CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 El concreto reforzado.

A pesar de que la utilización de los distintos materiales cementicios dentro de la construcción se remonta a los inicios de la civilización, cuando el hombre unía piedra con piedra mediante estos materiales, el concepto del concreto reforzado es relativamente reciente.

En efecto, es hacia 1855 que Lambot y luego en 1861 que Coignet exponen el concepto del refuerzo metálico embebido en el concreto[1,2]. Esta combinación de materiales se basa en el hecho de que el concreto es un material frágil, aunque relativamente fuerte a la compresión. Por otro lado, la varilla de acero es un material resistente a la tensión y muy dúctil, así al combinar estos dos componentes en una estructura, el acero de refuerzo absorberá las cargas a tensión y el concreto soportará las cargas a compresión, ver figura 1.1.

Una definición del concreto reforzado puede obtenerse al considerar los elementos que lo forman. El concreto de uso común se obtiene al mezclar

cemento, agua y otros agregados determinados como arena y grava, también se suelen utilizar otros aditivos. El concreto reforzado se presenta cuando además se introduce un armazón de material metálico a la estructura que está siendo construida con el concreto, ver figura 1.2.

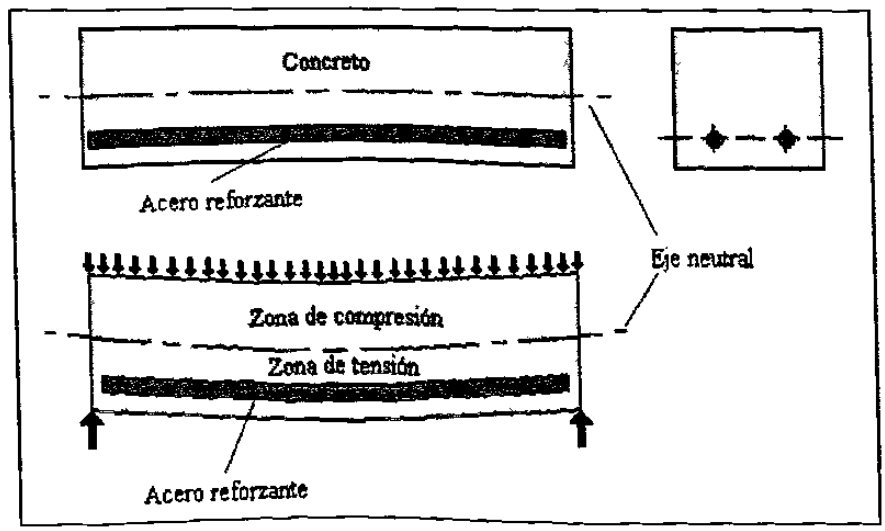


Figura 1.1: Efecto exagerado de una carga sobre una viga construida con concreto reforzado.

