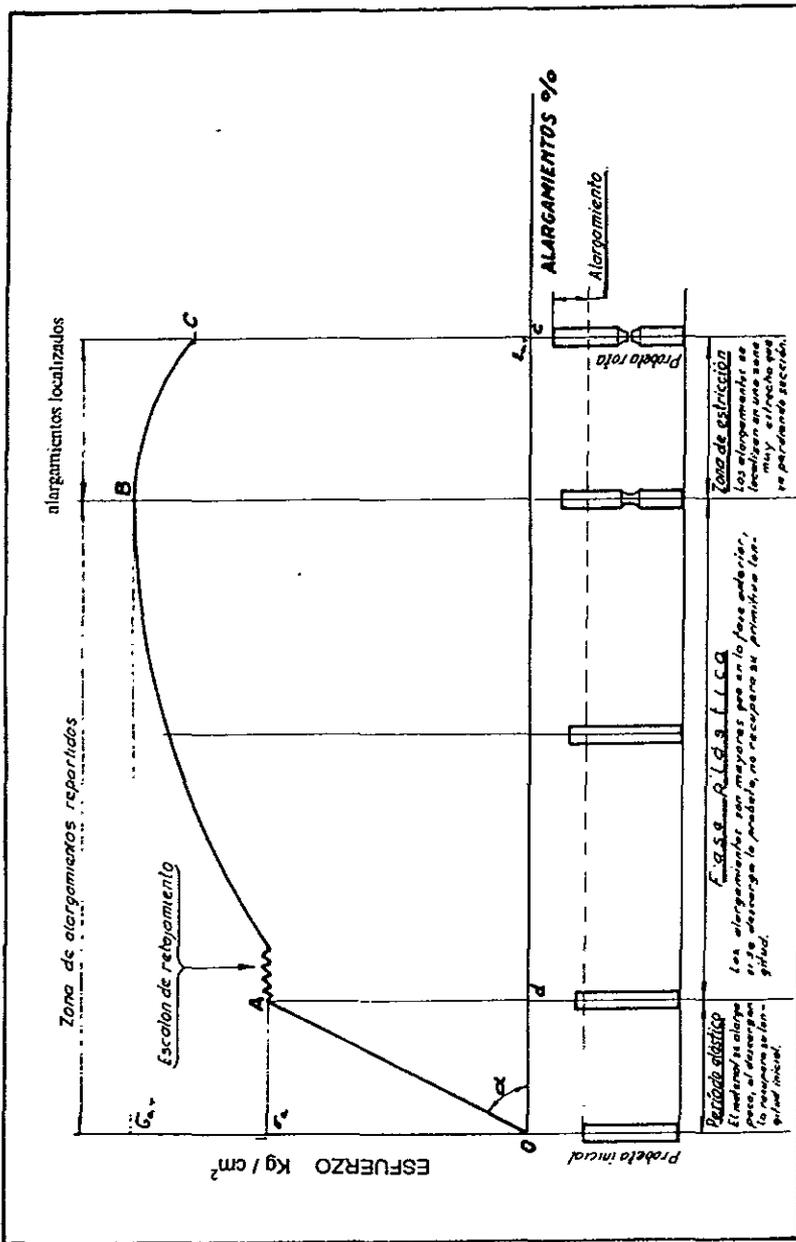


DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN TÍPICO DE UN ACERO DE CONSTRUCCIÓN LAMINADO EN CALIENTE

FIG. 4.4

- Límite elástico: máxima tensión que al dejar de actuar no produce deformaciones permanentes en el material. Se mide en kilogramos por centímetro cuadrado. La forma de definir el límite elástico o de fluencia es distinta según la clase de acero. En los aceros laminados en caliente la zona de fluencia está claramente definida. En algunos casos puede distinguirse un límite de fluencia superior y uno inferior, cuando esto sucede suele considerarse únicamente el límite de fluencia inferior. Sin embargo, son comunes los aceros en los que se distingue un solo esfuerzo de fluencia.
- Alargamiento o elongación: El aumento de la longitud que ha experimentado el material hasta el momento de romperse, se mide en tanto por ciento. Los datos de porcentaje de alargamiento deben ir siempre acompañados de las longitudes de medición respecto a las cuales fueron determinados. Las longitudes especificadas son muy variables. Mientras que para alambres de presfuerzo a veces se considera una longitud de sólo 10 diámetros, en acero para perfiles estructurales es común una longitud de 20 cm. Los valores típicos del porcentaje de alargamiento varían entre 5 y 20%.
- Módulo de elasticidad o módulo de deformación longitudinal: Coeficiente angular, o valor de la tangente a la curva esfuerzo-deformación en un punto genérico. Se mide con las mismas unidades del diagrama y, como el alargamiento se mide a su vez en tanto por ciento, como parámetro adimensional; así pues, el módulo de elasticidad se da en kg/cm^2 . Su valor varía poco según el tipo de acero y puede tomarse igual a $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ aunque también es usual el valor de $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$.

4.3 OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL ACERO

- Módulo de Poisson: Se define como:

$$\nu = \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}}$$

y varía entre 0.25 y 0.33.

- **Ductilidad:** El acero es un material muy dúctil. En un acero laminado en caliente, la deformación unitaria en la falla puede llegar a ser de 150 a 200 veces la correspondiente a la fluencia. Por lo común, la ductilidad del acero disminuye al aumentar su resistencia y el contenido de carbono. Los tratamientos en frío también suelen disminuir la ductilidad por lo cual, el proyectista debe recordar que al usar aceros de muy alta resistencia está sacrificando esta propiedad. Una medida usual de la ductilidad del acero es el porcentaje de alargamiento en la ruptura, medida sobre una longitud estándar. Otros índices son la deformación correspondiente a la falla, la amplitud de la zona de fluencia en aceros laminados en caliente y, para varillas de refuerzo de concreto, el radio de doblado admisible.
- **Coefficiente de dilatación térmica:** Para cálculos de efectos de temperatura suele considerarse un valor promedio de $0.00001/^{\circ}\text{C}$.
- **Soldabilidad:** Una de las propiedades más útiles del acero, es la posibilidad de unir elementos estructurales de este material por medio de soldadura.
- **Resistencia a la corrosión:** La resistencia a la corrosión de la mayoría de los aceros utilizados para fines estructurales es baja. Esto significa la necesidad de proporcionar protección a las estructuras de acero expuestas a agentes corrosivos tales como el oxígeno, el vapor de agua, los sulfuros, etc. La protección puede consistir en algún tratamiento superficial o en la aleación con algún elemento que comunique propiedades anticorrosivas al acero.
- **Resistencia a los incendios:** aunque el acero es un material incombustible, sus propiedades resistentes se deterioran considerablemente bajo temperaturas altas, por lo tanto, es necesario proteger las estructuras de acero contra los efectos de los incendios. Para mejorar la resistencia del acero al fuego puede protegerse con revestimientos de concreto, yeso, asbesto y ciertos productos especiales.

4.4 ACEROS ESTIRADOS EN FRÍO

Si el ensayo de tensión se detiene en un punto de la fase plástica y se descarga la probeta, ésta se acortará y quedará con una longitud mayor de la que tenía al principio. Si con esta probeta así tratada se realiza nuevamente el ensayo de tensión y se dibuja el diagrama correspondiente, este tomará una forma distinta de la que tendría si no hubiera sido previamente estirada la probeta (ver fig. 4.5). El aspecto que presenta da la sensación de que la probeta quisiera continuar el camino que le faltaba por recorrer al detenerse el primer ensayo. A pesar de todo, se pueden distinguir fácilmente las tres fases: elástica, plástica y de extricción, y definir las mismas características:

- **Tensión máxima de ruptura:** Se define como se describió antes. Su valor es sensiblemente el mismo que el del acero sin estirar del que procede.
- **Límite elástico convencional:** El punto de inflexión o escalón de relajamiento, que en un acero normal marca el límite elástico, no se presenta en este diagrama. Esto es, de la recta de deformación elástica se pasa sin transición a la curva de deformación permanente. Por lo cual, dicho valor se suele definir como la mínima tensión capaz de producir una deformación permanente de 0.002 (0.2%). Su valor es mayor que el del mismo acero sin estirar del que procede.
- **Alargamiento:** Se conserva la definición descrita. Su valor es menor que el del acero sin estirar del que procede.
- **Módulo de elasticidad:** Se define como anteriormente se describió. Su valor es sensiblemente el mismo en los dos casos.

Como consecuencia de esta deformación remanente que le queda al acero estirado en frío resulta mucho más difícil de curvar y doblar, debido a que ha aumentado su acritud⁵. En cuanto a la acritud, no tiene importancia si las barras se

⁵ Acritud.-facilidad de trabajar en frío un acero.

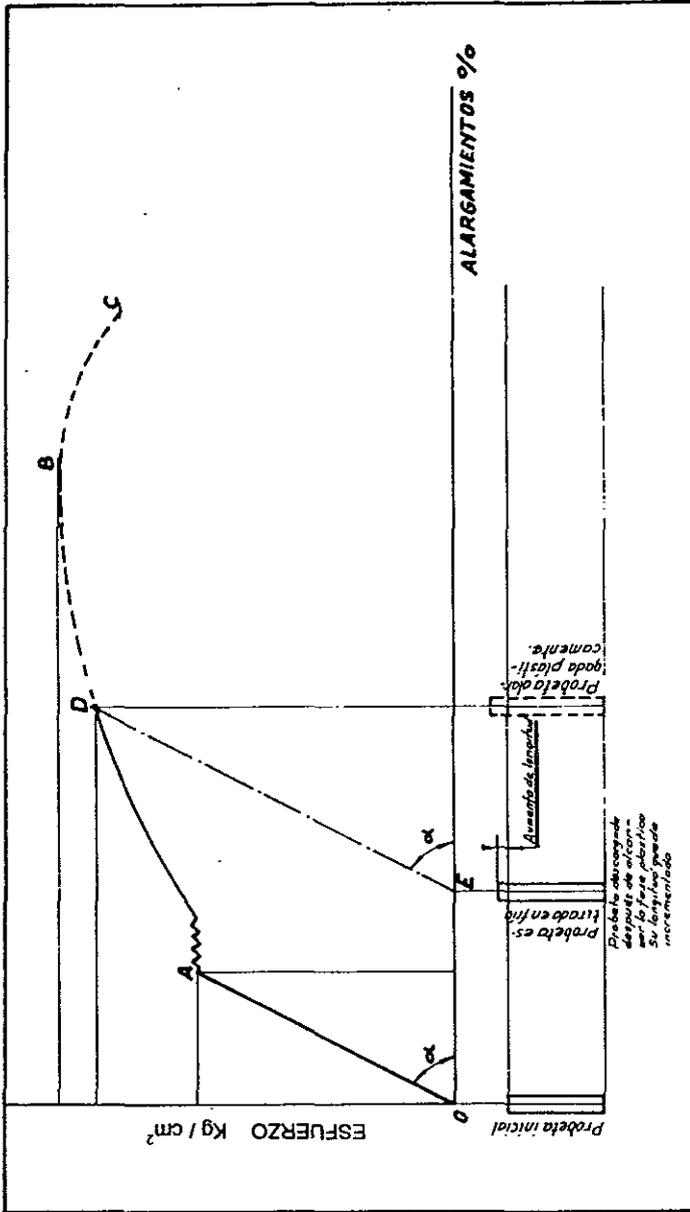


DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN TÍPICO
DE UN ACERO DE CONSTRUCCIÓN
TRATADO EN FRÍO

FIG. 4.5

CAP. 4 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS DE CONSTRUCCIÓN

curvan con máquinas, pero sí la tiene si se hace a mano. Por lo general su habilitado será más caro. Desde el punto de vista de la seguridad, hay que tener en cuenta que todas las barras estiradas en frío han sido ensayadas, por su mismo proceso de fabricación, a una tensión superior a la que luego se van a emplear.

Con el transcurso del tiempo varían las cualidades de los aceros estirados en frío; la tensión máxima de ruptura y el límite elástico tienden a aumentar ligeramente, pudiendo aparecer el escalón de relajamiento. El módulo de elasticidad no varía, más el alargamiento tiende a disminuir y los efectos de la acritud se hacen más agudos; por esto, los datos de un acero estirado en frío deben darse después del envejecimiento.

El envejecimiento se puede inducir calentando el acero durante dos horas a 250°C, pero sin alcanzar temperaturas superiores a los 700°C, ya que se provocaría la desaparición de las nuevas características, convirtiéndose en el mejor de los casos en un acero ordinario. Por esta razón, no se puede soldar ni doblar en caliente un acero estirado en frío, pues se alterarían totalmente las características garantizadas por el fabricante.

Con el estirado en frío se consigue aumentar el límite elástico de un acero, que como es evidente, es la carga que no se puede rebasar en su utilización.

Industrialmente se consigue este efecto retorciendo las barras, laminándolas en frío, e incluso con un estirado similar al que se ha descrito anteriormente.

4.5 COMPORTAMIENTO DEL ACERO INMERSO EN EL CONCRETO

4.5.1 ENSAYES SOBRE EL CONCRETO REFORZADO

Si el ensaye de tensión se realizara con una probeta de concreto armado, teóricamente se deberían distinguir los siguientes períodos:

Alargamiento elástico del concreto y el acero Aunque poco, el concreto resiste algo a la tensión (aproximadamente un 10% de la resistencia a la compresión) y se va alargando con el acero. No aparece en él ninguna fisura y si se descarga la probeta, recobra sin daño alguno su longitud inicial. Esta zona en la práctica es extremadamente pequeña.

Ruptura del concreto y alargamiento elástico del acero Alcanzada la carga de ruptura del concreto a tensión, aparecen grietas que van aumentando poco a poco su tamaño. Si se suprime la carga, las grietas se cierran aparentemente y la probeta recobra sensiblemente su longitud anterior. Si entonces se vuelve a cargar, las grietas aparecerán en el mismo sitio, porque una vez roto el concreto, desaparece su capacidad de resistencia a tensión.

Deformación plástica del acero Al seguir aumentando la carga las grietas crecen rápidamente, el acero alcanza la zona de los grandes alargamientos y sufre una disminución de sección. En este momento, el acero se despegas del concreto, el cual queda prácticamente colgado de los ganchos de las barras. La probeta está ya virtualmente destruida y aunque se

descargue, ni se cerrarán las grietas ni recobrará su longitud anterior.

Ruptura de la probeta Se producirá por desorganizarse las cabezas de las piezas, que están soportando todo el esfuerzo, o por haber alcanzado las barras la carga de ruptura.

Si el armado fuera muy débil con relación a la sección de concreto, no se presentarían la segunda y tercera fase del proceso señalado; ya que el concreto y el acero alcanzarían casi simultáneamente su tensión máxima de ruptura y la probeta se rompería sin que haya dado tiempo para que se aprecien las grietas.

Si el ensayo se realizara a la compresión en lugar de a la tensión, no aparecerían fisuras por no producirse alargamiento, sino acortamiento, y conforme se vaya acortando la probeta al aumentar la carga, ambos materiales experimentarían un incremento de sección, con lo cual la mutua adherencia crecería cada vez más. Mientras ambos materiales estén en la fase elástica, sus acortamientos serían iguales y soportarían proporcionalmente la carga. Cuando uno de los dos rebasa ese límite, el otro, bruscamente, tendría que soportar una carga para la que no está dimensionado, con lo que, inmediatamente, también entraría en la fase plástica y la pieza quedaría destruida. La ruptura de una pieza a compresión se produce generalmente sin previo aviso, porque prácticamente ambos materiales alcanzan al mismo tiempo la carga de ruptura.

4.5.2 IMPLICACIONES

Siendo la fisuración en el trabajo a tensión un fenómeno que no se puede evitar (si se quiere aprovechar al máximo la capacidad de los armados), se utiliza para avisar que la pieza está a punto de quedar destruída. Como la grieta es una zona en la cual

el armado deja de estar protegida contra los agentes exteriores, no conviene que pase de ciertas dimensiones que permitan el peligro de oxidación. La amplitud tolerable depende del agente agresivo, y si queremos que la grieta nos avise del peligro que corre la pieza, habrá de tener un tamaño mínimo para poder ser apreciada a simple vista, tal como se indica en la tabla 4.2.

TABLA 4.2
ABERTURA TOLERABLE DE GRIETA PARA CONCRETO REFORZADO

CONDICIONES	TAMAÑO MAXIMO (mm)
Estructuras abrigadas de la intemperie o en clima seco	0.30
Estructuras a la intemperie	0.20
Estructuras en ambientes agresivos	0.10
*Nota: Para grietas visibles a simple vista	0.15

Planteando así el problema, interesa en primer lugar que en una longitud dada de pieza la abertura total del agrietamiento se reparta en el mayor número posible de fisuras para que la amplitud de cada una de ellas sea menor, lo que se logra aumentando la adherencia entre el concreto y el acero, ya que la existencia de grietas indica un deslizamiento entre ambos materiales. Ello conduce a aumentar la superficie adherente entre el concreto y el acero, lo que es fácil de conseguir si se emplean muchas barras de pequeño diámetro en lugar de pocas de gran sección, o bien aumentar la rugosidad de la superficie de la barra con el empleo del acero corrugado.

5.1 FUNDAMENTOS DE QUIMICA

Compuesto iónico.- Se entiende por compuesto iónico aquel en el cual sus átomos se encuentran unidos mediante enlaces de tipo iónico. De hecho, se puede decir que en realidad se componen de iones (positivos y negativos) unidos entre sí por fuerzas electrostáticas.

El enlace iónico por lo general se forma entre elementos de electronegatividades muy diferentes, es decir que su localización en la tabla periódica sea lo más distante posible. El ejemplo más común de los compuestos iónicos es el cloruro de sodio (NaCl), como puede verse, el cloruro y el sodio se encuentran en lugares bien distantes dentro de la tabla periódica, entonces, de acuerdo con lo anterior, los cristales de este compuesto se encuentran formados de iones sodio e iones cloruro.

Por lo general, al colocar un compuesto iónico en un medio como el agua, se llevará a cabo una fragmentación del mismo en sus iones correspondientes, esto es de suma importancia pues es así como se facilitan las reacciones en soluciones acuosas.

Oxidación-reducción.- Se entiende por oxidación la pérdida de electrones y por reducción la ganancia de ellos, estos procesos al presentarse deben ser simultáneos y de la misma magnitud, es decir que el átomo que se reduce al tomar electrones, provoca que el otro átomo se oxide al perder electrones que cedió. Así el átomo o elemento que se oxida es reductor del otro átomo el cual se reduce al actuar como oxidante. En terminos generales se tiene que:

- **Oxidación.**- Proceso en el que se da un aumento de cargas positivas de un ion, proceso de combinación de una substancia con el oxígeno, o sea una pérdida de electrones.

- Reducción.- Proceso en el que se da la disminución de cargas positivas de un ion, una ganancia de electrones.

En una escala de números de oxidación los cambios efectuados de izquierda a derecha se les considera como oxidaciones y los cambios efectuados de derecha a izquierda se les considera como reducciones.

Los números de oxidación de los elementos que toman parte en una reacción química se asignan de acuerdo a las siguientes reglas:

1. El número de oxidación de los elementos libres (sin combinar) es de cero
2. Al asignar los números de oxidación a los elementos que forman un compuesto se debe comenzar con el hidrógeno o con el oxígeno.
3. El número de oxidación del hidrógeno combinado es + 1.
4. El número de oxidación del oxígeno combinado es de - 2.
5. La suma algebraica de los números de oxidación de todos los elementos que forman un compuesto es siempre igual a cero, esto permite conocer el número de oxidación de un elemento combinado con el hidrógeno o con el oxígeno.
6. Los números de oxidación de los demás elementos combinados son la respectivas valencias con las que trabaja en el compuesto determinado.

Electrolitos.- Los compuestos químicos cuando se encuentran en soluciones acuosas se fragmentan en iones (disociación iónica), unos en mayor proporción que otros, y algunos más no se disocian. De acuerdo a esto, pueden clasificarse de la manera mostrada en la figura 5.1.

Un electrolito es un compuesto que fundido o en solución acuosa puede conducir la corriente eléctrica. Los electrolitos pueden ser fuertes y débiles.

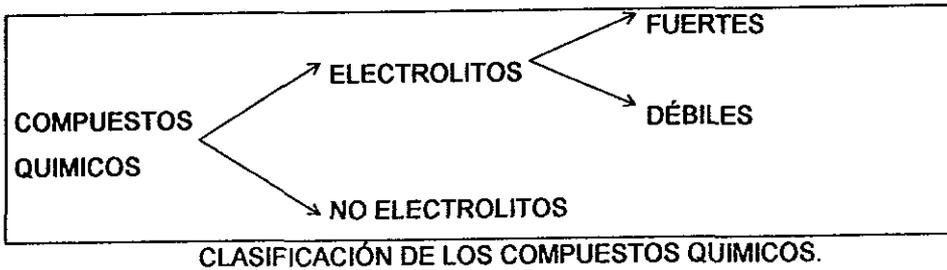


FIGURA 5.1

Un electrolito fuerte es aquel compuesto que en solución acuosa se disocia el 100% y puede, por tanto, conducir la totalidad de una corriente eléctrica que se le haga pasar.

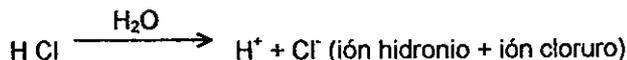
Un electrolito débil es aquel compuesto (algunas veces poco soluble) que en solución acuosa se disocia iónicamente en menor proporción y por lo tanto, sólo conducirá parcialmente la corriente eléctrica que se le haga pasar.

Un no electrolito, es aquel compuesto químico que aunque pueda ser soluble en agua, no conduce la corriente eléctrica que se le haga pasar. Se entiende por electrólisis la descomposición de una sustancia química (que se encuentra en solución acuosa o fundida) mediante el paso de una corriente eléctrica.

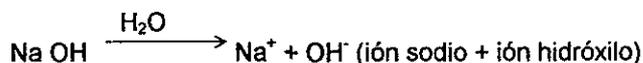
Ácidos.- Cuando un no metal se combina con el oxígeno tiene lugar la formación de un anhídrido y si éste se combina con el agua entonces se forma un ácido.

Bases.- Cuando un metal se combina con el oxígeno tiene lugar la formación de un óxido y si este a su vez se combina con el agua entonces se forma una base o hidróxido (también se le suele llamar álcali).