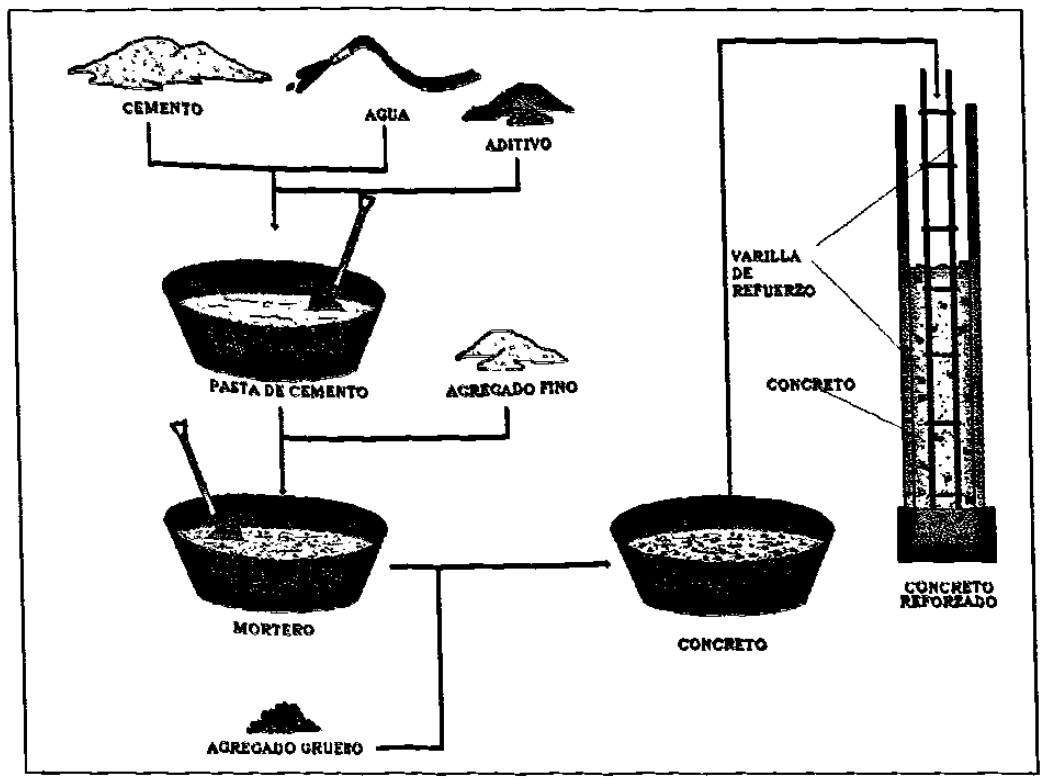


Figura 1.2: Esquema que muestra la constitución del concreto reforzado.

1.2 Reacciones de hidratación en el cemento.

El cemento es un material que se fabrica para obtener un producto polvoso, con un tamaño de grano muy fino y que actúa como conglomerante hidráulico[3], esto quiere decir que cuando el cemento se mezcla con agua se vuelve un material pastoso, que puede fraguar al aire o bajo el agua para endurecer hasta adquirir una consistencia pétrea. Existen mucho tipos de cementos, siendo el más utilizado el cemento Portland.

El cemento Portland está constituido por cuatro componentes básicos, la caliza (CaO), la sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3) y el óxido de hierro (Fe_2O_3), los cuales deben combinarse en proporciones adecuadas[4]. Estos componentes reaccionan con el agua para propiciar el endurecimiento del cemento. Dichas reacciones se conocen como "reacciones de hidratación", de las cuales las más importantes son:

$$2(3CaO{\cdot}SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (1.1)$$
$$2(2CaO{\cdot}SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad (1.2)$$

estas reacciones además de propiciar nuevos compuestos, liberan calor, que caracteriza al fraguado del cemento. Así, el fraguado del cemento mezclado con agua se presenta cuando esta mezcla se vuelve una pasta viscosa y, el desarrollo completo de endurecimiento generalmente se presenta al cabo de 28 días. Sin embargo, el cemento endurecido seguirá presentando transformaciones durante meses e incluso años hasta lograr su estabilidad[3].

Desde el punto de vista de la corrosión de la varilla de refuerzo embebida en el concreto, interesa particularmente la formación del hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) en las reacciones arriba mencionadas, ya que su presencia en la masa de concreto permite que dicha varilla permanezca prácticamente inalterable y sin corroerse.

Una característica particular del concreto es que al endurecer no se conforma como un material completamente compacto, sino más bien poroso. Esto es debido al exceso de agua que se utiliza para su mezcla y manejo, propicia la formación de burbujas de distintos tamaños en la masa de concreto. Cuando el concreto solidifica estas burbujas forman una red de poros en el concreto, cuyo tamaño puede variar en un intervalo de entre unos pocos amstrongs hasta milímetros de diámetro[5]. Una representación de esto se muestra en la figura 1.3.

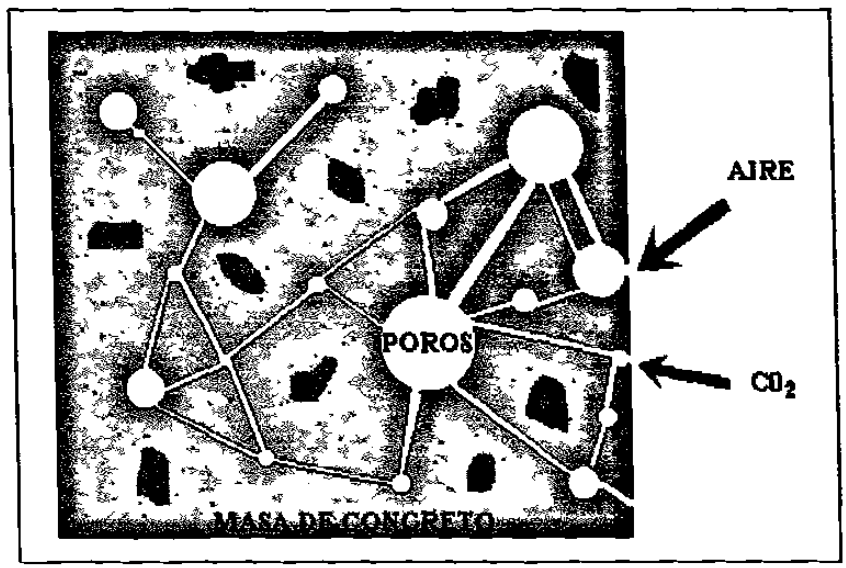


Figura 1.3: Esquema que muestra un sistema de poros en el concreto.

Esta red de poros permite que agentes externos, como la humedad, el aire u otros componentes, puedan penetrar la masa de concreto desde el exterior de la estructura.

1.3 La corrosión.

Es posible definir a la corrosión como el deterioro de un material como consecuencia de reacciones con su entorno[6]. Estas reacciones pueden

involucrar fenómenos químicos, electroquímicos o metalúrgicos cuya velocidad dependerá de diversos factores, entre los cuales se pueden citar la temperatura, la humedad relativa del ambiente, condiciones marinas, etc.

El hombre en su desarrollo tecnológico ha utilizado los materiales que la naturaleza le provee. En ocasiones se ha visto obligado a cambiar muchas de las propiedades de estos materiales para obtener de ellos un mayor provecho. En el caso de los metales y más específicamente del hierro, se han descubierto y mejorado distintos procesos pirometalúrgicos para extraer este elemento de sus compuestos naturales (compuestos que forman óxidos, sulfatos e hidróxidos principalmente).

Por las condiciones que se presentan en nuestro planeta, estos compuestos se encuentran en estado de equilibrio, es decir, son compuestos estables. Para poder extraer el metal de los mismos, es necesario utilizar energía en alguna forma. Esta energía que es utilizada en los procesos de refinación del metal en cuestión, aleja de su estado de equilibrio a dicho metal y entre mayor cantidad de energía se haya empleado, mayor tendencia presentará el metal para volver a su estado de equilibrio, es decir, a formar nuevamente compuestos como óxidos, sulfatos o hidróxidos. Este fenómeno que ha sido conceptualizado se define como "principio de Le Chatelier"[7].

Así, la principal causa para que un material, y en este caso un metal, se corroa es la inestabilidad que presenta en su forma refinada, por lo que su tendencia natural a estados originales de equilibrio se realizará a través de procesos de corrosión[8].

Estos procesos de corrosión involucran reacciones químicas en las que también existe transferencia de electrones, por lo que se recurre a la electroquímica, entre otras ciencias, para estudiarlos. Así, desde un punto de vista electroquímico, las reacciones de corrosión son reacciones de oxidación -

reducción en las cuales un material (o un metal) es atacado por alguna sustancia agresiva y lo convierte en un compuesto diferente al material base.

Para que la corrosión se presente en un sistema determinado es necesario que uno de los elementos que lo forman desarrolle reacciones de "oxidación", mientras que otro de los elementos desarrollará reacciones de "reducción". La oxidación se define como la pérdida de electrones que presenta un elemento, mientras que la reducción es la ganancia de electrones que se ocurre en otro elemento, por ejemplo, al considerar la reacción del zinc en una solución que contiene iones Cu^{2+}:

$$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu \qquad (1.3)$$

esta reacción principal puede descomponerse en dos reacciones medias o semirreacciones de la siguiente manera

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-} \qquad \text{(oxidación)} \qquad (1.4)$$
$$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu \qquad \text{(reducción)} \qquad (1.5)$$

Como se puede observar el número de electrones perdidos en la media reacción de oxidación debe ser igual al número de electrones ganados en la media reacción de reducción[9]. En cualquier proceso de corrosión electroquímica es necesaria la presencia de las dos semirreacciones, ya que la ausencia de cualquiera de ellas detendrá dicho proceso

1.4 Celdas de corrosión electrolíticas.

Como antes se había mencionado, los fenómenos de corrosión pueden presentarse mediante procesos químicos, electroquímicos o metalúrgicos. Debido a alcance del presente estudio, únicamente se hará una descripción de

la corrosión electroquímica, ya que es ésta la que se presenta en las estructuras de concreto reforzado.

Para que se desencadene la corrosión electroquímica en un sistema determinado, es necesario que éste se encuentre en presencia de un medio acuoso. Si tal proceso se presenta, indicará la existencia de una zona anódica, una zona catódica, un contacto eléctrico entre estas dos y un electrolito (solución acuosa) en el sistema.