Reacciones hidrolíticas.- Los ácidos al ser disueltos en agua liberan sus hidrógenos en forma iónica (es decir liberan iones hidronio o hidrogeniones). Así, por ejemplo, para el ácido clorhídrico al ser colocado en agua tendríamos:



Las bases al ser colocadas en agua liberan sus grupos OH^- , es decir que liberan iones hidroxilo o iones hidróxido. Así por ejemplo, para el hidróxido de sodio al ser disuelto en agua tendríamos:



Enlace iónico o electrovalente.- Está formado por elementos que presentan una gran diferencia de electronegatividad y en donde cada átomo puede ganar o perder electrones, el elemento más electronegativo arranca el electrón del elemento menos electronegativo, ganando así átomos con carga eléctrica positiva o iones positivos llamados *cationes* y átomos con carga eléctrica negativa o iones negativos llamados *anión*. Este enlace es característico de los elementos cuyos compuestos existen por atracciones electroestáticas. Como ejemplo podemos citar:



Potencial hidrógeno.- El potencial hidrógeno (pH) nos va a indicar que tan ácido o básico es un compuesto, se basa en una escala numérica que parte desde el 0 hasta el 14 teniendo como punto medio el pH de 7, que se le va a denominar pH neutro, los valores por abajo de 7 van a pertenecer a los pH ácidos y los que están por arriba de 7 van a ser pH básicos.

Electroquímica.- Parte de la química que estudia la conversión de la energía eléctrica a química y viceversa. Existen sustancias que en estado sólido no conducen la corriente eléctrica pero al ser disueltas y al aplicarles un voltaje, si conducen electricidad, recibiendo el nombre de electrolito.

5.2 PROTECCIÓN NATURAL DEL CONCRETO

5.2.1 ALCALINIDAD

El concreto posee una característica de gran importancia para la construcción: protege natural y eficazmente el armado contra la corrosión que causa el medio ambiente, esto debido a un potencial hidrogeno (pH) fuertemente alcalino.

Cuando el acero se encuentra ahogado en concreto se protege de la corrosión gracias a dos características. Primera, el recubrimiento de concreto proporciona una barrera mecánica contra el movimiento de agua y de oxígeno hacia el acero. Esta barrera es más o menos eficaz dependiendo de la calidad del concreto, esto es, de su permeabilidad y del espesor del recubrimiento. Y segunda, la vulnerabilidad de la corrosión disminuye por la llamada pasividad del acero por el ambiente del concreto. Es decir, una película de óxido de hierro que se forma rápidamente sobre la superficie del acero en presencia de humedad, oxígeno y de los productos alcalinos solubles en agua de la hidratación del cemento. El principal producto soluble es hidróxido de calcio Ca(OH)_2 que es una solución saturada, de un pH aproximado de 12.4 (dependiendo de la temperatura), por lo que la alcalinidad inicial del concreto es de este orden. Por lo general, el cemento también contiene algunos óxidos de sodio (Na) y de potasio (K) que incrementan el pH, posiblemente hasta 13.2. La película pasivante evita reacciones adicionales, por lo que el acero de refuerzo se mantiene inalterado durante largos períodos, mientras el concreto sea de buena calidad, no esté fisurado y no cambien sus características físicas o químicas por agresiones externas.

Si bien el concreto no constituye una barrera perfecta debido a la red de poros que presenta y a la tendencia que tiene a formar grietas, la importancia de la barrera física que representa un recubrimiento de concreto se relaciona principalmente con su capacidad para preservar las condiciones de un pH alto, necesarias para mantener el estado inerte del refuerzo al limitar la velocidad de penetración de sustancias agresivas desde el exterior. En tal sentido, es necesario que el espesor de recubrimiento de concreto sobre el armado sea el adecuado para cada ambiente al que esté expuesta una estructura.

En regiones ácidas del concreto con un pH inferior a 4, el óxido ferroso se disuelve y permite el contacto del metal con el medio acuoso y la velocidad con que avanza la corrosión aumenta al disminuir el pH. Con un pH de 4 a 10, dicha velocidad es independiente del medio acuoso y sólo está influido, por el oxígeno en solución. Por arriba de pH 10 la velocidad disminuye, pues el hierro se pasiva.

5.2.2 PASIVACIÓN Y CAPAS PROTECTORAS

Como resultado de algunas reacciones de corrosión se generan ciertos productos como óxidos o hidróxidos. Estos productos pueden ser de dos tipos: solubles e insolubles. Los productos insolubles generalmente son películas muy delgadas de óxido, invisible al ojo, como es el caso del óxido de cromo Cr_2O_3 que se forma en los aceros inoxidable o las películas que se forman en el aluminio, dichas capas de óxido invisible protegen al concreto reforzado contra la corrosión atmosférica. Este fenómeno de protección es lo que se conoce como pasivación.

La pasivación de un metal se puede definir como la pérdida de reactividad electroquímica bajo ciertas condiciones ambientales. Este fenómeno se debe a una capa superficial muy delgada (de aproximadamente 30×10^{-8} cm) que actúa como una barrera contra la corrosión.

Sin embargo, a pesar de que la pasivación ha sido estudiada desde el siglo pasado, aún no se conoce mucho sobre dicha capa protectora. Hay quienes creen que es una capa muy delgada de óxido que proporciona blindaje al metal contra el electrolito, mientras otros creen que es una capa molecular de una sustancia tal como el oxígeno o ciertas especies iónicas contenidas en la solución. La principal causa de esta confusión es que dicha capa protectora es muy delgada y frágil, lo que impide su estudio en detalle.

5.3 FACTORES INHERENTES AL CONCRETO QUE INTERVIENEN EN LA CORROSIÓN

5.3.1 CONDUCTIVIDAD/RESISTIVIDAD

CONDUCTIVIDAD

El concreto es un material poco conductor de la electricidad, cuya conductibilidad disminuye a medida que su edad aumenta, como consecuencia de que el paso del tiempo va produciendo, por una parte, el secado del concreto, y por otra, la colmatación (llenado) de los poros de este material y consecuentemente, la reducción de las posibilidades del paso de humedad por el interior de su masa.

Sin embargo, la conductividad eléctrica del concreto aumenta notablemente cuando este material contiene determinados componentes (o iones) que actúan como electrolitos (es decir, como conductores). Entre estos iones cabe destacar en primer lugar los cloruros, aunque también presentan esta propiedad otros constituyentes del concreto, como son los sulfatos y nitratos.

El factor conductividad tiene, en relación con el riesgo de corrosión de los armados, una importancia superior que la de los otros factores (porosidad y alcalinidad

del concreto), porque la presencia en el concreto de una concentración apreciable de los iones citados, responsables a su vez del aumento de conductividad, es una de las causas más frecuentes de la corrosión de los armados del concreto.

La presencia en el concreto de estos iones tiene su origen en sus componentes (cemento, agregados, agua de mezclado y/o aditivos). O bien, en la contaminación exterior del concreto posterior a su fabricación.

Las normas e instrucciones que rigen el proyecto y la ejecución de obras de concreto reforzado y presforzado, fijan limitaciones para el contenido de estos iones en los componentes del concreto, aunque sería más adecuado fijar limitaciones al contenido total de dichos iones en el concreto, en lugar de establecerlo en los componentes por separado.

RESISTIVIDAD

La resistividad, también llamada resistencia específica es la resistencia eléctrica de un material homogéneo e isótropo de sección recta, con área de longitud unitaria.

El concreto húmedo se comporta como un semiconductor con resistividad del orden de $10^2 \Omega\text{m}$, mientras que, una vez seco en una estufa, puede considerarse con resistencia del orden de $10^9 \Omega\text{m}$.

Se puede establecer que la corriente eléctrica en el concreto se mueve siguiendo un proceso eléctrico con resistividad tanto menor cuanto mejor sea el electrolito. Por lo tanto, a un aumento de la relación agua/cemento, de la humedad relativa del ambiente y de la eventual presencia de iones tales como, Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ , etc; corresponderá una disminución de la resistividad del concreto.

La resistividad del hierro es del orden de $1.2 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$, mientras que la del agua puede ser $0.2 \Omega\text{m}$, y del concreto de buena calidad en equilibrio con ambientes secos del orden de 10^4 a $10^5 \Omega\text{m}$. La resistividad de un líquido es inversamente proporcional a la proporción de sales disueltas (electrolitos), mientras que la de materiales porosos es inversamente proporcional a la humedad salina absorbida.

Contenidos en cloruros de apenas 0.6% Cl^- son suficientes para reducir la resistividad de un mortero en casi unas 15 veces. Parecen ser peores diferentes concentraciones de cloruros en una misma masa, puesto que pueden generar diferencias de potencial significativas y promover la corrosión.

5.3.2 PERMEABILIDAD

5.3.2.1 PERMEABILIDAD AL AGUA

La permeabilidad del recubrimiento del concreto, cuando se ha preparado con agregados densos, vertido correctamente y compactado de forma que quede prácticamente exento de aire ocluido, queda fuertemente determinada por la permeabilidad de la pasta de cemento; excepto cuando existen fisuras o juntas permeables de construcción. La permeabilidad de la pasta de cemento, depende a su vez de la relación agua/cemento y de su grado de hidratación. La permeabilidad de una pasta con un día de edad puede ser 10,000 veces mayor que la permeabilidad de la misma pasta a los 7 días de edad y casi 1,000,000 de veces superior que a los 28 días. Con 28 días un cemento portland corriente puede que tenga tan sólo un 70% de fracción hidratada.

Realizando una comparación entre la permeabilidad de los agregados (rocas) y la pasta de cemento portland (ver tabla 5.1), se advierte que, las pastas pueden ser más impermeables que algunos tipos de agregados (rocas) empleados en la

preparación de los concretos. De lo cual podemos deducir que los concretos tendrán una mayor permeabilidad que la pasta pura y completamente curada, pero generalmente menor que la permeabilidad de los agregados que se usan en su preparación. Esta mayor impermeabilidad de la pasta puede deberse al efecto del taponamiento del gel de cemento y de la menor dimensión de los capilares a pesar de que estos sean en mayor número que los presentes en las rocas.

TABLA 5.1
TABLA DE PERMEABILIDADES

Agregado (Naturaleza de la roca matriz)	Coefficiente de permeabilidad (K) En $\text{cm/s} \times 10^{-12}$	Relación agua/cemento ⁶ en kg/kg (peso) de pasta de cemento Portland altamente hidratadas de permeabilidad equivalente
Basalto	2.57	0.38
Cuarzo	8.56	0.42
Mármol denso	24.90	0.48
Granito	5,570.00	0.70
Arenisca	12,800.00	0.71

Los concretos pueden clasificarse, según su permeabilidad al agua en buenos, normales y deficientes, cuando tengan un coeficiente de permeabilidad K, medido a una edad especificada previamente, de 10^{-10} cm/s, 10^{-8} cm/s y 10^{-6} cm/s, respectivamente.

La incorporación de aire está orientada a disminuir la permeabilidad, ya que el proceso de evaporación del agua en exceso culmina en las burbujas de aire, evitando la formación de canales en contacto con el medio exterior.

⁶ Debe considerarse a una relación agua/cemento de 0.40 a 0.50 como eficiente dentro de un concreto reforzado óptimo.

5.3.2.2 PERMEABILIDAD A LOS GASES

La permeabilidad de los concretos a los gases es baja. En iguales gradientes de presión, el oxígeno debe penetrar a través del concreto más rápidamente que el bióxido de carbono (CO_2), vapor de agua o agua, debido a sus características moleculares, pero difícilmente los gradientes de presión son elevados. La presión parcial de los gases agresivos en el aire es muy baja, por ejemplo, para el CO_2 es del orden de 10^{-4} MPa (aproximadamente 0.1 kg/cm^2), ya que depende de su concentración en el aire, que también es baja frente al oxígeno y al nitrógeno.

El bióxido de carbono (CO_2) parece que no entra en el concreto más allá de la zona carbonatada. La permeabilidad del concreto al CO_2 disminuye con la carbonatación del material, que tiende a llenar los poros y capilares.

La permeabilidad a los gases aumenta con concretos en ambientes secos, pues además de la formación superficial de microfisuras de contracción, la humedad y el agua presente en los poros disminuye la permeabilidad a los gases. De ahí que se observen mayores profundidades de carbonatación en ambientes secos ($\text{H.R.} \leq 80\%$).

Considerando la porosidad como una propiedad intrínseca del material, la permeabilidad al aire debiera ser equivalente a la obtenida con agua. En realidad, esta igualdad no ocurre nunca puesto que tanto los gases como el agua se interfieren en sus acciones con el concreto, modificando su permeabilidad a un tiempo.

La permeabilidad, tanto al agua como a los gases, depende de la mayor o menor intercomunicación de los poros capilares y no solamente de la porosidad del volumen de huecos totales del concreto.

La permeabilidad al agua y a los gases del concreto compacto y con baja relación agua/cemento puede ser inferior a la permeabilidad de la roca densa (ver tabla 5.2), debido a las pequeñas dimensiones de los capilares y a la acción de taponamiento del gel de cemento.

TABLA 5.2
RESULTADOS DE LA PERMEABILIDAD AL AIRE DE ALGUNOS
MATERIALES OBTENIDOS CON PRESIONES DE SUCCIÓN DE
APROXIMADAMENTE 0.1 MPa (1.02 Kg/cm²)

Basalto	10^{-8} a 10^{-6} cm/s
Granito	10^{-7} a 10^{-5} cm/s
Concreto	10^{-8} a 10^{-5} cm/s

5.3.3 POROSIDAD DEL CONCRETO

Como ya se mencionó, el concreto es un material poroso por naturaleza (ver fig. 5.2). Estos poros se originan en la naturaleza de la propia red cementante:

- En primera, como mecanismo del proceso de hidratación del cemento Portland. Los poros formados por esta causa son conocidos como poros de gel.
- En segunda, por la necesidad de adicionar agua excediendo de la que químicamente sería necesaria para completar la reacción entre el cemento y el agua, esto con el fin de obtener la necesaria consistencia del concreto en estado fresco, dando lugar a la formación de microporos.
- Como tercer causa, en la inadecuada colocación o compactación del material (ver fig. 5.3). Los poros producto de esta causa son conocidos como macroporos, por tener diámetros mucho mayores que los producidos por la primera. Dichos poros son producto de malos procesos constructivos y de una deficiente supervisión por parte del ingeniero.

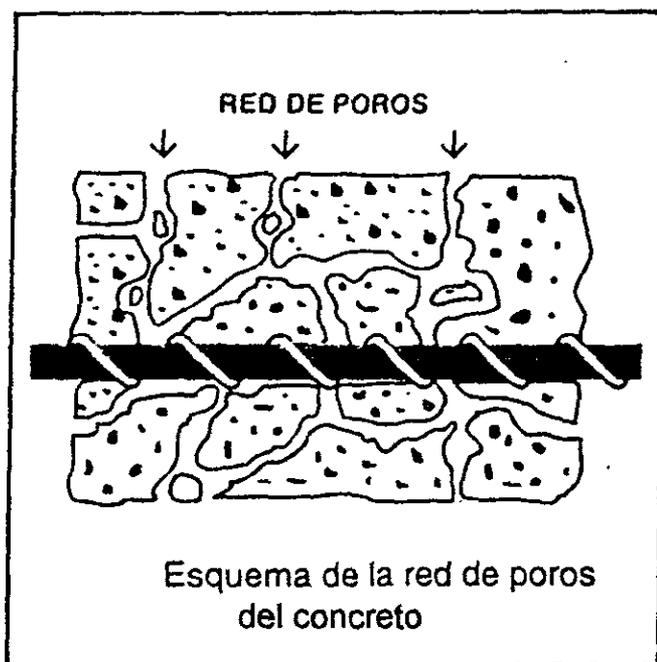
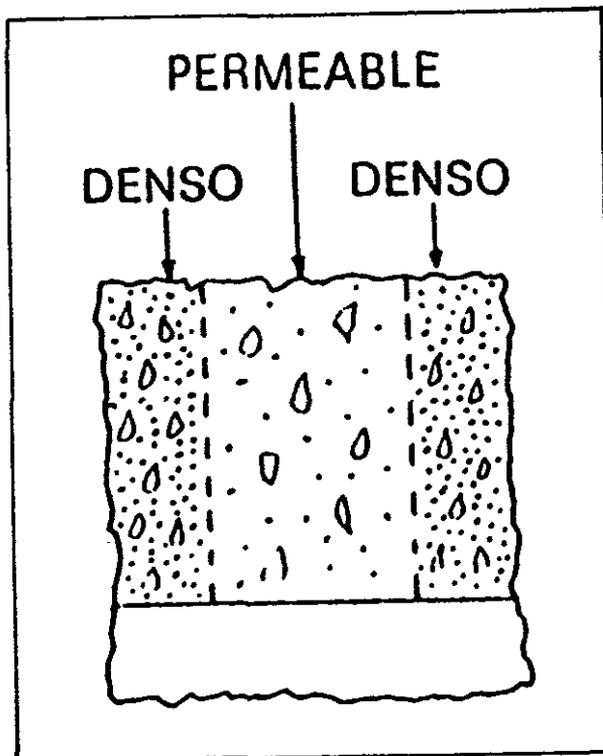


FIG. 5.2



COMPACIDAD VARIABLE DEL
CONCRETO REFORZADO

FIG. 5.3

Los macroporos pueden ser de algunos milímetros, por lo cual escapan a cualquier consideración en cuanto a los cálculos de permeabilidad puesto que permiten el paso directo de los agentes agresivos al interior de la masas de concreto. Los poros de gel tienen diámetros tan pequeños que no permiten en términos generales, el paso de líquidos. Por estas razones, nos ocuparemos específicamente de los microporos cuyo tamaño varía desde pocos nanómetros y en raras ocasiones alcanzan milímetros.

El volumen total de microporos en una pasta de cemento portland es función de la relación agua/cemento y del grado de hidratación que se haya alcanzado, así mismo, la permeabilidad es función del volumen de poros total y de la distribución de tamaños que este volumen de poros tenga. De lo anterior, se puede concluir que, el volumen de poros es proporcional a la permeabilidad, y ésta a su vez nos determina la velocidad de penetración de los cloruros, estableciéndose así la necesidad de cumplir con las buenas practicas constructivas en lo que respecta al curado.

En general, podemos decir que el volumen de poros en la pasta obedece a la siguiente ecuación:

$$\text{Poros (\%)} = (100 \times (a/c)) - (36.15 \times H)$$

donde:

a/c es la relación agua/cemento

H es el grado de hidratación del cemento, cuyos valores van de 1 que representan a un cemento completamente hidratado y solo posible en teoría, hasta 0 que representa al cemento sin ningún contacto con agua.

Para cementos en condiciones ambientales iguales, y con idénticas composiciones y finuras, el grado de hidratación dependerá del tiempo en el cual se haya mantenido en condiciones de curado húmedo.

Sin ser muy común también pueden plantearse problemas derivados del empleo de agregados con contenidos ferruginosos, en la mayoría de los casos resultantes de rocas en alteración. Ciertos agregados contienen piritas⁷, geotita⁸, marcasita, pirrotita y concreciones ferruginosas, que pueden provocar compuestos expansivos y solubles al oxidarse. Ello conlleva a la formación de huecos en el concreto que contribuyen al aumento de la porosidad, y con esto, al aumento de la permeabilidad y a reducir la protección física de la cubierta.

De modo general, todos los elementos que al incorporarse al concreto contribuyen al aumento de su porosidad, podrán considerarse agresivos al armado; entre ellos se puede citar:

- Elevado contenido de materia orgánica en los agregados.
- Alto contenido de fracciones pulverulentas.
- Proporción elevada de grumos arcillosos, materias carbonosas, sulfuros y azufre eventualmente presentes en exceso en las adiciones de escoria.

RELACIÓN a/c, AGUA Y MANEJABILIDAD

Ya se ha mencionado como afecta la relación agua/cemento al volumen de poros, y por ende a la permeabilidad del concreto lo cual repercute en su durabilidad. De hecho, las normas estipulan las máximas relaciones agua/cemento tolerables según diversas condiciones de exposición a ambientes potencialmente agresivos. Sin

⁷ Sulfato de hierro (FeS_2) hallado en granitos, gneis, rocas sedimentarias y algunas arenas.

⁸ Óxido de hierro hidratado hallado en concreciones lateríticas.

embargo, la aplicación estricta de estas relaciones producen un material que, aún cuando potencialmente adecuado a los efectos de durabilidad, contará con muy poca manejabilidad, haciendo factible la aparición de defectos de compactación (macroporos) que facilitan el ingreso de cloruros y otros agentes agresivos, afectando negativamente la durabilidad.

El conflicto entre los requerimientos del concreto en su estado plástico y su estado endurecido, ha sido solventado mediante el empleo de aditivos y diseños de mezclas especiales, que permiten obtener un material que cubra de manera simultánea los requerimientos de baja relación agua/cemento y adecuada manejabilidad, obteniéndose un concreto de elevada confiabilidad en cuanto a la reproducibilidad de características entre los especímenes de laboratorio y el concreto fabricado en obra; siempre y cuando se cumplan los requerimientos de curado.

5.4 FACTORES EXTERNOS QUE INTERVIENEN EN LA CORROSIÓN

5.4.1 FACTORES CLIMÁTICOS

El medio ambiente en el cual se inserta la estructura y que en última instancia, es el agente promotor de la eventual corrosión, también debe ser considerado. Es de esperar que regiones con atmósfera seca y pura no sean tan agresivas a la estructura como lo son las atmósferas húmedas y muy contaminadas por gases ácidos y smog.

Una vez iniciada la corrosión del acero, la velocidad del deterioro de la estructura es significativa y puede alcanzar valores riesgosos si hay un suministro suficiente de oxígeno y la humedad es superior a una valor mínimo de aproximadamente 50% de humedad relativa.

5.4.1.1 INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE

Entre los principales tipos de medio ambiente característicos según la atmósfera donde se haya una estructura de concreto se pueden citar:

a) *Atmósfera rural* (atmosfera pura): Región al aire libre a gran distancia de las fuentes contaminantes del aire. Se caracterizan por su baja proporción de contaminantes. Tienen una débil acción agresiva sobre los armados envueltos por concreto, siendo bastante lento el proceso de reducción de la protección química que proporciona la cubierta de concreto por efecto de su alta alcalinidad. No existen gases ácidos en cantidades suficientes para penetrar a través de las superficies expuestas y, por consiguiente, acelerar el proceso de carbonatación que resulta más lento que el que se observa en otras regiones.

Normalmente tienen bajos contenidos de partículas en suspensión, del orden de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La lluvia en estas regiones tiene un pH natural del orden de 6.5.

b) *Atmósfera urbana*: Región al aire libre, pero dentro de centros de población mayores. Estas atmósferas de ciudades contiene normalmente impurezas bajo la forma de óxidos de azufre (SO_2), hollín ácido y otros agresivos tales como bióxido de carbono (CO_2).

Los contenidos de SO_2 varían de cerca de 0.01 a un máximo aproximado de 1.0 puntos por millon (p.p.m.) y proceden de la quema de combustibles que contienen azufre, por ejemplo aceites combustibles. Las cantidades de CO_2 por su parte pueden ser de 300 p.p.m. a 600 p.p.m.

Los iones sulfato (SO_4^-) resultan, básicamente de la oxidación del SO_2 principalmente en presencia de amoníaco (NH_3 en forma gaseosa), y forma una sal, el

sulfato amónico $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, sólido que se mantiene en suspensión, pudiendo depositarse por impacto en las superficies de las estructuras. En las superficies de concreto, las citadas sales pueden dar origen a H_2SO_4 (ácido sulfúrico) y promover la despasivación del acero.

Las partículas en suspensión pueden ser del orden de 50 a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y siendo ácidas (hollín) no tan sólo contribuye a la corrosión directa, sino también a una mayor retención de agua en las superficies de las estructuras a las cuales se adhieren por impacto. El agua de lluvia, en este caso, al transportar materias en suspensión, puede tener hasta un pH menor de 4.

c) *Atmósfera marina*: Se da en zonas al aire libre sobre el mar, o cerca de la costa. La atmósfera marina contiene cloruros de sodio y de magnesio, ya sea en forma de cristales o en forma de gotas de agua salada; también pueden contener sulfatos.

Los elementos mostrados en la tabla 5.3 son extremadamente agresivos y contribuyen a la aceleración del proceso de corrosión de los armados, aún cuando se den en proporciones pequeñas. Se puede decir que la velocidad de corrosión en atmósferas marinas puede ser del orden de 30 a 40 veces superior a la que se da en atmósferas puras.

TABLA 5.3
CONTENIDOS MEDIOS DE SUSTANCIAS
AGRESIVAS EN EL OCÉANO ATLÁNTICO

iones sulfato (SO_4^-)	2,800 mg/l
iones cloruro (Cl^-)	20,000 mg/l
iones magnesio (Mg^{++})	1,400 mg/l

d) *Atmósfera industrial*: Los gases ácidos contribuyen a reducir la alcalinidad del concreto y aumentan la velocidad de carbonatación destruyendo la película pasivante del acero. Las atmósferas industriales pueden acelerar de 60 a 80 veces más el proceso de corrosión que cuando se comparan con atmósferas puras en situaciones equivalentes.

La acción dañina de estas atmósferas debe considerarse siempre conjuntamente con la humedad relativa de la región puesto que si ella no se alcanzara no habría riesgo de corrosión acentuada. Esta humedad crítica para el acero a 25 °C es aproximadamente de 65 a 85%.

5.4.1.2 EFECTOS DE LA TEMPERATURA

Cerrando el ciclo de factores climáticos, también debe considerarse la acción de la temperatura. El efecto más sobresaliente de la temperatura se relaciona con la posibilidad de condensación del agua en las superficies expuestas, aparte de que un aumento de temperatura actúa como un catalizador o acelerador de cualquier proceso químico, aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones

Finalmente, las variaciones de temperatura pueden afectar al contenido de humedad. Para una cantidad dada de vapor de agua en el aire, una disminución brusca de temperatura puede acarrear la condensación, o por lo menos, aumentar la humedad relativa, pudiendo entonces sobrepasar la humedad crítica.

5.4.1.3 EFECTOS DE LA HUMEDAD

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire es variable, pero para una temperatura dada se tiene un valor máximo de vapor de agua que un volumen de aire dado puede contener. Dicho

valor máximo, llamado saturación, varía con la temperatura, siendo mayor cuando ésta aumenta. La relación entre el valor real del contenido de vapor de agua en la atmósfera y el valor de la saturación para una temperatura dada se denomina "humedad relativa" (H.R.).

La humedad es uno de los factores más importantes que afectan la velocidad de la corrosión atmosférica (ver tabla 5.4). Con todo la simple presencia de agua en el aire no es causa de corrosión y un aire puro, saturado de vapor de agua, tan sólo determina una corrosión muy ligera en materiales tales como el hierro y el cobre.

Por el contrario cuando se introduce en el aire algún agente agresivo, la velocidad de corrosión aumenta considerablemente al alcanzar su humedad crítica; definiéndose como humedad crítica, la humedad relativa por encima de la cual el metal empieza a corroerse de forma apreciable. Dicho valor depende, además, de la presencia de contaminantes.

TABLA 5.4
TIPO DE AIRE SEGÚN SU HUMEDAD RELATIVA

A) Aire seco	H.R. hasta 30%
B) Aire normal	H.R. entre 50 y 60%
C) Aire húmedo	H.R. entre 80 y 90%
D) Aire saturado	H.R. de 100%

El contenido de humedad, es el factor que más influye en la velocidad de corrosión, una vez que el proceso se ha iniciado.

En la figura 5.4 se observa gráficamente el estado de los poros de concreto en función de la humedad ambiental:

Cuando los poros del concreto están saturados de humedad (caso C de la fig. 5.4), si bien la conductividad es alta; lo que facilitaría el proceso de corrosión, el oxígeno que interviene en la reacción catódica debería disolverse en el agua para poder difundir y alcanzar el armado. En este caso, el proceso está controlado por el acceso de oxígeno a la superficie, por lo que la velocidad de corrosión en esta situación será moderada o baja. Un ejemplo lo constituyen las estructuras armadas sumergidas, situadas en agua a una cierta profundidad, donde la corrosión no puede progresar.

Cuando los poros contienen muy poca humedad (caso A de la fig.5.4), la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión se ve dificultado. Por lo tanto, la velocidad de corrosión será baja aunque el concreto se encuentre carbonatado y/o contaminado con cloruro.

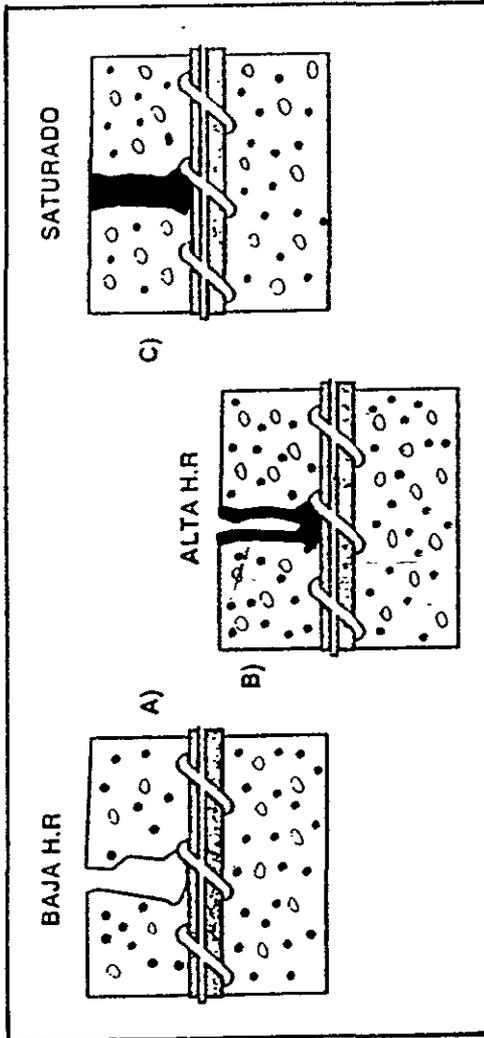
Los concretos con alto contenido de humedad (caso B de la fig. 5.4), pero con los poros sin saturar, proveen las condiciones para que se desarrolle la máxima velocidad de corrosión de los armados: el oxígeno llega fácilmente a la superficie metálica y la resistividad es suficientemente baja. Estos factores permiten velocidades de corrosión elevadas siempre y cuando estén presentes los contaminantes que inician el proceso (iones cloruro, acidificantes del concreto).

5.4.2 CARBONATACIÓN

La protección del acero se reduce o incluso se vuelve ineficaz cuando se destruye el ambiente alcalino del concreto. Esto puede deberse a la lixiviación⁹ del material alcalino con agua o a la neutralización parcial¹⁰ del mismo por reacciones químicas entre los productos de hidratación del cemento y el bióxido de carbono (CO₂) que penetra desde la atmósfera. En forma estricta, para que esto suceda tanto el CO₂

⁹ Separar por medio del agua u otro disolvente una sustancia soluble de una insoluble.

¹⁰ Específicamente la reducción del pH a un valor inferior a 8.



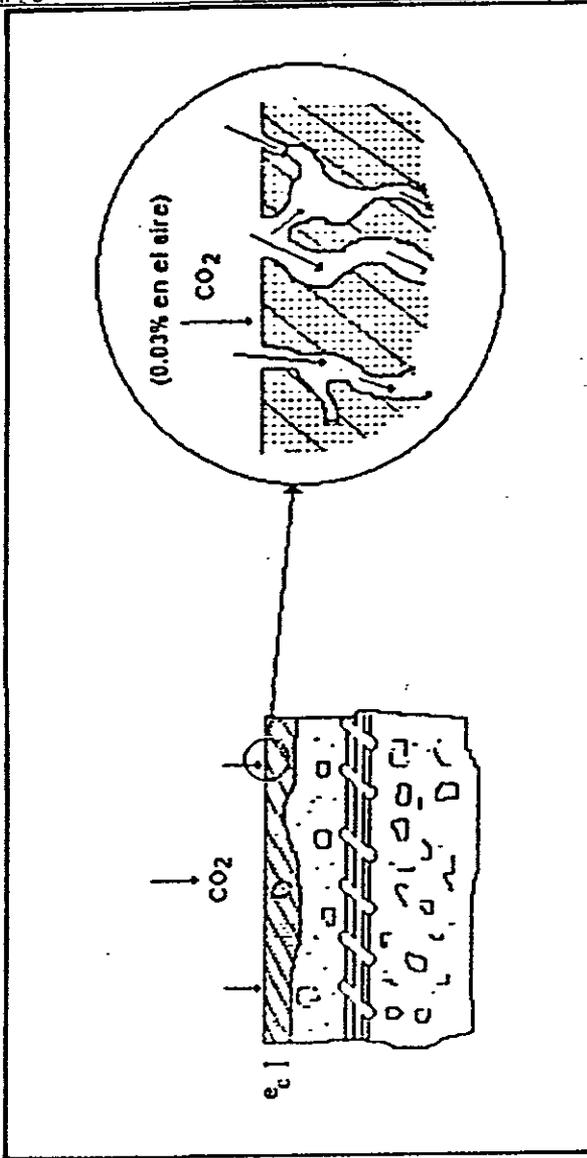
CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS POROS
DE CONCRETO EN FUNCIÓN DE LA
HUMEDAD AMBIENTAL
FIG. 5.4

como la humedad son necesarios, ya que el CO_2 gaseoso no reacciona directamente con el cemento hidratado.

La concentración típica del bióxido de carbono en la atmósfera es del orden de 0.02% a 0.03% y debido a sus características ácidas, el CO_2 reacciona con el concreto húmedo gracias a la naturaleza alcalina de éste (ver fig. 5.5). Éste proceso se conoce como carbonatación y el evitarlo es una de las funciones principales del recubrimiento del concreto. En concretos de buena calidad la velocidad de carbonatación es baja, además, los productos de la carbonatación obstruyen algunos de los poros del concreto impidiendo así la entrada de más CO_2 y humedad adicionales; por esta razón, el proceso de carbonatación se hace más lento hasta alcanzar finalmente una velocidad insignificante, sin embargo, cuando por cualquier motivo se produce una grieta en el concreto, el proceso de carbonatación comienza de nuevo desde la superficie de la grieta y puede llegar a un punto cercano al acero. En ese instante se reduce la alcalinidad del concreto y se pierde la pasividad, en consecuencia, comienza la corrosión (ver fig. 5.6).

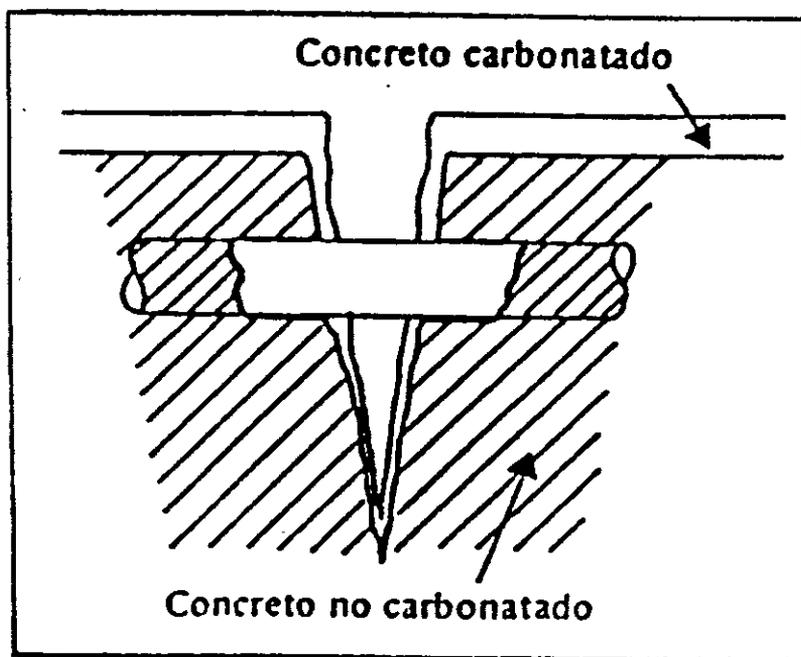
En muchas estructuras hay algunas grietas presentes. Cuando las grietas son angostas, el proceso de carbonatación es lento, lo que permite que alcance al acero sólo en edades posteriores; sin embargo, una vez que esto ha ocurrido, la velocidad de corrosión es casi independiente del ancho de la grieta, ya que la difusión del oxígeno al acero no se ve afectada por el ancho de grieta.

El proceso de carbonatación se lleva a cabo de la siguiente manera: el aire que está en contacto con la superficie de concreto penetra por los poros capilares y con ello el CO_2 que contiene. Éste reacciona rápidamente con los hidróxidos en la solución de poro.



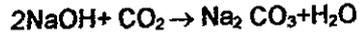
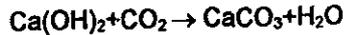
CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO

FIG. 5.5



CARBONATACIÓN EN UNA GRIETA ABIERTA

FIG. 5.6



En ese instante, al reaccionar el hidróxido de calcio¹¹ Ca(OH)_2 , se reduce la alcalinidad en el concreto y se pierde la pasividad, en consecuencia comienza la corrosión.

El aire contenido entonces en los poros ya no contiene CO_2 , creándose de esta manera una diferencia de concentración de CO_2 entre el aire del exterior y el del interior. Esta diferencia produce la difusión del CO_2 atmosférico hacia el interior de los poros.

Los productos precipitados durante la reacción del CO_2 con los hidróxidos disminuye la permeabilidad del concreto, pero también reduce el pH de la solución de poro. Si la carbonatación continúa, entonces la fase sólida de la pasta de cemento también reacciona con el CO_2 , desligando los cloruros de los cloroaluminatos e incrementándose de esta manera el peligro de corrosión.

La principal consecuencia de la carbonatación es una caída abrupta del pH de la solución del poro y por lo tanto aparece un frente de carbonatación, separando dos zonas: una hacia la superficie, con un pH menor de 8 y otra hacia el interior del concreto, con un pH superior a 12.

Estas zonas se pueden distinguir fácilmente por medio de un indicador de pH, como la fenolftaleína¹², lo cual nos ayuda a identificar que tan avanzado se encuentra

¹¹ Solución saturada, de un pH alto que proporciona un ambiente alcalino en el concreto.

¹² Elemento formado por la condensación del fenol con un anhídrido. Tiene propiedades pigmentantes y se usa también como reactivo.

el proceso de carbonatación en el concreto. En la actualidad prosiguen las investigaciones para obtener otros métodos de medición que comparen su eficiencia.

Cuando el frente de carbonatación llega al refuerzo, la capa pasivante se vuelve inestable, rompiéndose la protección que le confería al acero, iniciándose el proceso de corrosión. Este último, en este caso, es generalizado y homogéneo, tal como si el refuerzo estuviera expuesto a la atmósfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del concreto y, por lo tanto, en contacto con el acero durante más tiempo. Dicha circunstancia produce, a largo plazo, una reducción en la sección transversal de la barra y una cantidad significativa de óxidos y productos de corrosión, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión en el concreto que agrieten el recubrimiento, o bien pueden difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto y producir manchas en el acabado¹³. Cuando la carbonatación se produce en un concreto que contiene cloruros, los efectos dañinos de la primera se suman a los efectos nocivos de los segundos y generan una corrosión severa.

Para modelar el fenómeno de carbonatación se han desarrollado varias fórmulas matemáticas. La más común, afirma que este fenómeno sigue una tendencia parabólica, donde la profundidad de carbonatación (x), es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición (t):

$$x = k\sqrt{t}$$

El valor de k depende de diversas variables como el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la proporción del cemento y las características del medio ambiente. De esta manera, a mayor humedad en los poros, el CO_2 penetra con más facilidad que si tuviera agua (concreto saturado). Experimentalmente se comprobó que la

¹³ Ver capítulo 5, subcapítulo 5.6.

carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa se encuentra entre el 50 y el 70%.

Aunque el proceso de carbonatación en el concreto es muy lento, hay dos factores que pueden reducir la vida esperada de las estructuras: una delgada capa de recubrimiento de concreto y la existencia de grietas. Si se proporciona un recubrimiento adecuado al refuerzo, la carbonatación no penetra tanto como para dañar la pasividad del acero durante la vida útil de la estructura.

Este fenómeno de carbonatación es más intenso en zonas industriales, donde por efecto de las emanaciones producidas por los procesos industriales, vehículos, etc., la concentración de CO_2 en la atmósfera es más elevada. Ésto se identifica visualmente en el concreto afectado por la presencia de depósitos de sales de color blancuzco, generalmente situados al lado de una grieta o fisura, donde se ha evaporado el agua que ha transportado la solución.

La carbonatación en el concreto puede tener lugar:

- Naturalmente, en el aire (es el caso más general)
- Artificialmente, en una atmósfera de gases calientes que contengan una gran proporción de CO_2 a la presión ordinaria o bajo presiones elevadas.

La velocidad de carbonatación depende no solamente del tiempo, sino también de un gran número de parámetros, entre los cuales citaremos:

- La composición del material (naturaleza y finura del conglomerante, relaciones agua/cemento bajas, granulometría de los agregados, compacidad, etc.)
- La dimensión de las piezas (relación superficie-volumen)

- El estado de hidratación y la proporción de agua en el material en el momento de la carbonatación.
- De las condiciones de operación (humedad relativa, proporción de CO_2 , temperatura, presión).
- Espesor y calidad del recubrimiento.

La velocidad del avance disminuye si se tiene en cuenta que la carbonatación puede aumentar la impermeabilidad de los aglomerantes con mucha cal, a causa del aumento del volumen absoluto del material; esto es:

Ca(OH)_2 , que se transforma a CO_3Ca

Que ocupa un mayor volumen saturando los vacíos. En el concreto ligero dicha penetración es rápida debido al gran número de poros.

La carbonatación cambia la estructura del concreto y modifica algunas de sus propiedades como son, resistencia mecánica, resistencia a los agentes agresivos, dureza superficial, porosidad, estabilidad, retracción, coloración de la superficie; además que ésta aumenta la contracción del concreto al secarse y por consiguiente, la propensión del concreto a agrietarse.

5.4.3 CLORUROS

La situación más agresiva y común que puede desencadenar la corrosión localizada en el acero de refuerzo en el concreto es la presencia de cloruros. Sin embargo, en la práctica es imposible obtener una mezcla absolutamente libre de cloruros, ya que estos son algunos de los materiales más abundantes sobre la tierra y están presentes en cantidades variables en todos los ingredientes del concreto. Tampoco es conveniente evitar únicamente el cloruro de calcio, debido a que otros

cloruros pueden tener una reacción semejante. Cabe mencionar, que también existen otros iones despasivantes quizá menos frecuentes pero, también importantes tales como los sulfuros y los sulfatos que pueden llegar a ser peligrosos en cantidades elevadas.

Los cloruros presentes en el concreto tienen dos vías posibles de acceso:

1. Por los materiales componentes del concreto (agregados, aditivos, etc.)

El daño potencial que los cloruros pueden ocasionar en estructuras que se encuentran en un ambiente marino, o en otro lugar donde estén expuestas a la acción de sales solubles, sugiere la recomendación de no permitir la presencia de cloruros en la mezcla de concreto. Esto elimina al agua de mar como agua de mezclado, así como la posibilidad de usar agregados que hayan sido mojados con agua que contenga sales con algún contenido de cloruro, sin embargo en muchas partes del mundo, por ejemplo el cercano oriente, es difícil disponer de agregados libres de sales y agua potable para la fabricación del concreto, por lo que la incorporación de cloruros es inevitable. En México, por ejemplo, se han encontrado en análisis químicos de elementos de concreto que presentan corrosión, la presencia de iones de cloruro, los cuales han sido introducidos accidentalmente a través de la contaminación del agregado en los estados del Golfo.

El porcentaje de cloruros puede ser controlado limitando la contaminación de los materiales constituyentes del concreto. Los cloruros contaminantes de los materiales que participan en los procesos de corrosión son aquellos que, en contacto con el agua de mezclado se solubilizan convirtiéndose en iones. Los contenidos en los agregados que pueden participar en el proceso de corrosión, se eliminan hasta valores aceptables mediante el lavado con agua libre de cloruros. Algunos agregados portadores de

cloruros tienen un contenido total de cloruros muy alto, pero sólo una pequeña parte de ellos es soluble.

Finalmente, los cloruros se pueden incorporar al concreto, sin querer, a través de tratamientos superficiales de limpieza con ácido muriático, que no es más que una formulación comercial de ácido clorhídrico. Este hecho es bastante común, puesto que la mayor parte de las recomendaciones de los fabricantes de pavimentos aconsejan la limpieza con ácidos. Siempre que halla riesgo de impregnación de esta solución en la estructura de concreto (y casi siempre lo hay) debe estudiarse otra forma de limpieza.

Es usual en la mayoría de los casos, por absoluto desconocimiento de los ingenieros implicados, la incorporación de elementos agresivos durante la preparación del concreto. La gran mayoría de los aditivos acelerantes del fraguado y reductores de agua tienen cloruro cálcico (Cl_2Ca) en su composición. Esta sal se disuelve, liberando aniones Cl^- , que pueden destruir la película pasivadora proporcionada por el medio alcalino y acelerar permanentemente la corrosión. Por ejemplo, en muchos países se ha prohibido el uso de Cl_2Ca como acelerante de fraguado por su elevada agresividad en la corrosión del acero de refuerzo.

2). *Por acción de la atmósfera, aguas y suelos contaminados en contacto con el concreto endurecido.*

El ingreso de los iones cloruro en el concreto endurecido se produce por distintos mecanismos de transporte, siendo el fenómeno de difusión uno de los más relevantes. En este proceso, los cloruros se difunden a través de los poros capilares del concreto húmedo o sumergido, con movimientos aleatorios propios en el sentido de las concentraciones decrecientes. En este último caso, las fuentes de iones cloruro más habituales son el agua de mar o la atmósfera marina, algunos procesos industriales y terrenos muy salinos.