En este sistema la zona anódica es la que sufrirá deterioro o corrosión y se define como el "ánodo". Debido a que el ánodo es la zona que libera electrones, el elemento que la forme quedará cargado positivamente y dará lugar a iones de esta misma carga eléctrica, los cuales serán disueltos en el electrolito. El término de "cátodo" se aplica a la zona del sistema en la que los electrones del ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito[11].

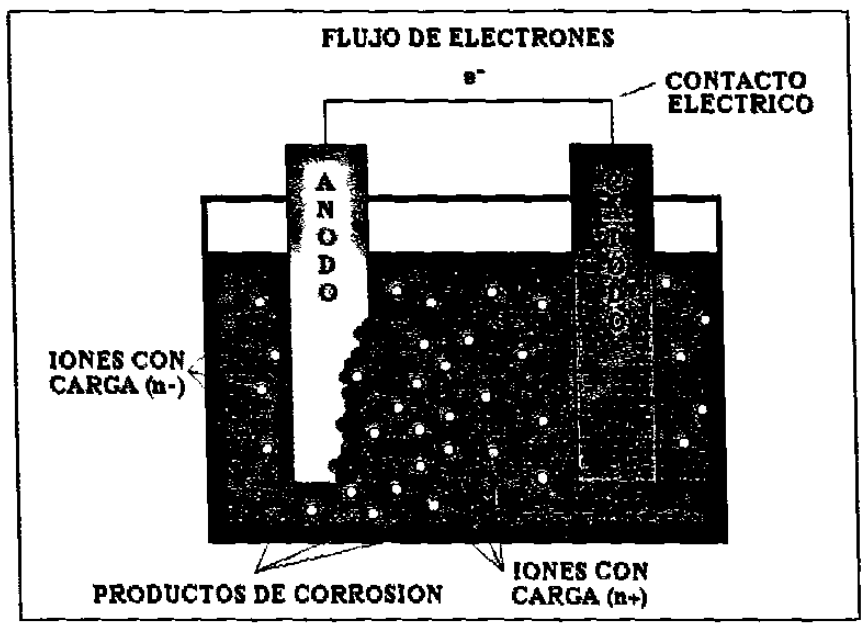


Figura 1.4: Diagrama que muestra la disposición de una celda electrolítica de corrosión. Los productos de corrosión son resultado de la reacción de los iones con carga positiva (provenientes del ánodo) con los iones de carga negativa (disueltos en el electrolito).

Una manera de visualizar el sistema de una celda electrolítica de corrosión es mediante la figura 1.4 en la que se encuentran el ánodo, el cátodo, un contacto eléctrico entre estos dos y un electrolito. Si cualquiera de estos cuatro elementos llegase a faltar, el proceso de corrosión electroquímica se detendrá.

1.5 La pasividad.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, los fenómenos de corrosión son susceptibles en la mayoría de los metales y aleaciones que se utilizan en la actualidad, por lo que se han tenido que diseñar distintos métodos de protección para evitar el deterioro prematuro de dichos metales y aleaciones [9,10,11].

Bajo ciertas condiciones algunos metales y aleaciones son capaces de autoprotegerse, formando una capa aislante sobre su superficie para constituir una interfase que los separa del medio agresivo. Dicha interfase está formada por productos de una primera fase de reacciones de corrosión que al constituirse en la superficie expuesta, inhibe o evita reacciones posteriores. Esta interfase actúa como una capa aislante que evita el contacto entre el metal o aleación y el medio agresivo. Algunos metales y aleaciones que presentan este comportamiento son el aluminio, el níquel, el titanio y el acero inoxidable entre otros[6].

Así, se puede decir que cuando un material presenta fenómenos de corrosión se encuentra en estado "activo". Si el mismo material ya no presenta fenómenos de corrosión o estos son insignificantes, se dice que este material se halla en estado "pasivo" o "pasivado". Todos los procesos fisicoquímicos que tienen lugar cuando un material pasa del estado activo al pasivo , se conocen como "pasivación"[12] (ver figura 1.5).