Con base en ciertas hipótesis simplificadoras, es posible modelar el fenómeno de difusión en el concreto mediante la segunda Ley de Difusión de Fick para la condición de flujo unidireccional, habiéndose demostrado que la profundidad a la cual penetran los cloruros es función de la porosidad y el tiempo según la siguiente ecuación de tipo general:

$$\text{Profundidad} = A (K \times T)^n$$

donde:

- K* Es el coeficiente de permeabilidad del concreto, el cual a su vez es función del grado de porosidad del material, y por ende, de su relación agua/cemento, así como de la calidad de su colocación, compactación y curado.
- A* y *n* Son constantes, encontrándose en general que los valores para ambas oscilan en el entorno de 4 y 0.5 respectivamente.
- T* Es el tiempo de exposición al que ha estado sometido el concreto

La penetración de cloruros ocurre, por lo general, a través de la combinación de varios mecanismos, por lo que es importante que los modelos para simular los ataques por cloruros tengan en cuenta todos estos factores. Por ejemplo, además de un mecanismo de difusión, que es relativamente lento, los cloruros pueden penetrar más rápidamente por fuerzas capilares¹⁴. Por medio de este proceso, el agua salada puede penetrar con gran rapidez y provocar daños severos al producirse la corrosión en poco tiempo. El mecanismo anterior es muy propio de ambientes de brisa marina existente en climas cálidos marítimos, como el que existe en las regiones costeras de nuestro país, ya que los cloruros se encuentran suspendidos en la niebla salina. En este fenómeno influye mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

¹⁴ Succión capilar del agua salada en el concreto más o menos seco a través de la red de poros.

Concentración inicial de cloruros iniciadores de la corrosión.

Se cree que existe una concentración inicial del ion de cloruro que debe excederse para que ocurra la corrosión (nivel iniciador de la corrosión), pero no hay acuerdo, ni siquiera aproximado, sobre la magnitud de este valor. Los límites permisibles en el contenido de cloruros en el concreto varían de un país a otro¹⁵, debido a la dificultad para establecer un valor por debajo del cual no exista riesgo de despasivación del acero.

Existen dos razones al menos para esta incertidumbre. En primer lugar, la cantidad de iones de cloruro que puede tolerarse aumentan al incrementarse la alcalinidad del ambiente de la pasta de cemento. En segundo, de todos los cloruros, sólo los solubles son relevantes dentro del proceso de corrosión.

Inicialmente, el contenido de cloruros en el concreto en relación con el contenido de cemento en peso puede situarse en una de las tres siguientes categorías:

- Hasta 0.4% bajo contenidos de cloruros
- De 0.4% hasta 1% mediano contenidos de cloruros
- Más de 1% elevado contenido de cloruros

Algunos investigadores (3) han determinado que el valor límite para que el contenido de cloruros en un concreto pueda ocasionar corrosión en el acero ahogado, puede ser tan bajo como un 0.15% por peso de cemento. Sin embargo, esta forma de enfrentarse al problema no es práctica, ya que no considera si el cloruro estará presente físicamente, ni toma en cuenta la presencia o ausencia de oxígeno y humedad que son los otros dos elementos necesarios para que se produzca corrosión.

¹⁵ Ver capítulo 6, subcapítulo 6.4.

La disponibilidad de oxígeno y humedad adyacente al acero varía para diferentes estructuras de acuerdo a sus condiciones de exposición, así como también, será diferente para las diversas partes de una misma estructura, para las diferentes calidades de concreto y los distintos espesores de recubrimiento para el acero. Además, antes de discutir los límites que se puedan fijar a los cloruros, se deben considerar la forma en que se presentan.

El cloruro contenido en el concreto puede ser soluble en agua o puede estar combinado químicamente con otros ingredientes. Los cloruros solubles pueden producir corrosión, mientras que se cree que los combinados tienen poco efecto. La razón por la que algunos cloruros no están presentes en forma soluble, es que reaccionan con algunos de los productos de la hidratación del cemento y entonces se vuelven fijos. Tal es el caso de algunos aditivos donde un gran porcentaje del cloruro de calcio se combina químicamente con el cemento y por lo tanto, no estará disponible para causar corrosión. Por lo tanto, según algunos estudios es lógico que al considerar la probabilidad que ocurra corrosión, se toma en cuenta únicamente la cantidad de cloruros solubles existentes en un concreto, en lugar de medir la cantidad total de cloruros.

Uno de los principales compuestos que reaccionan con los cloruros es el aluminato tricalcico (C_3A ó $3Ca.Al_2O_3$). Se ha informado que tanto como el 75 al 90% del cloruro presente puede existir en forma fija, pero obviamente, el contenido de C_3A del cemento es un factor importante en este aspecto.

La situación se complica por el hecho de que la fijación no es permanente. Si el cloruro disuelto se remueve de la solución, por ejemplo por lixiviación, tiene lugar su reposición mediante la solución de parte del cloroaluminato presente. Esto quiere decir

que, existe un estado de equilibrio entre los cloruros disueltos y los cloruros fijos, por lo que siempre hay cierta cantidad de cloruros libres en la fase líquida.

Los concretos densos bien compactados, que contienen un bajo porcentaje de cloruros, por lo general proporcionan una buena protección al acero de refuerzo durante largo tiempo. El riesgo de corrosión aumenta en concretos que tienen un porcentaje mediano de cloruros, mientras que en los concretos con un porcentaje elevado existe gran riesgo de corrosión.

En todos los casos, el riesgo aumentará cuando aparezca carbonatación en el concreto, sobretodo en los casos en que el espesor de carbonatación ha alcanzado el espesor de recubrimiento y existan cantidades adecuadas de oxígeno y de humedad. La carbonatación destruye la capacidad del cemento hidratado para fijar el cloruro, por lo que en una situación dada, la existencia de carbonatación en la cercanía del acero incrementa el peligro de corrosión, aun cuando el contenido de cloruros sea bajo. El ataque por sulfatos también provoca la liberación de cloruros dentro de la solución, con lo que se agrava el grado de corrosión.

Puesto que el contenido de cloruros es solamente uno de los factores que propician la corrosión, no es de esperarse una relación tan directa entre ellos y la corrosión.

MECANISMO DE ATAQUE DE LOS CLORUROS

Los iones de cloruro presentes en la pasta de cemento que rodea al acero de refuerzo tienden a destruir la película protectora que se encuentra sobre el acero. Estos iones se describen como un destructor específico y único de la película protectora. Este proceso es de acción electroquímica¹⁶ e involucra iones de cloruro en

¹⁶ Ver subcapítulo 5.5.1.

presencia de oxígeno y aun en un medio de alto pH como es el concreto sin carbonatar.

Para que los cloruros, rompan la capa pasivante de las barras y comiencen el proceso de corrosión, requieren estar en una concentración llamada nivel iniciador de la corrosión. Este nivel depende de numerosos factores, entre ellos:

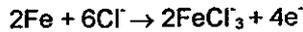
- Proporcionamiento del concreto
- Tipo de cemento y sus características (finura, contenido de yeso, contenido de aluminato tricálcico, etc.).
- *Relación agua/cemento*
- Contenido de sulfatos
- Condiciones de curado, edad e historia ambiental del concreto, rugosidad y limpieza de la barra de refuerzo.

Como ya se mencionó, no se puede determinar un valor fijo de cloruros general para todos los tipos de concreto. Sin embargo, se han desarrollado varias investigaciones para conocer el nivel de los cloruros iniciadores de la corrosión.

Varios investigadores (4) opinan que el nivel límite de cloruros también está en función de la cantidad de hidróxidos presente en la solución de poro y que el cociente Cl/OH^- es el factor más importante para determinar si la barra está aun pasivada, proponiendo un valor límite para este cociente de 0.61.

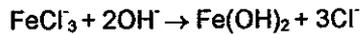
Una vez que han llegado a la barra de refuerzo en cantidades suficientes, los cloruros pueden destruir la pasividad natural del acero de refuerzo provocando su corrosión. Aún se discute el mecanismo por el cual estos iones destruyen la pasividad, sin embargo, se han propuesto varias teorías, entre ellas las de la "Formación del

Compuesto". Esta teoría plantea que los iones libres de Cl^- forman un compuesto soluble con los iones de hierro, de acuerdo con la siguiente ecuación:



Esto produce un ambiente ácido en la superficie del acero (pH aproximado de 5). Dicha zona está protegida por los productos de la corrosión, por lo que continúan las condiciones ácidas, así como la herrumbre. Debido al ambiente ácido de la zona, una vez que se ha formado, esta se mantiene activa y aumenta en profundidad.

El compuesto así obtenido se dispersa hacia otra zona alejada del ánodo, donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son elevados. En consecuencia, el compuesto se disocia¹⁷, precipitándose el hidróxido de hierro y liberándose los iones cloruro:



Por lo tanto, se regenera el Cl^- . Las otras reacciones, especialmente la reacción catódica, ocurre en ausencia de cloruros.

Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro en la vecindad del acero, el proceso puede continuar catalíticamente¹⁸, emigrando desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxidos e hidróxidos; de esta forma, la superficie del acero se activa localmente, formándose un pequeño ánodo y la superficie pasiva proporciona el cátodo. Este último, es mucho mayor que el primero y en consecuencia, la disolución

¹⁷ Disociar: Separar una cosa de otra a la que estaba unida, o los diversos componentes de una sustancia.

¹⁸ Catálisis: Aceleración de una reacción química por presencia de una sustancia que permanece aparentemente intacta.

del hierro en el ánodo se extiende en profundidad no sobre la superficie de la barra de acero y se forma una picadura .

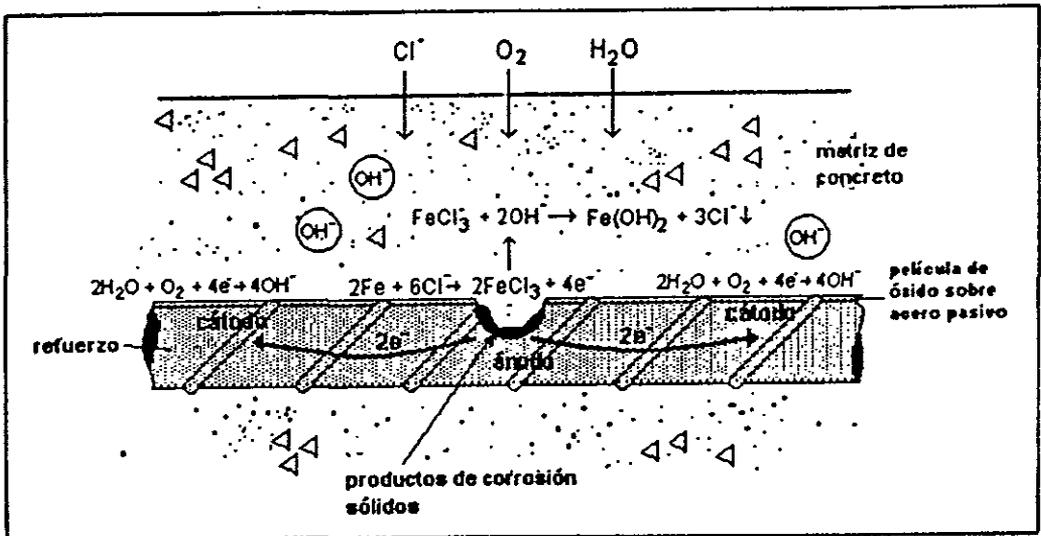
En la figura 5.7 se muestra un esquema del mecanismo de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, debido al rompimiento de la capa pasivante del acero por efecto de los iones cloruro.

En general, estas teorías sugieren que sólo los cloruros libres, es decir los disueltos en la solución de poro, participan en el proceso de corrosión. Sin embargo, es probable que los cloruros que se han unido a algún proceso de hidratación del cemento rompan ese enlace y regresen a la solución. Es por eso que algunos otros investigadores consideran que los cloruros ligados representan un riesgo potencial de corrosión y recomiendan también tomar en cuenta el riesgo de corrosión en términos de los cloruros totales, razón por la cual se suma más incertidumbre al respecto.

5.4.4 OTROS

5.4.4.1 EFECTOS DE LA ELECTRICIDAD.

El paso de corriente eléctrica directa a través del acero de refuerzo utilizado en el concreto puede originar una rápida y seria corrosión. Este tipo de corriente es producida frecuentemente por fugas de sistemas eléctricos o por no haber dispuesto de un medio positivo y permanente para conectar los sistemas eléctricos a tierra. Se debe considerar que *este tipo de corrosión* siempre puede presentarse en las cercanías de cualquier equipo de corriente directa, incluyendo líneas electrificadas y sistemas de tubería con protección catódica y especialmente si en el concreto o en contacto con él, se encuentre un electrolito tal como una solución de cloruro de calcio o de sodio.



MECANISMO DE CORROSIÓN POR
PICADURAS DEBIDO A LOS CLORUROS

FIG. 5.7

5.4.4.2 SUSTANCIAS AGRESIVAS

El concreto es más vulnerable cuando se encuentra bajo el ataque de sustancias agresivas en solución que ejercen presión sobre alguna de sus superficies, pues la presión tiende a forzar la entrada de la solución agresiva al concreto.

El ataque de sustancias químicas sobre el concreto, es por lo general, el resultado de su exposición a sulfatos o ácidos.

Algunos sulfatos están presentes en forma natural en el suelo, agua subterránea o ambiente submarino y al entrar en contacto con el concreto le ocasiona daños.

Debido a las reacciones químicas que intervienen en el ataque del concreto por sulfatos se obtiene como resultado un aumento del volumen sólido, expansiones y rupturas del concreto causadas por soluciones de sulfatos.

Cuando los sulfatos están en contacto con la superficie del concreto producen su debilitamiento y desintegración.

El concreto está sujeto a los ataques de ciertos ácidos producidos por diversas situaciones. Por ejemplo:

Al quemarse un gran número de combustibles liberan productos que contienen gas sulfuroso, el cual se combina con la humedad y forma ácido sulfúrico que cae en forma de lluvia ácida.

Las aguas de albañal o residuales al recolectarse pueden formar ciertos ácidos. También las aguas de algunas minas y las aguas residuales industriales pueden contener ácidos que atacan al concreto. Los ácidos orgánicos de las industrias

agrícolas o de las industrias manufactureras o de procesadoras presentan un peligro para la integridad del concreto.

5.5 MECANISMOS DE LA CORROSIÓN

5.5.1 TIPOS DE CORROSIÓN

Básicamente son dos los procesos principales de la corrosión que pueden sufrir los armados de acero para concreto, la oxidación y la corrosión electroquímica:

OXIDACIÓN

Por oxidación se entiende el deterioro provocado por una reacción gas/metál, debida al ataque de sistemas no electrolíticos, por ejemplo, gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica o por líquidos no conductores de la corriente eléctrica y que dan como resultado la formación de una película de óxido generalizada sobre toda la superficie metálica. Este tipo de corrosión es muy lenta a la temperatura ambiente y no provoca daños sustanciales de las superficie metálicas, salvo en el caso de que existan gases extremadamente agresivos en la atmósfera.

Para ejemplificar el proceso de la oxidación podemos citar el fenómeno que ocurre preponderantemente durante la fabricación de alambres y barras de acero, que al salir del tren de laminación con temperaturas del orden de 900°C , experimentan una fuerte reacción de oxidación con el aire ambiental. Esta película, que se forma sobre la superficie de las barras es compacta, uniforme y poco permeable, pudiendo hasta servir de protección relativa de los armados contra la corrosión electroquímica posterior.

Cuando el acero todavía se somete a un trefilado¹⁹ en frío para mejorar sus propiedades, esta película, denominada calamina del laminado tiene que removerse por métodos físicos tales como chorros de arena o de granillo a presión, o químicos del tipo decapado con ácidos. La película inicial se sustituye entonces por otra de fosfato de zinc o de hidróxido cálcico, que se utilizan como lubricantes del proceso, pudiendo ser a semejanza de la primera una débil protección del acero contra la corrosión electroquímica.

No siendo éste el fenómeno principal de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado convencionales, no se profundizara en el tema en el presente trabajo.

CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.

Es una reacción química en la que hay transferencia de electrones e iones, por lo tanto, por ocurrir en un medio acuoso, es un proceso de naturaleza "electroquímica".

Actualmente se reconoce que la corrosión del acero de refuerzo ahogado en el concreto ocurre por medio de un proceso electroquímico, esto es, la reacción global de la corrosión es el resultado de dos o más reacciones electroquímicas parciales, independientes entre sí y que se llevan a cabo en la interfase metal (acero)/ electrolito (solución del poro). Dichas reacciones electroquímicas parciales alejan al metal que se corroe de su estado de equilibrio, dando como resultado su disolución.

La corrosión electroquímica comprende a la corrosión atmosférica en aire húmedo, a la producida por los suelos o a la corrosión provocada por medios electrolíticos tales como agua de mar, soluciones ácidas y alcalis.

¹⁹ Trefilar: pasar el hierro u otros metales por una hilera reductora para hacer varillas, alambres o hilos más delgados.

Para que pueda ocurrir la corrosión electroquímica se necesita de cuatro elementos para formar la llamada "pila de corrosión" o pila galvánica:

- a) El ánodo: donde ocurre la reacción de oxidación.
- b) El cátodo: donde ocurre la reacción de reducción.
- c) El medio conductor que los ponga en contacto iónico, llamado electrolito.
- d) Un conductor eléctrico que una al cátodo con el ánodo, necesario para cerrar el circuito.

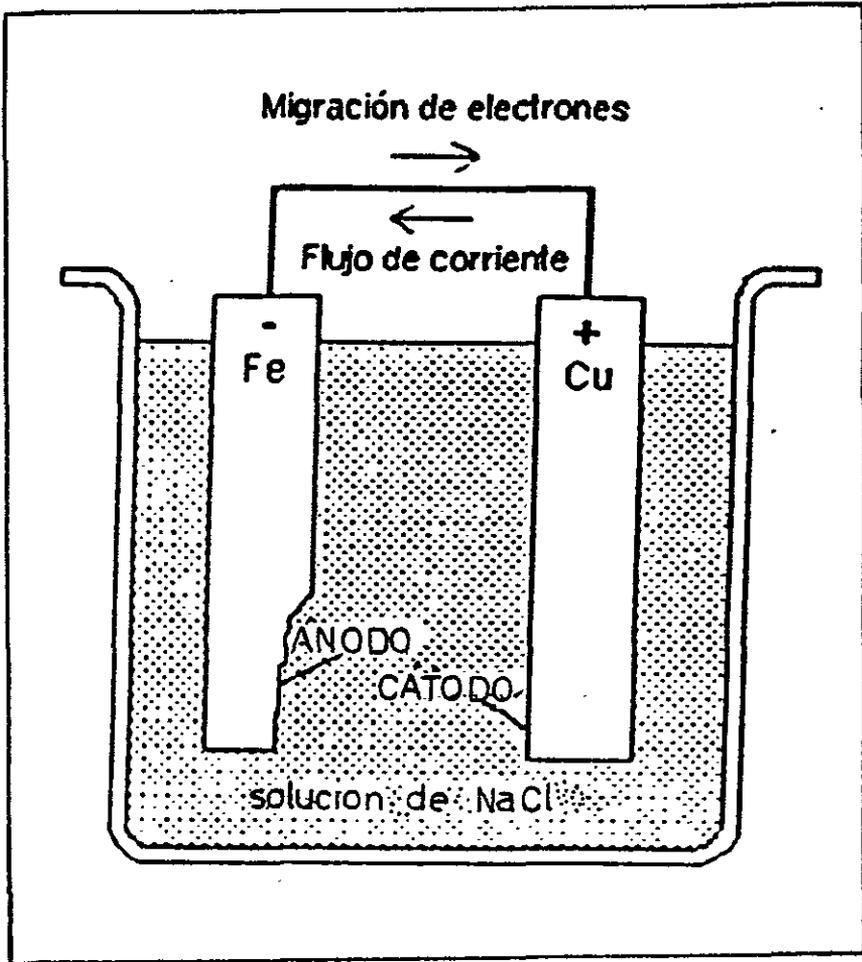
La existencia de ánodos y cátodos en el refuerzo estará garantizada en el sistema acero/concreto debido a la heterogeneidad del mismo:

- a) En la escala macroscópica, como resultado de la estructura porosa del concreto y del empleo de agregados, así como del proceso de fabricación y de las condiciones de curado, que dan origen a regiones con diferentes propiedades tanto químicas como físicas.
- b) En la escala microscópica, las heterogeneidades pueden estar causadas por gradientes de temperatura, acceso no uniforme de agua, oxígeno y sales, o a defectos durante la puesta en obra del concreto.

A continuación se citará el siguiente ejemplo con el fin de ilustrar cómo actúan estos elementos en la formación de una pila galvánica:

Se colocan dos placas de metal diferentes, fierro (Fe) y cobre (Cu), unidos por un alambre de cobre y sumergidos en un recipiente con un electrolito, por ejemplo una solución de cloruro de sodio NaCl (ver fig. 5.8).

La reacción que ocurre en la placa de fierro es:



PILA GALVANICA DE CORROSIÓN

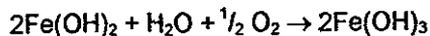
FIG. 5.8



Aquí los electrones son liberados convirtiéndose el Fe en el ion Fe^{2+} , el cual como se puede ver, aumentó su valencia de Fe^0 a Fe^{2+} , es decir, ocurrió una oxidación. La porción de la placa donde ocurre esta reacción se llama ánodo (ver figura 5.9). Estos iones Fe^{2+} se pueden combinar con iones cargados negativamente, OH^{-} que se encuentran en las inmediaciones del ánodo, pudiéndose formar ocasionalmente hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$:



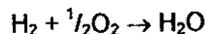
El cual puede reaccionar con posterioridad con agua y oxígeno para formar el hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de color rojizo que se conoce como herrumbre:

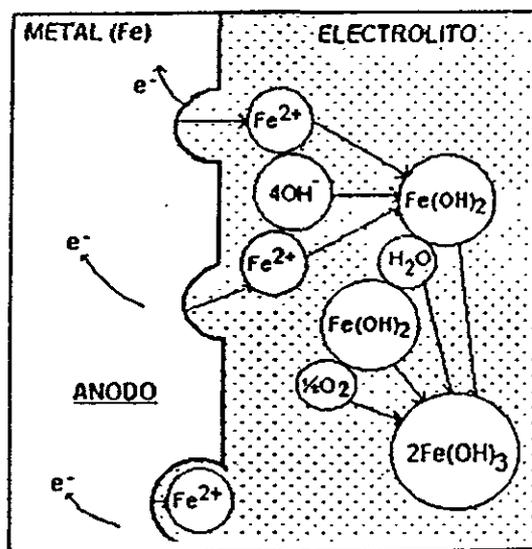


Los electrones liberados por el Fe (en el ánodo) viajan a través del conductor metálico a la placa de Cu. En el Cu llegan hasta la interfase metal/solución donde se combinan con los iones de hidrógeno, formando de esta manera el gas hidrógeno, H_2 (ver figura 5.10).



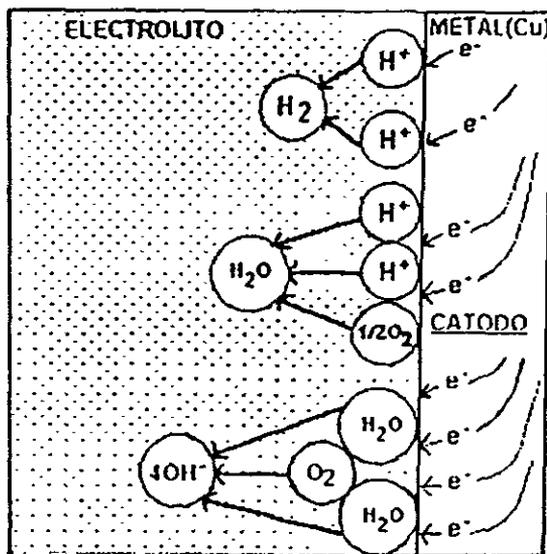
Esta reacción en la cual el hidrógeno acepta los electrones es una reducción, ya que el hidrógeno disminuye su valencia. La zona donde ocurre esta reducción se denomina cátodo. Al formarse el hidrógeno gaseoso se puede combinar con el oxígeno disuelto en la solución:





FORMACIÓN DEL $Fe(OH)_2$ Y DEL
 $Fe(OH)_3$ EN EL ÁNODO

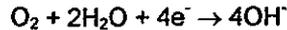
FIG. 5.9



REDUCCIÓN DE LOS IONES DE H^+
 PARA FORMAR EL GAS HIDRÓGENO
 Y FORMACIÓN DE LOS IONES OH^-
 EN EL CÁTODO

FIG. 5.10

Normalmente la reacción catódica en los medios naturales (pH neutro) es la reducción del O₂ disuelto según:



Debido a esta formación de iones hidróxido aumenta la alcalinidad adyacente al cátodo.

OXIDACIÓN VS CORROSIÓN.

Entre las principales diferencias de la oxidación respecto a la corrosión podemos citar que:

A diferencia de la oxidación que se extiende uniformemente a toda la superficie metálica, la corrosión electroquímica casi siempre es más pronunciada en unas zonas de la superficie que en otras.

Otra diferencia notable entre la oxidación y la corrosión consiste en el grado mayor o menor de protección que aportan los productos de la corrosión. En la oxidación, se forma una capa que por lo general establece una barrera de separación entre el metal y el medio corrosivo. En cambio, en la corrosión electroquímica los productos de la corrosión pasan a la solución y, aunque se forman compuestos insolubles estos pueden precipitar a alguna distancia de la superficie metálica. Aún en el caso de cubrir la superficie del metal son muchos menos compactos y adherentes que las películas y capas producidas por la oxidación. Esto quiere decir que por lo general, los daños causados por la corrosión electroquímica son superiores a los originados por la oxidación directa.

5.5.2 CONDICIONES NECESARIAS PARA LA CORROSIÓN

El mecanismo de la corrosión del acero en el concreto es electroquímico, tal como sucede en la mayoría de las reacciones corrosivas en presencia de agua o en ambiente húmedo (H.R. \geq 60%).

Esta corrosión conduce a la formación de óxidos/hidróxidos de hierro, productos rojizos, pulverulentos y porosos, denominados herrumbre, y sólo es posible si ocurren las siguientes condiciones:

1. Debe existir un electrolito.
2. Debe existir una diferencia de potencial.
3. Debe existir oxígeno.
4. Deben existir condiciones de exposición en el concreto.
5. Pueden existir elementos corrosivos²⁰.

Como en cualquier otra pila, hay un ánodo, un cátodo, un conductor metálico y un electrolito. Cualquier diferencia de potencial entre las zonas anódicas y catódicas provoca la aparición de una corriente eléctrica. Dependiente de la intensidad de esta corriente y del acceso de oxígeno podrá haber o no corrosión.

A continuación se describirá en forma detallada cada una de las condiciones anteriores:

DEBE EXISTIR UN ELECTROLITO

Para que se forme una pila de corrosión es necesaria la presencia de un electrolito, el cual, es un solución capaz de conducir una corriente eléctrica por medio

²⁰ Ver subcapítulos 5.4.2 y 5.4.3.

del flujo de iones. El agua está presente en el concreto y generalmente en cantidades suficientes para actuar como electrolito, principalmente en las regiones de la estructura expuestas a la intemperie. Cualquier concreto humedo contiene suficiente electrolito como para conducir una corriente capaz de causar corrosión. Mientras más seco esté un concreto, menor será su conductividad.

Además del agua, ciertos productos de hidratación, como por ejemplo el hidróxido cálcico $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que es soluble en agua, también forma en los poros y capilares, una solución saturada que constituye un buen electrolito.

Mediante ciertas investigaciones (5), se ha demostrado que siempre hay agua en el concreto y, en consecuencia, siempre puede existir un electrolito.

DEBE EXISTIR UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL

Según algunos investigadores para que ocurra la corrosión, es necesario no sólo que se reduzca la pasividad, sino que también existan algunas diferenciales en el potencial electroquímico dentro del sistema acero-concreto. Esto significa que debe haber áreas adyacentes de metal que sean anódicas (positivas) y catódicas (negativas) conectadas por el electrolito en forma de solución salina en el cemento hidratado:

Cuando se sumerge el acero en una solución, parte de los átomos de hierro tienden a pasar a la solución, para lo cual se transforma en cationes hierro (Fe^{2+}) con carga eléctrica positiva, dejando al armado con carga negativa creándose lo que se conoce como potencial de equilibrio o reversible. Este hecho por sí solo no genera una fuerza electromotriz, pero en presencia de reactivos capaces de sufrir una reducción o sea, capaces de combinarse con el electrolito liberado en la reacción que formó el ión ferroso, puede formar una pila o celda de corrosión electroquímica.

Esta desigualdad en el potencial puede deberse a situaciones inherentes al propio concreto o a las que surjan por las condiciones de exposición.

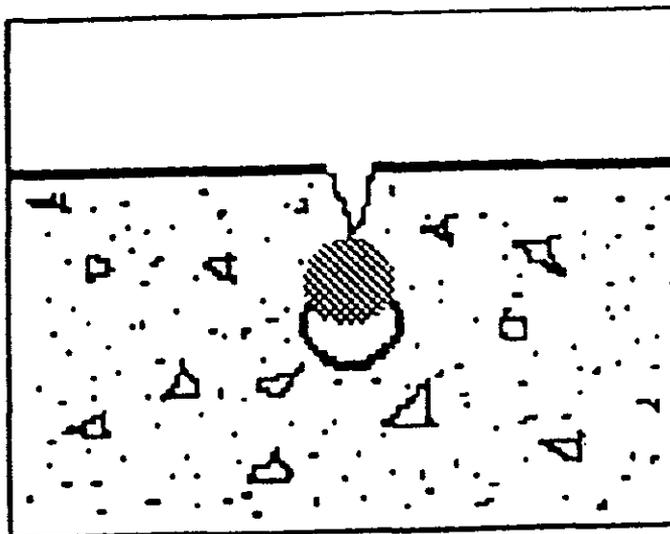
Consideremos primero las diferencias dentro del sistema acero-concreto, que pueden existir en el metal mismo, cuando se presenten los llamados sitios activos. Cualquier diferencia de potencial que se produzca entre dos puntos de la barra, por diferencia de humedad, aireación, concentración salina, tensión en el concreto o en el acero, etc., es capaz de desencadenar pilas o cadenas de pilas conectadas en serie. En la mayor parte de las veces se forman micropilas que pueden, inclusive alternar la posición de los polos ocasionando una corrosión generalizada.

El hecho de que se encuentren diferencias en el potencial del metal también puede ser resultado de las diferencias que haya en el ambiente químico del concreto, es decir, en la alcalinidad, debido a una distribución irregular de los álcalis dentro del cemento, a una lixiviación irregular, o a un grado de carbonatación no uniforme. Las variaciones locales en la permeabilidad del concreto pueden producir diferencias en el ambiente químico del acero, las cuales se reflejan en el potencial.

Otra posibilidad es la diferencia en el ambiente entre la superficie superior e inferior del acero, ocasionada por la segregación, compactación irregular o sangrado, factores que pueden producir grandes cavidades de aire en la superficie inferior del acero (ver fig. 5.11).

En cuanto a las condiciones de exposición, pueden ocurrir diferencias en el potencial electroquímico cuando parte del concreto está sumergido permanentemente en agua de mar o en la tierra y parte queda expuesta²¹ al oxígeno y al bióxido de carbono. El concreto que se encuentra inmediatamente por arriba de la zona de salpicaduras puede tener una mayor concentración de cloruro porque la acción capilar

²¹ Como en la zona de marea o de olas.



CAVIDAD DE AIRE EN LA SUPERFICIE
INFERIOR DEL ARMADO

FIG. 5.11

atrae la solución salina dentro del concreto y por la evaporación (especialmente en climas calientes) sólo queda la sal.

La desigualdad en la temperatura dentro del concreto también puede causar diferencias en el potencial electroquímico, pero el efecto principal de la elevación de la temperatura es aumentar la velocidad de las reacciones electroquímicas y por lo tanto acelerar la corrosión.

DEBE EXISTIR OXÍGENO

Es necesario que haya oxígeno para la formación de herrumbre (óxido hidratado de hierro), además de electrolito representado por la humedad, sin lo cual, no es posible la reacción que da origen a ese producto.

El producto de la corrosión, denominado herrumbre, no es siempre $Fe(OH)_3$, sino antes una gama de óxidos e hidróxidos resultantes de varias etapas de la corrosión, tal como se verá más adelante.

DEBEN EXISTIR CONDICIONES DE EXPOSICIÓN EN EL CONCRETO.

La permeabilidad del concreto es con mucho el factor más importante en la corrosión. En concretos impermeables, la conductividad eléctrica es menor, posiblemente porque hay poca humedad interior. Por lo tanto, se debe prestar gran atención a la estructura y distribución de la red de poros del concreto, ya que el tamaño, la distribución y la interconexión de los poros determina la disponibilidad de oxígeno y humedad necesarios para la permanencia de la capa pasivante, así como la tasa de ingreso de iones agresivos y otros agentes iniciadores de la corrosión.

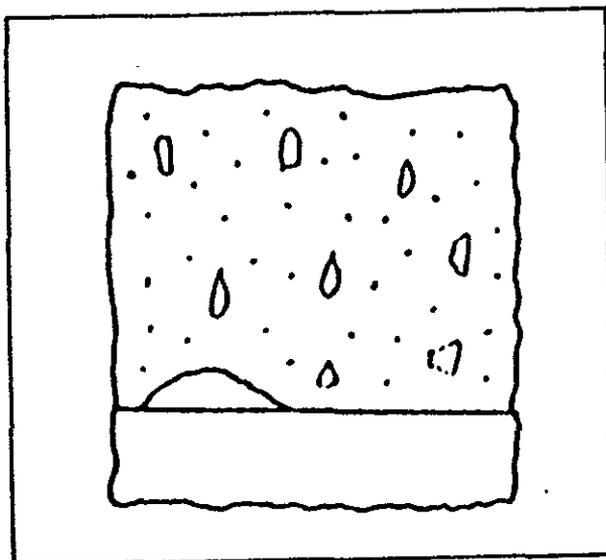
Si los poros capilares son pocos y pequeños, la corrosión temprana llenará los mismos en una gran área alrededor del sitio de corrosión y retarda la difusión de reactivos y de los productos de la reacción, con lo cual casi se detendrá la corrosión. Sin embargo, en concretos de baja calidad hay una rápida difusión de los reactivos, y puesto que los poros capilares son grandes y numerosos, sólo se obstruyen en un área pequeña. Cuando hay una cavidad de aire cerca del acero (ver fig. 5.12), los productos de la corrosión no la obstruyen. En la práctica se ha observado corrosión cerca de cavidades grandes.

Debemos agregar que el agrietamiento del concreto también puede ocasionar diferencias de exposición entre las partes adyacentes del acero (ver fig. 5.13). Lo mismo se aplica a la variación en el espesor del recubrimiento, ya que podría haber un ingreso variable de agua y oxígeno.

No se ha demostrado que el tipo de acero tenga algún efecto sobre la corrosión.

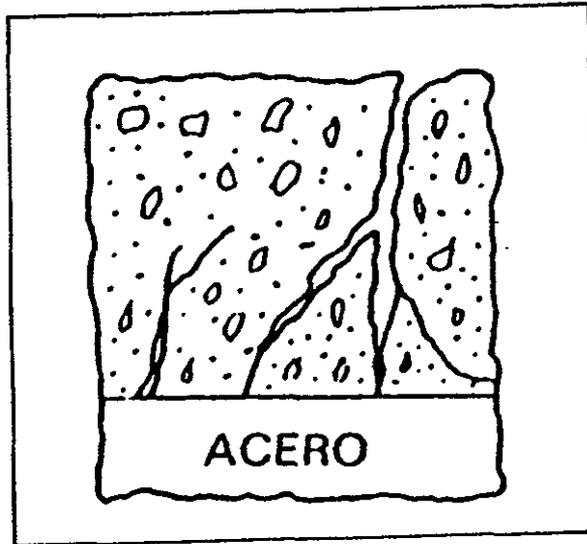
5.5.3 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

Se puede hacer una clasificación de acuerdo a la manera en la que se produce la corrosión. Entre los tipos más comunes se puede encontrar:



HUECOS SUPERFICIALES
SOBRE LAS BARRAS DEL ARMADO

FIG. 5.12



FISURA EN EL
CONCRETO REFORZADO

FIG. 5.13

*a) Corrosión
bimetálica*

También se le conoce como corrosión galvánica. Ocurre cuando están en contacto eléctrico dos metales distintos expuestos a soluciones corrosivas o a condiciones atmosféricas húmedas.

Uno de ellos se comportará como ánodo y el otro como cátodo de acuerdo a la posición que tengan en la serie galvánica (ver fig. 5.14).

En este tipo de corrosión hay que tener en cuenta la relación de áreas (anódicas y catódicas) de los metales que forman el par galvánico. Es sumamente perjudicial una relación entre un gran área catódica y un área anódica pequeña, como la que hay, por ejemplo, cuando láminas de un determinado metal están unidas mediante tornillos de un metal menos noble. En la figura 6, las láminas de aluminio se comportarán como ánodos, corroyéndose con una gran rapidez, mientras que los tornillos de latón serán los cátodos, los cuales quedarán protegidos (protección catódica). En el caso del concreto reforzado, se presenta en zonas donde se unen elementos metálicos con el armado del concreto, esto con el fin de dar mayor apoyo a estructuras metálicas.

*b) Corrosión
uniforme*

Este tipo de corrosión se puede dar cuando el ataque se extiende casi por igual sobre toda la superficie. Ejemplos de este tipo se pueden apreciar cuando se exponen piezas de acero en soluciones diluidas ácidas o expuestos a agentes atmosféricos normales (ver inciso a fig. 5.15).

En el área de la construcción, se presenta comúnmente en concretos donde la carbonatación ha rebasado el recubrimiento

del armado, dejando al mismo expuesto a los agentes atmosféricos (ver inciso b fig. 5.15).

c) Corrosión localizada

Este ataque ocurre solamente en determinadas áreas de la superficie, teniendo lugar en estas una intensificación del proceso corrosivo en comparación con la corrosión generalizada, pudiendo ser en extremo peligrosa ya que puede conducir a la falla prematura de la pieza (ver inciso c fig. 5.15). Es el caso más frecuente de corrosión en las estructuras de concreto reforzado.

d) Corrosión por picaduras

Este tipo de ataque se manifiesta, como su nombre lo indica, en forma de picaduras estrechas y profundas. Son difíciles de descubrir debido al pequeño diámetro de éstas y porque comúnmente están recubiertas por los productos de la corrosión. El mecanismo de ataque consta de un período de iniciación de la picadura debido a heterogeneidades, algún daño metálico, o a diferencias de composición en la solución, etc. Una vez iniciada la picadura se forma una zona anódica en la parte del metal desnudo actuando como cátodo la zona de metal pasivo, generándose una diferencia de potencial muy grande. (ver inciso d fig. 5.15). Este es el caso de corrosión en presencia de cloruros.

e) Corrosión en grietas o hendiduras

Se presenta en uniones de piezas metálicas, en rendijas, debajo de arandelas, tuercas o remaches, en juntas solapadas o debajo de depósitos (óxido o impurezas) u objetos localizados sobre la superficie metálica. En el caso del concreto reforzado, se presenta en las juntas constructivas, en donde por algún motivo el armado queda expuesto y en el peor de los casos en contacto con otros metales u otros armados.

f) Corrosión bajo esfuerzo Esta es una forma de ataque localizado, sin embargo, se requieren de dos factores fundamentales: la presencia de un medio corrosivo específico y la presencia de esfuerzos a tensión, ya sea aplicados o residuales en el material.

En el caso de aceros sometidos a altas tensiones, como sería el caso de concreto post y pretensados, el proceso de corrosión es aún más grave por la presencia de la tensión mecánica, provocando pequeñas fisuras que rápidamente progresan y llegan a la fractura del material (ver inciso e fig. 5.15). Este es un campo poco explorado a la fecha, así que la información disponible sobre el tema es escasa, por lo cual, este tipo de corrosión no se trata en el presente trabajo.

g) Corrosión bajo fatiga. Es una forma muy parecida a la corrosión bajo esfuerzo, con la diferencia de que los esfuerzos que lo provocan son de tipo cíclico y pueden ser introducidos por procesos térmicos o mecánicos. No se trata en el presente trabajo este tipo de corrosión.

h) Corrosión por erosión Se considera que es el aumento en la velocidad del deterioro que sufre un metal debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie metálica. Ejemplos de este tipo de daño, se pueden observar en las tuberías de acero o concreto que conducen ciertos fluidos corrosivos. Es el caso de la corrosión en presencia de sustancias agresivas.

i) Corrosión bacteriológica Este tipo de corrosión es generado por microorganismos de diferentes variedades. Así, por ejemplo, algunos microorganismos

del agua de mar pueden atacar a los pilotes de puentes o muelles provocando de esta manera la corrosión de la estructura. No se trata en el presente trabajo este tipo de corrosión.

Esta clasificación no es única, ya que los tipos de corrosión se pueden clasificar también de acuerdo al medio donde se desarrollan, a los sectores industriales que atacan, a las acciones físicas que producen, etc. Una vez conocidos algunos de los principios básicos de la corrosión ya se pueden entender mejor los procesos que ocurren en la corrosión del acero de refuerzo ahogado en el concreto.

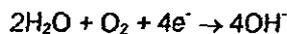
5.5.4 PROCESO CORROSIVO

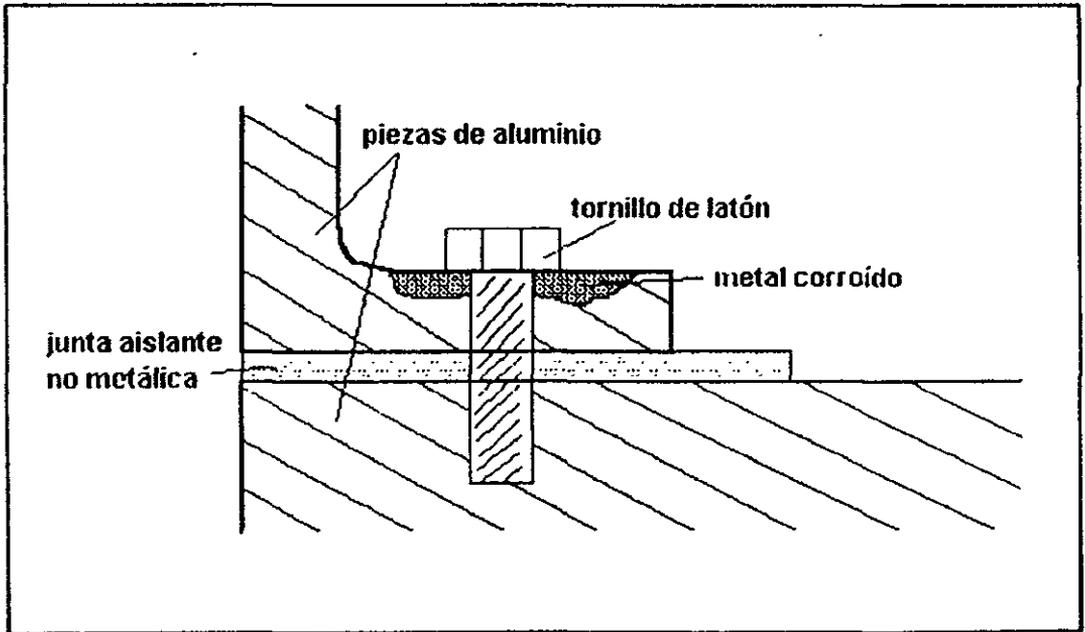
Durante el desarrollo del proceso de la corrosión del acero embebido en concreto ocurren las siguientes reacciones electroquímicas parciales:

a) En la zona anódica, formada en la superficie del acero de refuerzo, el hierro pierde electrones, ocasionando con esto la disolución del metal, esto es, ocurre la siguiente reacción de oxidación:



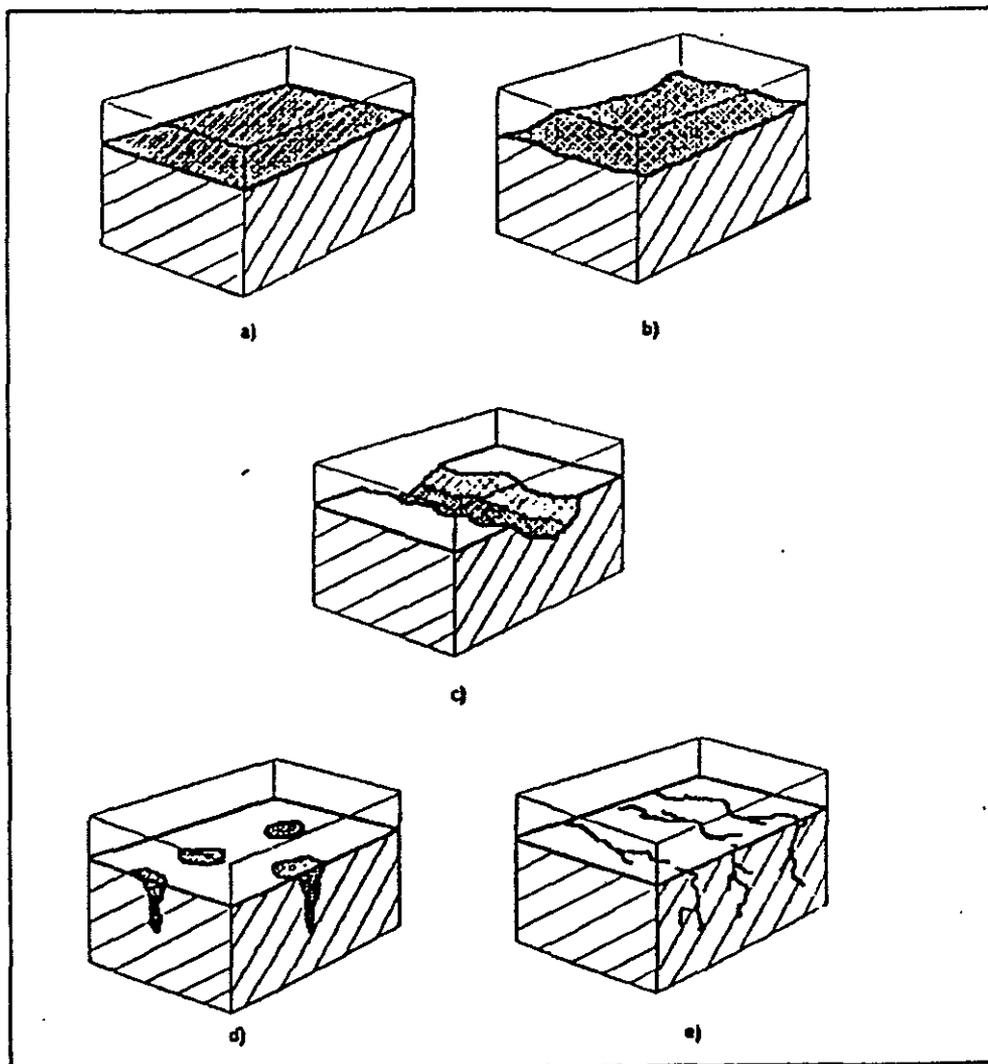
b) Dicha reacción, libera electrones que fluyen a través de la misma barra metálica hacia las zonas catódicas, donde se consumen en una reacción de reducción (ver fig. 5.16), la cual dependiendo de la disponibilidad de oxígeno y del pH de la solución acuosa de los poros del concreto puede ser:





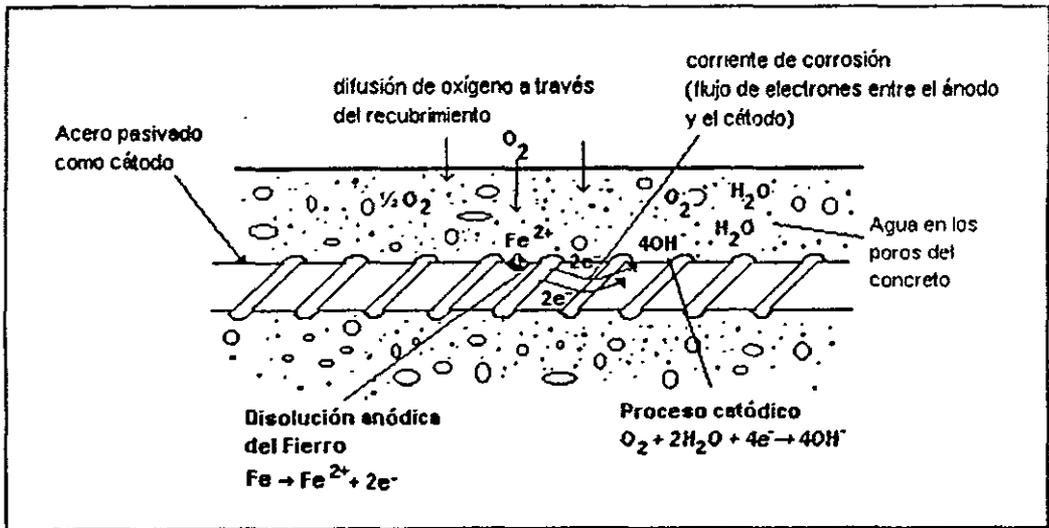
EJEMPLO DE CORROSIÓN GALVÁNICA

FIG. 5.14



ALGUNOS TIPOS DE CORROSIÓN

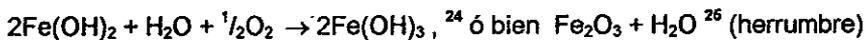
FIG. 5.15



FORMACIÓN DE LA PILA DE CORROSIÓN
EN EL CONCRETO REFORZADO

FIG. 5.16

c) El circuito electroquímico se cierra a través del transporte de especie cargadas (iones hidróxido y ferrosos), presentes en la solución acuosa de los poros del concreto, acarreado las siguientes reacciones de corrosión con formación de herrumbre:



Debe subrayarse que estas son descripciones esquemáticas. Se observa que el oxígeno se consume, pero el agua se regenera y sólo es necesaria para que el proceso continúe. Por lo tanto, no hay corrosión en una atmósfera completamente seca, probablemente con una humedad relativa inferior a 40%. Tampoco existe mucha corrosión en concreto completamente sumergido en agua, excepto cuando el agua pueda contener aire. Se ha sugerido que la humedad relativa óptima para la corrosión está entre el 70 y el 80%, ya que a humedades relativas más elevadas la difusión de oxígeno se reduce considerablemente y las condiciones ambientales son más uniformes a lo largo del acero.

La rapidez de esta transferencia de iones en el sistema que se corroe depende de la temperatura, del contenido de humedad en los poros, de la concentración de iones en la solución y de la permeabilidad del concreto.

En el acero de refuerzo embebido en concreto se puede distinguir la formación de dos tipos de pilas de corrosión: las microceldas (ver fig. 5.17), en donde los sitios de actividad anódica y catódica están uniformemente distribuidos sobre el metal, y las

²² Hidróxido ferroso, débilmente soluble e incoloro.

²³ Óxido ferroso hidratado (expansivo).

²⁴ Hidróxido férrico (expansivo).

²⁵ Óxido férrico hidratado, goetita o lepidocrosita (expansivo).

macroceldas (ver fig. 5.18), en donde los sitios de actividad anódica y catódica están localizados y separados entre sí.

Cuando las diferencias de potencial están bien localizadas y la pasividad se destruye dentro de un área bien pequeña, entonces las regiones anódicas y catódicas se pueden distribuir como lo indican los tres modelos de la figura 5.19.

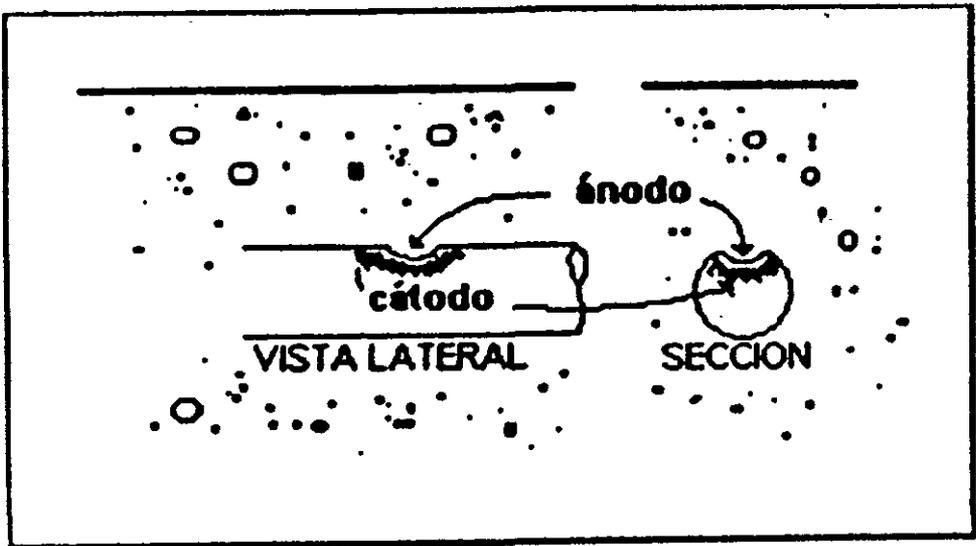
También es posible que exista un cuarto modelo en el que las áreas anódicas y catódicas estén, respectivamente, en las partes inferior y superior de la superficie del acero.

5.6 EFECTOS DE LA CORROSIÓN

En las primeras etapas de la corrosión, se pueden observar en los poros de concreto y en agrietamientos superficiales unas manchas causadas por el óxido. El proceso es claramente visible, pues los productos de la corrosión tienen una coloración predominantemente rojizo-pardo-acastañado y, siendo relativamente solubles, se escurren ensuciando la superficie de concreto.

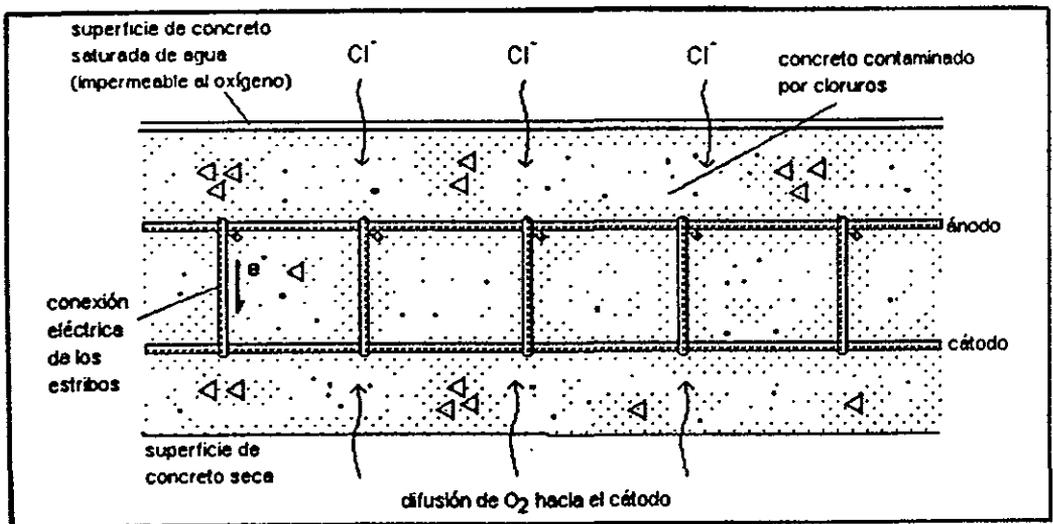
En algunas situaciones especiales de corrosión de los armados inmersas en concretos ligeros y porosos (volumen de huecos del orden de 60% cuando en el concreto normal es de 10%), puede darse la aparición de manchas externas de herrumbre, sin fisuración.

De lo expuesto, surge la necesidad de identificar los problemas que resultan de la corrosión, los cuales son numerosos y muy serios, ya que los efectos se manifiestan sobre los dos componentes del concreto y en el conjunto:



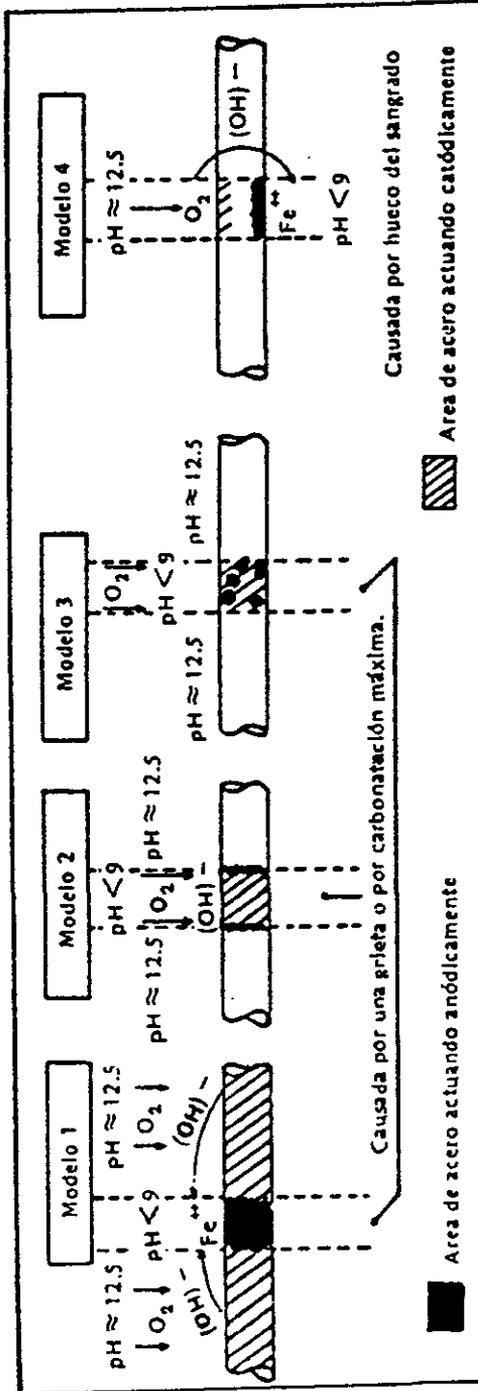
ESQUEMA DE MICROCELDA DE CORROSIÓN

FIG. 5.17



ESQUEMA DE MACROCELDA DE CORROSIÓN

FIG. 5.18



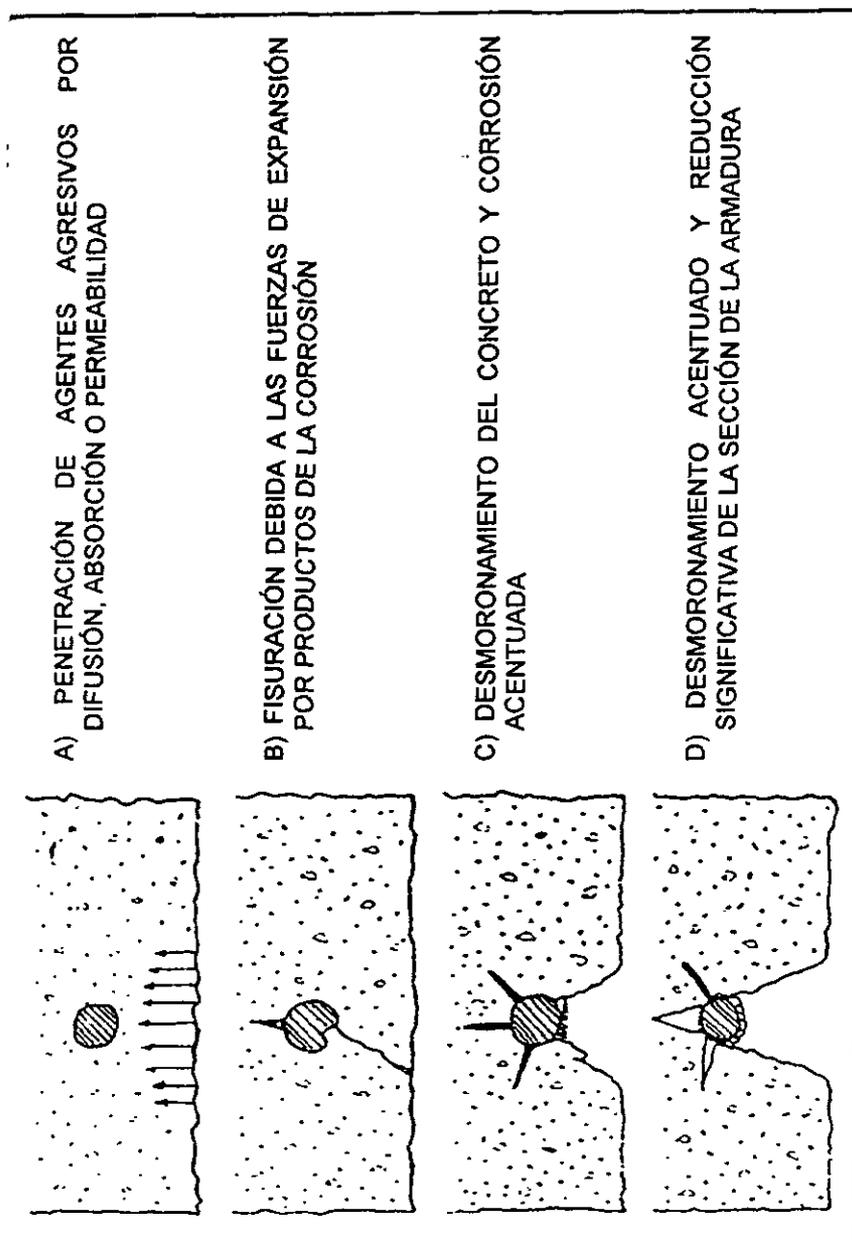
DISTRIBUCIÓN DE REGIONES ANÓDICAS Y CATÓDICAS

FIG. 5.19

- a) Sobre el acero, con una disminución de su capacidad de soportar cargas mecánicas a causa de la disminución de sección.
- b) Sobre el concreto, al ser los productos de corrosión del acero más voluminosos que sus elementos de partida generan tensiones que pueden agrietar el material.
- c) Sobre la adherencia acero-concreto, debido precisamente a la naturaleza expansiva de los productos de corrosión, lo que puede provocar en el peor de los casos la falla de la estructura.

En las zonas donde el concreto no es apropiado o no recubre, o recubre deficientemente al armado, la corrosión se vuelve progresiva con la consiguiente formación de óxidos e hidróxidos hidratados de hierro, que tienen un volumen varias veces mayor, alcanzando volúmenes de 3 a 10 veces superiores al volumen inicial del acero del armado, pudiendo ocasionar presiones de expansión superiores a 15 MPa (150 kg/cm²). Tales tensiones, provocan inicialmente la fisuración del concreto en una dirección paralela al armado principal, favoreciendo la carbonatación y la penetración del CO₂ y de agentes agresivos. En casos avanzados en el concreto se pueden formar escamas, pudiendo provocar el paso siguiente, el desprendimiento de las superficies de concreto.

Esta fisuración acompaña en general, la dirección del armado principal y más raramente la dirección de los estribos, a no ser que estén en la superficie. Debe considerarse que los estribos están, generalmente en dirección perpendicular al mayor esfuerzo de compresión en el caso de las columnas, lo cual puede impedir la aparición de fisuras profundas en el elemento de concreto. Los estribos en la región central de una viga están expuestos a un mayor riesgo de corrosión, ya que puede agrietarse el concreto en su cara inferior, pero difícilmente lo conseguirán en la zona próxima a los apoyos. Normalmente lo que se observa en estribos, es el desprendimiento directo del concreto sin fisuras iniciales (ver fig. 5.20).



DETERIORACIÓN PROGRESIVA DEBIDA A LA
CORROSIÓN DE LOS ARMADOS

FIG. 5.20

Así mismo, puede suceder que el concreto que rodea una varilla de refuerzo de sección grande, se agriete como resultado de las fuerzas expansivas originadas por la corrosión, bastante antes de que la pérdida de sección se vuelva crítica desde el punto de vista de las cargas que se le estén aplicando. En este caso, es necesario efectuar reparaciones ya que se pierde la adherencia, se producen agrietamientos, o se presenta una formación de escamas, que da como resultado una corrosión muy costosa.

La corrosión se expresa en gramos de pérdida de peso por metro cuadrado y por día del material sometido a ataques determinados. En construcción se expresa por la pérdida de espesor en milímetros por año.

6.1 RECOMENDACIONES TENDIENTES A PREVENIR LA CORROSIÓN.

6.1.1 RECOMENDACIONES SOBRE EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.

Un concreto correctamente dosificado en cemento, bien ejecutado y con adecuado espesor de recubrimiento, es la mayor garantía de una protección estable y duradera del armado. Si el concreto es malo en alguno de los tres componentes mencionados, difícilmente otros medios de protección adicionales podrán contrarrestar un determinado ataque.

A continuación se darán algunas recomendaciones sobre el diseño de estructuras de concreto reforzado tendientes a aumentar la durabilidad de las estructuras:

1. Elegir diseños sencillos.
2. Dimensionar evitando excesivas deformaciones que puedan provocar fisuras.
3. Evitar contactos prolongados innecesarios del concreto con agua (desagües y agua estancada). En lugares sujetos a exposición severa, en especial en cubiertas de concreto de puentes y grandes claros de losas, se debe prestar particular atención a los detalles del diseño del sistema de drenaje de la obra, asegurando que el agua será drenada libremente y que no habrá formación de depósitos de ésta.
4. Reducir zonas expuestas a mojado o salpicado.
5. Diseñar el concreto y ponerlo en obra de manera homogénea para asegurar una buena calidad, así como el empleo de buenas prácticas constructivas constituyen un factor de primer orden para asegurar un concreto uniforme que tenga una baja permeabilidad. Entre ellas se incluye el uso de concretos de bajo revenimiento,

- el tomar precauciones contra la segregación, un vibrado adecuado para asegurar buena compactación y el empleo de prácticas de buenos acabados
6. Distribuir correctamente el armado en todas las regiones de la pieza, con el fin de disminuir los riesgos de fisuración del concreto, ya que las grietas se producen principalmente en los ángulos, en las paredes delgadas y en las superficies del concreto.
 7. Extremar las precauciones para asegurar un espesor de recubrimiento homogéneo y suficiente para el ambiente al cual estará expuesta la estructura, ya que la corrosión de los armados depende mucho del espesor del concreto que las rodea.
 8. Los armados mal recubiertos son a menudo los que están situados cerca de la superficie, los cuales quedan visibles entre los grandes granos de los agregados que quedan difícilmente emplazados en un espacio demasiado estrecho. Si las barras están alejadas en todas las zonas de la superficie del concreto, se mantienen a un potencial uniforme y las pilas locales que podrían formarse lentamente, se polarizarán²⁶ antes de que la oxidación electroquímica sea peligrosa.
 9. El espesor de concreto debe ser tanto mayor cuanto más cerca esté el armado de un gran número de superficies tales como aristas o ángulos, esto con el fin de evitar que el aire o el gas carbónico alcancen con mayor facilidad al armado, así mismo, la penetración de aire húmedo es tanto menor cuanto mayor es el espesor que debe atravesar.
 10. Alcanzar una buena compactación del concreto para asegurar un buen recubrimiento de los armados y una distribución homogénea de los agregados.
 11. Asegurar un curado suficientemente largo y continuo, ya que un curado insuficiente bloquea o perturba determinadas reacciones de hidratación con lo cual se obtiene un concreto poroso y mucho más permeable a los agentes agresivos.

²⁶ Polarizar.- disminuir la corriente por aumentar la resistencia del circuito, debido al depósito de hidrógeno sobre un electrodo.

12. El estado superficial del acero influye en la capacidad de pasivación de los armados. Si la superficie del armado se encuentra cubierta con óxidos y otras suciedades al momento del llenado con concreto, se necesitará menor cantidad de sustancias agresivas para despasivar el acero e iniciar el proceso de corrosión.
13. Cuando algunos objetos ahogados en el concreto tales como los tornillos, deben sobresalir de su superficie y se encuentran en un ambiente corrosivo, se debe prestar especial interés a la resistencia del metal seleccionado y al tipo de ambiente corrosivo, evitándose totalmente que el metal entre en contacto con otro metal diferente dentro del concreto, cuidando que el concreto esté bien colocado alrededor de los objetos sobresalientes.
14. No se deben situar armados en las juntas de concreto en donde éste corre el peligro de ser poroso.
15. En lo referente a los apoyos para varillas se debe procurar que las partes inferiores (patas de los apoyos) queden protegidas contra la corrosión, esto con el fin de minimizar las manchas de óxido en la superficie del concreto y/o causar daños estructurales a los elementos. Dicha protección puede lograrse con recubrimientos plásticos o empleando, totalmente o en parte acero inoxidable. A continuación se describirán estas dos últimas posibilidades tendientes a reducir los riesgos de corrosión:
 - Apoyos de varilla con protección de plástico.- Proporcionan protección máxima, por lo cual se utilizan en obras con exposición al medio ambiente moderada a severa. Los apoyos con protección plástica generalmente se fabrican en alambre de acero. De acuerdo a prácticas estándar en la construcción, la protección plástica puede aplicarse mediante inmersión o añadiendo piezas de plástico premoldeado en las patas del apoyo. Para estos métodos de protección debe poder demostrarse adecuadamente que el plástico del apoyo no se romperá, deformará o raspará bajo condiciones de trabajo normales.

- Apoyos de varilla con protección de acero inoxidable.- Proporcionan protección media y se utilizan en obras con exposición al medio ambiente moderada. Una punta de acero inoxidable se une al extremo de cada pata de modo que ninguna parte del alambre de acero no inoxidable se encuentre a cierta distancia de la superficie de la cimbra. De acuerdo a prácticas estándar en la construcción, las patas del apoyo pueden fabricarse totalmente de alambre de acero inoxidable, con lo cual se eliminará la necesidad de añadir las puntas de acero inoxidable a los apoyos de alambre normal.

16. Emplear apoyos adecuados para varillas de refuerzo con recubrimiento epóxico. Las varillas recubiertas con epóxicos son un método de protección contra la corrosión ampliamente utilizado en estructuras de concreto reforzado, sin embargo, deben usarse apoyos especiales para estas varillas. El propósito de estos apoyos especiales es disminuir los daños ocasionados al recubrimiento anticorrosivo durante la colocación de las varillas y evitar la introducción de un fuerte potencial corrosivo en las cercanías del punto de contacto entre el apoyo y la varilla.

Las recomendaciones del Concrete Reinforcing Steel Institute (CRSI) (6) sobre la materia señalan que:

- Los apoyos de alambre deben ser cubiertos con un material dieléctrico²⁷, como el plástico y resinas epóxicas compatibles con el concreto un mínimo de 2 pulgadas (5 cm) del punto de contacto con las varillas recubiertas.
- Los apoyos deben estar hechos con un material dieléctrico. Si es que se utilizan bloques con alambres de amarre o con espigas de sujeción, los alambres y varillas deben estar recubiertos de plástico o con una resina epóxica.

Las varillas de refuerzo que se usen como apoyos deben estar recubiertas con epóxicos. En muros reforzados con varillas recubiertas, las varillas de separación también deben estar recubiertas con epóxico.

²⁷ Dieléctrico.- cuerpo mal conductor de la electricidad.

6.1.2 RECOMENDACIONES SOBRE EL CEMENTO Y LOS AGREGADOS

1. Algunos investigadores consideran que el cemento Portland es el que proporciona la mayor reserva alcalina, lo que significa un coeficiente de seguridad frente al ataque por cloruros o a la carbonatación.
2. Si se necesitan concretos más impermeables, se puede recurrir al uso de adiciones como puzolanas o cenizas volantes²⁸. Cuando los concretos con adiciones han tenido un curado adecuado poseen un grado de permeabilidad mucho mayor que el que se obtiene con un concreto de cemento portland. De esta manera el tiempo que tarda el agresivo-para llegar al armado en concretos con adiciones es mayor que para un concreto con cemento portland normal.
3. Los agregados no deben contener impurezas capaces de oxidar localmente los armados, por ejemplo, escorias porosas que contengan cantidades apreciables de sulfuros de hierro o calcio y sulfatos. La granulometría de los agregados del concreto debe ser tal que presente un mínimo de vacíos.
4. Los agregados no deben contener impurezas orgánicas, capaces de descomponerse y provocar alguna reacción con los componentes del concreto, o simplemente ocasionar la formación de oquedades dentro del mismo, lo que repercutiría en la permeabilidad.

6.1.3 RECOMENDACIONES TENDIENTES A LOGRAR LA REDUCCIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO

1. El aporte del agua a la mezcla debe ser suficiente para lograr un correcto amasado, pero debe evitarse un gran exceso ya que aumentará la porosidad y disminuirá la resistencia a la compresión del concreto. Se debe cumplir lo más fielmente la dosificación que previamente se diseñó y probó en el campo.

²⁸ Ver capítulo 3, aditivos para el concreto

2. Respecto al curado, es necesario que el mortero cementante contenga el agua necesaria hasta que el concreto alcance la resistencia esperada. Para ello es conveniente mantener la humedad en el concreto, mojando de manera adecuada la superficie, por lo menos durante los siete primeros días de curado.
3. Un buen curado es adecuado para garantizar la hidratación del cemento al grado requerido según las condiciones de permeabilidad y durabilidad establecidas, este curado puede conseguirse mediante el empleo de agua por inundación del área o aspersión continua, mediante el empleo de trapos húmedos, plásticos, etc.; o mediante el uso de compuestos específicos, los cuales deben cumplir con las normas vigentes, especialmente en lo que respecta a retención de agua.
4. Se debe de trabajar con la relación agua/cemento más baja posible para obtener concretos de baja permeabilidad:

Una baja relación agua/cemento produce un concreto menos permeable y con mayor resistencia a la corrosión. Se ha encontrado experimentalmente que en pruebas de exposición de pilotes en agua de mar se obtiene una buena protección contra la corrosión si el recubrimiento nominal sobre el acero es de 4cm y la relación agua/cemento es de 0.45 (por peso). Una relación a/c de 0.53 proporciona una protección mediana y una relación a/c de 0.62 una protección deficiente. Pruebas de exposición en losas arrojaron resultados similares; el concreto con relación agua/cemento de 0.40 se comportó significativamente mejor que otros concretos con relaciones de 0.50 y 0.60, aún en el caso de contener cantidades de cemento iguales. Por lo tanto, la relación agua/cemento en concretos con agua de mar, con agua que contenga sales o que estén en contacto con concentraciones de cloruros más que moderadas no debe exceder de 0.40, tanto en el caso de que esta concentración se encuentre en el nivel del suelo o en el del agua, como en el caso en que el concreto se encuentre dentro del área de fructuación de estos niveles o esté expuesto a salpicaduras. Si no se puede lograr esta relación agua/cemento, se puede emplear una relación de 0.45

siempre que se aumente el espesor de recubrimiento de concreto sobre cualquier pieza metálica en 1.3cm.

5. En concretos colocados hasta 8m sobre el nivel de las aguas de mar o sus salpicaduras, o dentro de una distancia horizontal de 30m, la relación *agua/cemento* no debe exceder de 0.50 por peso. Estos límites recomendados se aplican a todos los tipos de cemento portland, aunque algunos estudios a largo plazo sobre la durabilidad del concreto expuesto, mostraron que el cemento con un contenido del 5 al 8% de aluminato tricálcico (C_3A) presentan menor agrietamiento provocado por la corrosión del acero que el cemento con un contenido menor al 5% de dicho material.
6. Una baja relación *agua/cemento* no asegura por si sola la obtención de un concreto de baja permeabilidad. Como un ejemplo se puede citar el concreto llamado "sin finos" que puede tener una baja relación *agua/cemento* y ser altamente permeable, lo que se pone de manifiesto cuando se usa este tipo de concreto para fabricar tubería porosa. En consecuencia, para obtener baja permeabilidad también es necesario utilizar agregados gruesos y finos bien graduados.
7. El coeficiente de permeabilidad puede reducirse aún más si densificamos el concreto. La microsilica es un material cuya finura (unas 100 veces mayor a la del cemento) le permite actuar como microrelleno, ocupando los espacios vacíos que dejan los poros capilares, disminuyendo de esta manera el volumen total de poros y por ende la permeabilidad. Además la microsilica reacciona con los productos de hidratación del cemento produciendo una cantidad adicional de compuestos fuertemente cementantes, contribuyendo de esta manera al desarrollo de resistencia mecánica en las mezclas tratadas con este material. Típicamente, la microsilica se emplea en dosificaciones que van entre el 5 y el 12% del peso del cemento, ya sea como sustituto del mismo o en adición, según sea el objetivo.

8. El empleo de fibras en las mezclas o conglomerados cementantes es tan antiguo como la existencia de éstos, y persiguen fundamentalmente proporcionar un refuerzo interno al conglomerado.

Las fibras de polipropileno en particular tienen gran difusión en cuanto a su uso, pues proporciona un refuerzo triaxial interno en el concreto o mortero, minimizando o impidiendo la aparición de fisuras y microfisuras originadas por la retracción plástica por secado. Debido a esta propiedad se pueden emplear como sustituto del armado por temperatura, con la ventaja en ambientes de tipo agresivo de no ser susceptibles de corrosión. Es importante recalcar que no son sustitutos de un curado adecuado.

6.1.4 RECOMENDACIONES SOBRE EL ACERO

1. Una reacción ácida puede producirse mediante electrólisis, de modo que el armado puede oxidarse por corrientes vagabundas, por lo tanto, no es recomendable utilizar los armados como pararrayos.
2. Es necesario que los aceros pretensados sean almacenados en un ambiente completamente seco. El tratamiento con un aceite lavable protector contra la corrosión les confiere una mayor sensibilidad y tiene la ventaja de disminuir un poco la fricción de los haces de las vainas de los cables pretensados. El aceite deberá eliminarse antes de la inyección del mortero de cemento, esto mediante un vigoroso enjuague final de las vainas con un producto especial.
3. Cuando se diseñe con varillas de refuerzo recubiertas ya sea con resinas epóxicas o con zinc (galvanizadas), el ingeniero debe tener en cuenta que éstas requieren de más procesos de fabricación que las varillas normales. El proceso de recubrimiento incrementa la duración del ciclo de producción. El remplazo de las varillas recubiertas para corregir imperfecciones puede ser tardado. Por lo tanto, es especialmente importante que el ingeniero señale en el contrato los requerimientos específicos completos para el uso de varillas de este tipo. Para

evitar confusiones en los proyectos en que se utilizan varillas recubiertas y sin recubrir, el ingeniero debe identificar con precisión en los planos cuales varillas son recubiertas.

Generalmente una nota al respecto es poco útil. Las varillas de refuerzo en un elemento estructural deben identificarse si es que son recubiertas ya sea con una letra o con un símbolo sobre el plano.

4. No debe permitirse el uso de varillas de refuerzo sin recubrimiento ni de insertos de metal distinto al zinc cerca de varillas de refuerzo galvanizadas excepto en el caso específico de un sistema de protección catódica. Las varillas recubiertas de zinc (galvanizadas) no deben ser acopladas mecánicamente con varillas sin recubrimiento.

6.2 REVESTIMIENTOS SOBRE LAS BARRAS DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN.

6.2.1 REVESTIMIENTOS METÁLICOS.

Dentro de los métodos empleados para revestir las barras de acero de construcción con el fin de eliminar la corrosión, se pueden citar los siguientes según su importancia :

1. Fusión: Consiste en el revestimiento con una delgada capa de zinc, estaño o plomo, mediante inmersión en un baño en estado líquido.

1.1. Estañado.- Para el recubrimiento de un objeto metálico con este material, se calienta en un horno el estaño a una temperatura superior a su punto de fusión, 232°C. Después de haber sido limpiado y secado, se trata con cloruro de zinc o cloruro amónico para disolver las capas de óxido y con colofonia²⁹

²⁹ Resina sólida, translúcida, pardusca o amarillenta e inflamable residuo de destilación de la trementina.

fundida para evitar se vuelva a oxidar, finalmente, se introduce en estaño fundido y se frota uniformemente con una muñequilla de estopa.

- 1.2. Galvanizado o zincado.- Es el recubrimiento del hierro con una película de zinc. Para ello se empieza por tratar con un mordiente de ácido clorhídrico o sulfúrico diluido para dejar la superficie lo más limpia posible, lavando después y fregando con arena.

La galvanización en caliente consiste en la inmersión de la pieza de acero en un baño de zinc fundido a 440 o 460°C. El zinc fundido se protege con una capa de cloruro amónico, para que no arda. La duración de la inmersión es proporcional al espesor de recubrimiento que se desea conseguir, que a su vez viene fijado por la duración futura que se quiere alcanzar y que normalmente en procesos discontinuos suele ser de 2 a 5 minutos. Trasladándose después a una vasija con agua fría o con aceite, hasta su total enfriamiento, siendo después lavado con aserrín.

Este procedimiento proporciona un recubrimiento formado por una capa exterior de zinc puro y varias capas de aleación fierro-zinc, unidas metalúrgicamente al metal base y con unas proporciones decrecientes en zinc, desde el exterior hasta el acero.

Las barras se galvanizan usualmente después del proceso de corte y habilitado, y no hay que olvidar que existen requisitos complementarios aplicables al revestimiento de bordes recortados y a la reparación de revestimientos dañados cuando las barras se habilitan después del proceso de galvanización. En cuanto a la adherencia : el acero galvanizado en general, presenta una menor adherencia al concreto que el acero sin galvanizar; ésta puede mejorar y situarse en valores similares a los del acero sin galvanizar

cuando se añaden al concreto cromatos que inhiben el desprendimiento de hidrógeno.

Existe en la actualidad una importante polémica sobre si esta protección adicional de los armados alarga o no significativamente la vida útil de las estructuras. Las principales interrogantes que plantea el uso de acero galvanizado embebido en concreto son que al elevado pH originado por la alcalinidad del cemento, el zinc se encuentra en la zona de corrosión y desprendimiento de hidrógeno. Esto significa que el galvanizado, al ponerse en contacto con el concreto, se corroe desprendiendo hidrógeno continuamente, el cual puede fragilizar al acero y además, al quedar aprisionadas las burbujas de gas sobre el metal por el fraguado del cemento, se produce una menor superficie de contacto entre el armado y el concreto que se traduce en una menor adherencia. Sin embargo, en la práctica esta corrosión no progresa indefinidamente, ya que los productos de la corrosión son insolubles provocando capas protectoras que terminan pasivando los armados. En esta pasivación del galvanizado en medios muy alcalinos es en la que se basan los investigadores que propugnan su compatibilidad con el concreto, unida al hecho de que los productos de corrosión del zinc son poco expansivos con la consiguiente disminución del riesgo de fisuración del concreto. Sin embargo la dispersión de los resultados es fruto de que algunos autores aseguran que la pasivación no se genera, y que la cinética es tal, que en pocos años se produce la disolución completa del recubrimiento galvanizado.

2. *Pulverización.*- Consiste en fundir un metal en forma de hilo mediante un arco voltaico o soplete oxhídrico y proyectarlo a pistola con aire comprimido sobre el objeto a recubrir, en donde se solidifican las gotas.

3. *Sherardización*.- Las piezas se introducen en tambores giratorios que contienen el metal de recubrimiento en forma de polvo; se calientan hasta una temperatura próxima al punto de fusión del metal de cubierta, penetrando el polvo metálico y adheriéndose al metal base.

6.2.2 REVESTIMIENTOS NO METÁLICOS.

1. *Pinturas*.- Las pinturas son una buena respuesta inhibiendo la corrosión del metal, pero con limitaciones en el uso de materiales tóxicos o peligrosos y con la necesidad de técnicas de preparación y aplicación de bajo riesgo para los operarios.

Si se considera el total de gastos involucrados en la limpieza y pintado, el costo de la pintura representa como máximo el 20% del mismo, lo que indica la conveniencia de utilizar materiales de buena calidad para aumentar el período de duración de la protección. La mayor calidad se logra con productos que posean excelentes propiedades de resistencia mecánica y buena resistencia a agentes químicos (agua, iones, sales, etc.).

El ataque puede ocurrir por permeabilidad de la membrana o por poros producidos durante la evaporación de los disolventes. Éstos pueden reducirse aplicando varias capas, de manera que los poros de una queden bloqueados por zonas de continuidad de la siguiente.

ACCIÓN PROTECTORA DE LAS PINTURAS

Teóricamente existen tres caminos para detener el flujo de corriente generado en las pilas de corrosión: suprimir la reacción catódica, suprimir la reacción anódica o insertar en el electrolito una resistencia que se oponga al

movimiento de los iones. Estos tres mecanismos se denominan respectivamente inhibición catódica, inhibición anódica e inhibición por resistencia.

A) En la inhibición anódica se impide el contacto entre el metal, el agua y el oxígeno, con una película impermeable al agua y al oxígeno, sin embargo, no resulta totalmente eficaz pues no son suficientemente impermeables para inhibir la reacción, especialmente cuando los espesores son menores a $100\mu\text{m}$.

B) Se puede modificar el potencial eléctrico del hierro, haciéndolo suficientemente negativo con respecto a otro metal, denominado usualmente protección catódica. El acero se contacta con otro metal más electropositivo, por ejemplo el zinc, en pinturas ricas en este material o mediante la complementación por ánodos. En estas condiciones el zinc actúa como ánodo sacrificable.

C) Otro método es recubrirlo con una película de propiedades pasivantes, que solubiliza al contacto con el agua. Pueden ser pigmentos solubles, como el cromato básico o el tetroxicromato de zinc. La sustancia solubilizada forma una película inhibidora de cromatos complejos.

Estas acciones se completa con ligantes (formadores de película) de elevada resistencia electrolítica, que crean una barrera al ingreso de iones al interior del sistema y la probabilidad de que entren en contacto con el metal.

FACTORES CONSIDERADOS PARA LA PROTECCIÓN MEDIANTE PINTURAS

Existen varios factores a considerar para la protección óptima de superficies metálicas, entre los cuales podemos citar los siguientes:

- a) Espesor de película adecuado.
- b) Buena resistencia al agua con baja absorción.
- c) No presentar ampollado, ablandamiento, hinchamiento o pérdida de adhesión por agua que penetra en la película y que es retenida en los espacios intermoleculares del polímero³⁰, según la resina empleada.
- d) Resistente a la transferencia de vapor de agua, lo que se refiere a la posibilidad de filtrar agua en forma molecular a través de las cubiertas.
- e) Resistencia al paso de iones, la membrana impide la penetración de cloruro, sulfato, carbonato; iones que iniciarían o acelerarían la corrosión al ponerse en contacto con el metal.
- f) Buena adherencia sobre diferentes superficies, con adecuada flexibilidad a fin de acompañar los movimientos de las estructuras.

Debe mencionarse además, que deben ser de rápido secado, para evitar el depósito de impurezas y estar elaboradas con solventes no tóxicos y un alto contenido de sólidos para proporcionar películas de espesor suficiente.

METODOLOGÍA DE APLICACIÓN

Se aplican a las superficies libres de óxidos, para lo cual se limpian con cepillos de alambres o sopletes de chorro de arena. Lo más simple es aplicar un fondo anticorrosivo en una o dos capas directamente en contacto con el metal.

Después aplicar una pintura intermedia, siendo aquellas que se aplican sobre los fondos anticorrosivos y no contienen pigmentos inhibidores. Sin embargo, tienen elevada resistencia a la acción del electrólito y contribuyen a incrementar el efecto barrera y la impermeabilidad del sistema, sin aumentar exageradamente los

³⁰ Cuerpos que tienen la misma composición química, pero cuyos pesos moleculares son múltiplos unos de otros.

costos. Finalmente, las pinturas de terminación deben ser resistentes a la acción de los diferentes medios agresivos (intemperie, agua, ácidos, álcalis o disolventes).

El espesor total debe incrementarse en relación directa con la agresividad del medio. La tabla 6.1 muestra los espesores recomendados para brindar una protección adecuada para diferentes condiciones; éstos se refieren a la película seca después de la eliminación de disolventes y diluyentes.

TABLA 6.1
ESPEORES RECOMENDADOS DE PELÍCULA DE PINTURA PARA
DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES.

TIPO DE AMBIENTE	ESPESOR EN μ
Atmósfera no contaminada	10-50
Atmósfera medianamente contaminada	50-100
Atmósfera altamente contaminada (industrial y marina)	100-150
Inmersión continua en agua de mar	250-350
Contacto permanente con líquidos muy agresivos	350-500

En sí estos métodos son relativamente costosos y poco prácticos en la construcción, esto debido a las severas condiciones de transporte, almacenamiento y colocación que sufren los materiales (barras de acero); y a la existencia de cierta incertidumbre en lo referente a la adherencia entre el acero y el concreto; sin embargo, existen y se siguen perfeccionando, así pues, si no son una solución óptima si representan otra alternativa.

2. *Epóxicos*.- Las barras revestidas con sustancias epóxicas, son en la actualidad más usadas que las galvanizadas. El revestimiento con sustancias epóxicas tiene

el fin de minimizar la corrosión del acero de refuerzo. En general, el revestimiento se aplica a las barras rectas en una operación de producción en línea y las barras se cortan y doblan después de esta operación. Los bordes recortados y pequeños puntos con revestimiento defectuoso se reparan de manera satisfactoria después de la fabricación.

Debe tenerse especial cuidado en la obra para evitar daños sobre el revestimiento, bien sea durante el envío, durante el almacenamiento o durante la colocación y debe asegurarse en caso de que haya algún daño se hagan las reparaciones convenientes.

6.2.3 ACERO INOXIDABLE.

Al agregar cromo entre el 13 y el 21% al acero al carbono, se produce una alta resistencia a la corrosión, pero el cromo tiende a aumentar el grano en la estructura por lo que el níquel es generalmente agregado al acero inoxidable para contrarrestar esto.

El acero inoxidable más usual es el denominado 18/8, esto es, tiene 18% de cromo y el 8% de níquel. Tiene una muy alta resistencia a la corrosión y es mucho más resistente que el acero de bajo carbono y puede ser maquinado por métodos comunes, tienen un alto brillo y se sueldan fácilmente.

Cuando se sueldan estos aceros, algunas veces sufre deterioro el material cerca de la soldadura en una estrecha zona paralela a ésta (alrededor de 1/8" es lo que se muestra atacado) y presenta un caso serio ya que puede pulverizarse, esta es la llamada soldadura desmoronada y puede ser provocada por un calentamiento de la pieza a temperaturas de entre 1000 y 1150°C. Dicho problema puede ser aminorado por la adición de 1% de algún otro elemento como el niobio o

titanio. El empleo de éste material es caro, por lo cual no es muy usado ya que los costos se incrementan fuertemente.

6.3 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Desde hace algunos años ciertos investigadores (7) han ensayado la adición de productos destinados a evitar la corrosión de las barras de acero. Los inhibidores de corrosión han sido utilizados como método de protección de los armados, añadidos como aditivo al agua de mezclado del concreto. Los inhibidores de corrosión inorgánicos más conocidos tienen su base química en el nitrito de calcio.

En comparación con otros métodos de protección de los armados, presentan como ventajas:

- a) No se necesita para su aplicación mano de obra especializada.
- b) No resultan comparativamente demasiado costosos.
- c) Estos inhibidores (o aditivos de pasivación) permiten la adición sin peligro de entre 1 y 2% (con relación al peso del cemento) de cloruros de calcio, que es uno de los aceleradores más poderosos que se conocen pero cuyo empleo está reglamentado.

Sus principales inconvenientes son:

- a) Su acción puede dejar de ser eficaz con el tiempo.
- b) Es necesario calcular la concentración crítica mínima en función de la dosificación del concreto, el estado superficial del acero y la agresividad del medio (humedad relativa y proporción de cloruros máximos previsibles).

c) Deben ser totalmente compatibles con el concreto, es decir, no deben modificar las características físico-químicas y mecánicas de éste, lo que supone una restricción considerable del número de inhibidores a poder utilizar.

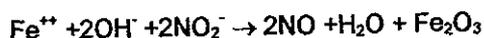
Los inhibidores de corrosión enfrentan el problema de la corrosión bajo una óptica diferente. Ellos no tienen como función principal prevenir o impedir el ingreso de los cloruros, sino proteger la capa pasivada (actúan formando en la superficie del metal una película protectora muy insoluble), y dependiendo de su base y origen consiguen esto por diferentes mecanismos.

Los inhibidores químicos que más frecuentemente son utilizados disueltos en el agua de mezclado del concreto en dosis variables que van desde el 1% hasta el 3% del peso de cemento, son los siguientes:

- Nitrito sódico: NaNO_2
- Nitrito de calcio: $(\text{NO}_2)_2\text{Ca}$
- Cromato potásico: K_2CrO_4
- Molibdatos de sodio o de potasio: Na_2MoO_4 , K_2MoO_4
- Fosfatos

Igualmente, puede añadirse una cantidad del orden del 10% de estos productos a una lechada de cemento destinada a recubrir los armados de acero antes del vertido del concreto en los encofrados o moldes.

Hasta el momento, los inhibidores que han resultado mas compatibles y eficaces son el nitrito sódico NaNO_2 y el nitrito de calcio $(\text{NO}_2)_2\text{Ca}$. El mecanismo inhibitor de los NO_2^- en el concreto parece ser que consiste en que reaccionan con los iones ferrosos para dar un óxido férrico estable, compacto y adherente.



Este óxido tiene una características pasivante tal que se necesita una mayor proporción de cloruros para destruir la capa de pasividad que se forma sobre los armados. Los nitritos actúan estableciendo reacciones de tipo competitivo con los iones de cloro, con lo que siempre que se encuentren presentes en concentraciones suficientemente altas en relación a la concentración de cloruros, conseguirán impedir la reacción entre hierro y cloruro, bloqueando así el desarrollo del proceso de corrosión.

Se ha comprobado que la incidencia de hasta 2 o 3% de NO_2Na y de $(\text{NO}_2)_2\text{Ca}$ sobre las características físico-químicas y mecánicas del concreto es pequeña: aumenta algo la trabajabilidad, reduce la cantidad de agua necesaria para pasta de consistencia normal y mejora en algunos casos la resistencia mecánica. El ion Na^+ aportado por el NO_2Na puede ser, en cambio perjudicial con respecto de determinados agregados y cementos.

Los principales inconvenientes en cuanto al uso de los inhibidores en base a nitritos se centran en la necesidad de conocer las concentraciones probables de cloruros en el medio para poder establecer la dosis de nitrito, así como la necesidad de que el concreto tratado se encuentre en contacto con el acero; esto implica que en caso de fisuras se pierde casi totalmente la protección, iniciándose un proceso de corrosión que puede verse incluso acelerado por disminuir el nitrito la resistividad del concreto. Por otra parte, el nitrito actúa como un ligero acelerante del proceso de fraguado.

Existen inhibidores de corrosión en base a compuestos orgánicos. Estos inhibidores actúan por un mecanismo de adsorción³¹ sobre el acero, obteniéndose

³¹ Formación de una película delgada de líquido en la superficie de un sólido, o la condensación de las moléculas de un gas, o de una sustancia disuelta en la misma superficie.

una película de espesor molecular que protege y estabiliza la capa pasivada, y cuyo efecto se mantiene aun en ausencia de contacto directo del concreto con el acero (por ejemplo, en caso de fisuras).

Dentro del grupo de inhibidores orgánicos de corrosión vale la pena destacar la aplicación de la tecnología de los MCI (Migrating Corrosión Inhibitors, o Inhibidores de Corrosión Migratorios). Estos inhibidores muestran la propiedad de "migrar" a través del concreto por distancias de 1 a 2 metros, con lo cual, además de emplearse como constituyentes de la formulación original del concreto, puede extenderse su uso al tratamiento preventivo de la corrosión en estructuras donde el concreto original no haya sido tratado, o a tratamientos correctivos, en caso en donde se esté desarrollando un proceso de corrosión para detener el avance del mismo.

6.4 ESPECIFICACIONES TENDIENTES A LA PREVENCIÓN O AMINORACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN

Los reglamentos sobre construcción así como las normas e instrucciones que rigen el proyecto y la ejecución de obras de concreto reforzado y presforzado especifican habitualmente los umbrales críticos de contenidos de cloruros (ion cloruro Cl⁻) en los componentes del concreto, aunque sería más adecuado fijar limitaciones al contenido total de los iones cloruro en el concreto, en lugar de establecerlo en los componentes por separado.

En la tabla 6.2 se indican los contenidos máximos recomendados por el reglamento CIRSOC 201 en Argentina y por el ACI-318 en Estados Unidos.

Según el CIRSOC, la cantidad de cloruros aportados al concreto por los agregados y aditivos *no deben incrementar* los contenidos máximos especificados por el agua de mezclado.

El Comité Europeo del Concreto (CEB) no define tácitamente los valores críticos del ion cloruro, comentando que para concreto armado el límite sobre el cual la protección no es segura está comprendido entre 0.35% y 1.0% de ion cloruro(Cl^-) respecto al peso del cemento.

En la tabla 6.3 se incluyen los contenidos máximos de los dos iones agresivos más frecuentes que son los cloruros y los sulfatos, admitidos en algunos de los *componentes del concreto por varias de las normas y reglamentos europeos vigentes.*

Por lo que respecta al empleo de aditivos aceleradores del fraguado y del endurecimiento del concreto, preparados con cloruros, que constituye el origen más frecuente de estos productos, la instrucción española EH-73 (8), solo hace referencia al empleo del cloruro cálcico, que es el aditivo más conocido y de uso más frecuente para el fin indicado. Dicha instrucción no se pronuncia sobre la proporción máxima en que este aditivo puede ser usado en los concretos armados, aunque indirectamente establece como límite máximo el valor de 1.5 a 2.0% del peso del cemento. *El empleo de este aditivo queda totalmente prohibido en los concretos presforzados.*

TABLA 6.2

* NIVELES MÁXIMOS DE Cl RECOMENDADOS POR ALGUNOS REGLAMENTOS

CONCRETO	CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	ACI (% en peso del cemento)	CIRSOC (ppm ³² agua de mezclado)
PRETENSADO	-	0.06	150
ARMADO	Humedad y cloruros en el medio	0.15	1000
	Humedad	0.30	1000
	Seco	1.0	1000
SIMPLE	-	-	2000

TABLA 6.3

LIMITACIONES ESTABLECIDAS POR ALGUNAS NORMAS EUROPEAS A LOS CONTENIDOS DE CLORUROS Y SULFATOS EN LOS COMPONENTES DEL CONCRETO.

PAÍS	NORMA O INSTRUCCIÓN	TIPO DE CONCRETO	CONTENIDO MÁXIMO DE Cl (%)			CONTENIDO MÁXIMO DE SO ₄ (%)		
			PERMITIDO EN:			PERMITIDO EN:		
			ARENA	GRAVA	AGUA	ARENA	GRAVA	AGUA
ESPAÑA	EH-73	ARMADO	-	-	0.6	1.0	1.0	0.083
	EP-77	PRETENSADO	0.03	0.03	0.025	0.41	0.1	0.083
INGLATERRA	THE GREATER LONDON COUNCIL	ARMADO	-	-	-	-	-	-
		PRETENSADO	0.06	0.018	-	-	-	-
HOLANDA	NEN 3542	ARMADO	0.1	0.05	-	-	-	-
		PRETENSADO	0.01	0.005	-	-	-	-
ALEMANIA	DIN 4226	ARMADO	-	-	0.1	-	-	-
		PRETENSADO	0.02	0.02	0.05	-	-	-
AUSTRIA	ÖNORM B3304	ARMADO	-	-	-	-	-	-
		PRETENSADO	0.01	0.01	-	0.15	0.15	-

³² ppm.- partes por millon.

Otras normas europeas establecen prescripciones en relación con el ion cloruro, no para los constituyentes del concreto considerados aisladamente, sino para el material en su conjunto, determinado como la suma del contenido de Cl^- en los agregados, agua, cemento y aditivos. Así, en el DTU (9), norma italiana, se establece que el contenido total de cloruros, expresados como ion Cl^- , deberá ser en los concretos armados como máximo del 0.65% del peso del cemento.

En la tabla 6.4 se muestran los valores de espesores recomendados por las normas españolas EH-88 (10) y en la tabla 6.5 se presentan los resultados de algunos investigadores y los niveles límite establecidos por algunos reglamentos.

TABLA 6.4
RECUBRIMIENTOS MÍNIMOS EN mm, SEGÚN LA INSTRUCCIÓN EH-88
(EL PARÁMETRO f_{ck} , RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN,
SE EXPRESA EN MPa.)

Condiciones ambientales de la estructura	Elementos en general			Piezas prefabricadas		
	$f_{ck} < 25$	$25 \leq f_{ck} < 40$	$f_{ck} \leq 40$	$f_{ck} < 25$	$25 \leq f_{ck} < 40$	$f_{ck} \leq 40$
I -Interior de edificios -Exteriores bajo humedad	20	15	15	15	15	15
II -Exteriores normales -Contacto con aguas normales	30	25	20	25	20	20
III -Atmósfera marina o industrial -Contacto con el terreno -Contacto con aguas salinas o ligeramente ácidas	40	35	30	35	30	25

TABLA 6.5
NIVELES DE CLORUROS INICIADORES DE LA CORROSIÓN EN EL CONCRETO
REFORZADO SEGÚN VARIOS INVESTIGADORES Y REGLAMENTOS DE
ALGUNOS PAÍSES.

AUTOR O REGLAMENTO	AÑO	CONTENIDO DE CLORUROS LIMITE	
		(Kg/m ³ de Concreto)	(% por peso de cemento)
Hausmann	1967	0.2-2.8	-
Clear	1976	0.81	0.2
Everett y Treadway	1980	-	0.4-1.0
Berke y Gau	1982	0.6-0.9	-
Comité Euro-Internacional du Beton (Europa)	1982	-	0.35-1
FWHA (Estados Unidos)	1985	-	0.3
BS-8110-1985 (Reino Unido)	1985	-	0.2-0.4 *
RILEM	1987	-	0.4-1.0
EH-88 (España)**	1988	-	0.4
EN-206 (España)**		-	1.4
ACI-318-89 (Estados Unidos)	1989	-	0.15-0.3-1**
Roy,Liam y Northwood	1993	-	0.4
Mustafa y Yusof	1994	0.376	-
Castro y Maldonado	1994	1.0-2.0	-

* El límite varía en función del tipo de cemento.

** El límite varía en función de la agresividad ambiental.

El contenido límite de cloruros suele expresarse en porcentaje del peso del cemento (% Cl⁻ pp de cemento); en porcentaje por peso de concreto (% Cl⁻ pp de concreto) o en kg de Cl⁻ por m³ de concreto.

En México se han realizado investigaciones (11) para conocer la concentración umbral de cloruros en concreto fabricado con agregados pétreos de trituración y ensayo concretos con diferentes relaciones de cloruros y tiempos de curado. Dichos valores se encuentran entre 1 y 2 kg de Cl⁻/m³ de concreto. Sin embargo estos valores no se pueden generalizar ya que fueron obtenidos para circunstancias específicas.

Como ya se mencionó, si una estructura de concreto reforzado carece de un adecuado espesor de recubrimiento según el ambiente al cual se someterá, estará expuesta a sufrir el ataque corrosivo del medio y de los agentes agresivos que aumenten su intensidad. Considerando este problema, los reglamentos de construcción establecen los recubrimientos mínimos de concreto sobre las armaduras en función del tipo de ambiente de exposición. A continuación, se citaran las recomendaciones que las Normas Técnicas Complementarias de Concreto (12) y el reglamento ACI-318-7.7 señalan al respecto.

N.T.C. de Concreto:

"En elementos no expuestos a la interperie, el recubrimiento libre de toda barra de refuerzo o tendón de preesfuerzo no será menor que su diámetro, ni menor que lo señalado a continuación:

En columnas y trabes, 2 cm; en losas 1.5 cm, y en cascarones, 1 cm. Si las barras forman paquetes, el recubrimiento libre, además, no será menor que 1.5 veces el diámetro de la barra mas gruesa del paquete.

En elementos estructurales colocados contra el suelo, el recubrimiento libre mínimo, además de cumplir con los requisitos anteriores, será de 5 cm si no se usa plantilla, y de 3 cm si se usa plantilla.

En elementos prefabricados que no van a quedar expuestos a la interperie, el recubrimiento libre del refuerzo sin preesforzar no será menor que 1.5 cm, ni que el diámetro de la barra o que 1.5 veces el diámetro de la barra mas gruesa del paquete, en su caso; en losas y cascarones prefabricados puede ser no menor que 1 cm ni que el diámetro de la barra.

En elementos estructurales que van a quedar expuestos a la interperie, se duplicarán los valores de los párrafos anteriores.

Los recubrimientos antes señalados se incrementarán en miembros expuestos a agentes agresivos (ciertas sustancias o vapores industriales, terreno particularmente corrosivo, etc.)".

Reglamento ACI-318 (13):

"Para concreto vaciado en el sitio, la protección de concreto para superficies no expuestas directamente al terreno o a la interperie no debe ser menor que $\frac{3}{4}$ de pulgada (1.9 cm) para losas y muros y que $1 \frac{1}{2}$ pulgada (3.8 cm) para vigas y columnas. Si la superficie de concreto se expone a la interperie o está en contacto con el terreno, se requiere un recubrimiento protector de por lo menos 2 pulgadas (5 cm)³³ excepto que, si el concreto se coloca directamente en contacto con el terreno sin la utilización de formaletas, debe proveerse un recubrimiento de por lo menos 3 pulgadas (7.6 cm).

³³ $1 \frac{1}{2}$ " para barras No. 5 y menores.

En general, los centros de las barras principales a flexión en vigas deben colocarse de $2\frac{1}{2}$ a 3 pulgadas desde la superficie superior o inferior de la viga, con el fin de suministrar un aislamiento libre tanto para las barras como para los estribos, de por lo menos $1\frac{1}{2}$ pulgadas. En losas, 1 pulgada hasta el centro de la barra, por lo general, es suficiente para proveer el aislamiento requerido de $\frac{3}{4}$ de pulgada".

CONCLUSIONES

Tras haber analizado el contenido del trabajo y abocándose a los objetivos planteados como fundamento de éste, se citarán una serie de comentarios personales con el carácter de conclusiones:

Queda de manifiesto la importancia del concreto reforzado como material de construcción, esto como resultado del relativo bajo precio y la versatilidad de formas que puede adoptar, además de la perfecta integración de propiedades tanto del concreto como del acero.

Teniendo como antecedente el desarrollo de éste material a través del tiempo, es fácil comprenderlo y vislumbrarlo como el material más importante en la industria de la construcción ya que, éste ha hecho posible el desarrollo de la infraestructura de todos los países del mundo.

En lo referente a la corrosión como objeto de estudio, es importante resaltar lo recientes que son las investigaciones, las cuales se remontan tan sólo a principios de este siglo, en especial la corrosión que se da en el concreto reforzado, cuyo estudio está varios años atrás respecto a los avances conseguidos en otros campos. Esta situación trae como consecuencia, una serie de lagunas en el conocimiento del problema; que representa campos inminentes de posibles investigaciones para los científicos.

La corrosión no es un mal reciente, lo que es reciente es el interés por conocer sus mecanismos y efectos, esto debido a que conforme evoluciona el concreto reforzado y las exigencias sobre él son mayores, todos los factores que influyen o más bien, que fomentan su deterioro, se convierten en críticos.

La forma de ver y de entender a la corrosión es fundamental, ya que no se trata de un proceso aislado y ajeno al medio, sino de un proceso espontáneo de deterioro y destrucción debido a reacciones con el medio ambiente, inherentes al mismo material, que tiene como fin regresar a su estado *original*. Así que, en la medida que los ingenieros, arquitectos y en sí toda aquella persona responsable de ejecutar las obras lo entiendan, será más fácil el analizar, tratar y prevenir el mal.

En cuanto a la importancia que representa el conocer, prevenir y tratar de eliminar la corrosión, queda manifiesta a lo largo del trabajo ya que, sabiendo sus efectos físicos y las implicaciones económicas que representa, es fácil entender la importancia que cobra su prevención en un país como México, con regiones propicias para el desarrollo de este problema, tales como las zonas costeras, donde existen compuestos agresivos en el ambiente además de una gran humedad y temperatura, así como las grandes ciudades con atmósferas altamente contaminadas y hostiles.

Finalmente, cabe hacer mención del alcance del trabajo, el cual deja grandes áreas sin explorar, que son potenciales temas de interés para tratar en trabajos posteriores, tales como tesis profesionales o proyectos de investigación. Dichas áreas propuestas por el autor de este trabajo, y a sabiendas del contenido del mismo podrían encaminarse a las siguientes líneas de investigación:

- Detección de la corrosión.
- Formas de medir la corrosión.
- Corrección y reparación de zonas o estructuras dañadas por la corrosión
- Diferentes métodos de corrección.
- Análisis estructural de un edificio dañado por la corrosión, con el fin de planear una reestructuración.
- Evaluación económica de los diferentes medios preventivos y correctivos de la corrosión.

REFERENCIAS

1. R. Baboína. 1990. "Corrosion- A problem of international importance". Corrosion Testing and Evaluation. Silver anniversary volume ASTM STP 1000. Philadelphia, E.U.
2. Ávila/Genescá. Más allá de la herrumbre. La ciencia desde México , No. 9, Ed. Fondo de Cultura Económica. México.
3. Clear, K. C. and Hay, R. E. Apr. 1973. "Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs", V.1. Interim Report No. FHWA-RD-73-32, Federal Highway Administration. E.U.
4. Tuutii, K. Detroit 1985. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. ACI SP-65. E.U.
5. Haussmann, D. 1967. Steel corrosion in concrete, how does it occur?. E.U.
6. 1990. Manual of Standard Practice. Concrete Reinforcing Steel Institute (CRSI).E.U.
7. Amicarelli, V. 1969. Utilisation des inhibiteurs de corrosion dans la protection des armatures des bétons. Italia.
8. 1973. Reglamento EH-73. España.
9. 1983. Norma D T U . Italia.
10. 1988. Reglamento EH-88. España.

REFERENCIAS

11. CASTRO, P. Maldonado. 1995. *Initial efforts to evaluate the corrosion problems in the infraestructure of mexican southeast coastal zones*. Editor NACE International. México.
12. 1994. *Reglamento de Construcciones Para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias*. Diario Oficial de la Federación. México.
13. 1989. *Reglamento Para las Construcciones de Concreto Estructural y Comentarios ACI 318-89*. E.U.

BIBLIOGRAFÍA Y HEMEROGRAFÍA

IMRE, Biczok.

La corrosión del hormigón y su protección.

6a. edición.

Ediciones U.R.M.O.

España, 1972.

PADILLA, Pablo

Cimentaciones y estructuras de hormigón armado. Elementos especiales y cimentaciones. Tomo I.

Editores Técnicos Asociados S.A.

Barcelona, 1970.

Nueva Serie IMCYC.

Durabilidad del concreto ACI-201.

Ed. Limusa.

México, 1980.

VENTURA, Michel.

Aditivos y tratamientos de mortero y hormigón.

Ed. Técnicos Asociados S.A.

Barcelona, 1972.

ORUS Asso, Félix.

Materiales de construcción.

7a. edición.

Ed. Dossat S. A.

Madrid, 1981.

IMCYC.

Manual de prácticas estándar del acero de refuerzo.

Ed. IMCYC.

México, 1994.

GONZÁLEZ Cuevas Óscar, Robles Fernández-Villegas, Francisco.

Aspectos fundamentales del concreto reforzado.

3a. edición.

Ed. Limusa.

México, 1996.

H. NILSON, Arthur, Winter George.

Diseño de estructuras de concreto.

Octava edición.

Ed. Mc Graw -Hill.

México, 1994.

G. NAWY, Edward.

Concreto reforzado, un enfoque básico.

Ed. Prentice Hall.

México, 1988.

ROBLES, Francisco, et. Al.

Apuntes de mecánica de materiales.

Facultad de Ingeniería.

México, 1994.

De BUEN, Óscar, et. Al.

Apuntes de diseño estructural.

Facultad de Ingeniería.

México, 1995.

H. KOSMATKA, Steven, Panarese William C.

Diseño y control de mezclas de concreto.

IMCYC.

México, 1992.

Construcción y Tecnología.

Agosto 1995. México.

Construcción y Tecnología.

Octubre 1995. México.

Construcción y Tecnología.

Enero 1997. México.

Cemento Hormigón No.591.

"Corrosión de las armaduras en el hormigón armado".

Febrero 1983. España.

Cemento Hormigón No.592.

"Corrosión de las armaduras en el hormigón armado".

Marzo 1983. España.

Cemento Hormigón No. 628.

"Medidas de la corrosión en las armaduras de hormigón".

Marzo 1986. España.

Cemento Hormigón No. 653.

"Protección del hormigón contra el deterioro".

Abril 1988. España.

Cemento Hormigón No. 689.

"Rehabilitación electroquímica del hormigón".

Enero 1991. España.

Cemento Hormigón No. 719.

"Estudios sobre la corrosión del hormigón armado".

Mayo 1993. España.

Informes de la construcción. Año 33, No. 339.

"Corrosión y protección de armaduras".

Marzo 1982. España.

IMCYC No. 162.

Octubre 1984. México.

IMCYC No. 120.

Abril 1981. México.

Hormigón y acero No. 189.

"Medidas de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón".

España. 1993.

Hormigón y acero No. 193.

"Protección y prevención catódica de las armaduras en las construcciones de hormigón armado y pretensado".

España. 1994.

Hormigón y acero No. 194.

"Evolución experimental de la fisuración del hormigón producida por la corrosión de las armaduras".

España. 1994.

Vivienda, La Revista de la Construcción No. 396.

"Corrosión del acero en estructuras de hormigón armado".

Junio 1995. Argentina.

Vivienda, La Revista de la Construcción No. 398.

"Corrosión y pinturas"

Septiembre 1995. Argentina.

Revista Hormigón No. 21.

"Técnicas para evaluar la difusión de cloruros de hormigón".

Enero-Junio 1992. España.

Concretemos No. 3.

"La corrosión de los aceros de las armaduras en el concreto armado. Aditivos, adiciones e inhibidores de corrosión".

Agosto-Noviembre 1992. España.