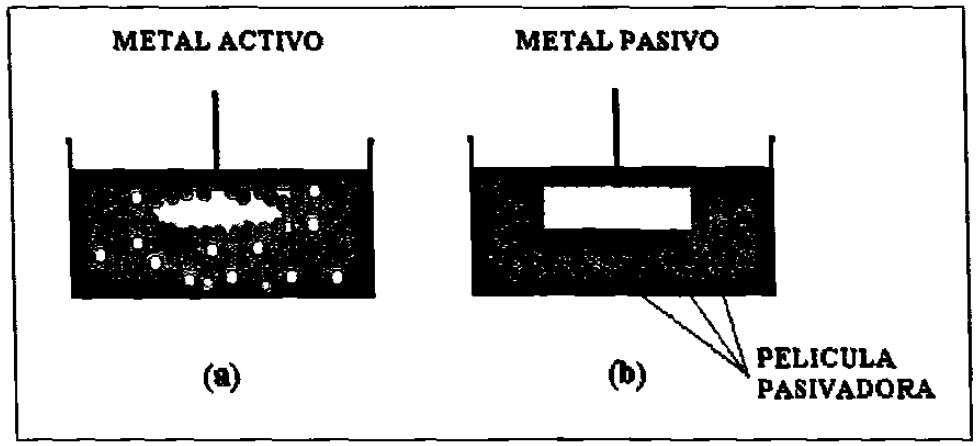


Figura 1.5: Comportamiento de dos metales (a) y (b) en una solución determinada. El metal (a) es disuelto por la solución, mientras que el metal (b) forma una capa pasiva a su alrededor, la cual protege el metal del resto de la solución.

1.6 El concreto como protección de las armaduras de acero embebidas.

El concreto tiene la característica particular de proteger de manera natural y efectiva a las varillas de acero que son embebidas en el mismo, contra fenómenos de corrosión electrolíticos, y las justificaciones son las siguientes[2,14,15]:

1) Para que se genere una celda de corrosión electrolítica en el concreto es necesaria la presencia de un electrolito, lo cual es posible únicamente cuando la estructura es construida en un ambiente que pueda proporcionar la suficiente humedad, esto permitiría la formación de una solución acuosa en el interior de los poros que contiene la masa de concreto; cuando se presentan estas condiciones, al concreto se le considera como el electrolito del sistema. Además se necesita que exista un gran suministro de oxígeno al sistema para que se produzcan las reacciones químicas del proceso. La sola falta de la humedad o del oxígeno es suficiente para inhibir cualquier fenómeno de corrosión electrolítico.

2) Como anteriormente se había expuesto, durante las reacciones de hidratación del cemento se liberan grandes cantidades de hidróxido de calcio, que aunadas a la presencia de otras sales alcalinas, permiten que la masa de concreto presente un alto nivel de basicidad o alcalinidad (índice pH), que al entrar en contacto con la humedad permite la formación de una solución en el interior de los poros con valores de entre 12.5 y 13.5 de la escala de pH. Bajo estas condiciones, los primeros productos de corrosión electrolítica del acero de refuerzo son formados por una capa de óxido férrico, la cual actúa como una delgada película aislante (capa pasivante) que protege al resto del metal de una corrosión posterior. Esta película tiene la capacidad de preservar al acero por periodos indefinidos, aún cuando existan altos niveles de humedad y de suministro de oxígeno en la estructura.

3) En una estructura de concreto reforzado, el concreto actúa como una protección física para el metal de refuerzo contra el ambiente externo que pudiera contener compuestos causantes de fenómenos de corrosión en el acero.

Así, los principales factores que determinan la eficacia del concreto como medio de protección a las varillas de acero, están relacionados con la calidad con que fue realizada la mezcla, las condiciones de solidificación y el espesor de la masa de concreto que envuelve a la varilla de refuerzo.

Por otro lado, los fenómenos de corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto reforzado son debidos a la ruptura o desintegración de la capa pasivante que lo envuelve y esta destrucción es debida a dos causas principales:[2]

a) La disminución de la basicidad o alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente, o cuando reacciona

con el CO_2 que contiene el aire que le rodea (fenómeno que se conoce como "carbonatación del concreto").

b) La presencia de cloruros en el concreto, añadidos durante la mezcla de cemento y sus adiciones, o por la penetración de los mismos desde el exterior una vez que la estructura ha sido construida.

1.7 Corrosión de la armadura metálica en estructuras de concreto reforzado.

Los fenómenos de corrosión en las estructuras de concreto reforzado presentan características particulares. Incluso estos fenómenos no son iguales para todas las estructuras, ya que dependiendo del lugar de construcción, las velocidades de corrosión pueden variar decenas e incluso centenares de veces los valores obtenidos en unos lugares con respecto a otros sitios geográficos[13].

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto tiene dos principales consecuencias que afectan la vida útil de las estructuras de concreto reforzado:

1) Por efecto de la corrosión se pierde metal base de las varillas de acero (el metal perdido se convierte en productos de corrosión), lo cual merma la adherencia del concreto a la varilla y hay un detrimento en las propiedades mecánicas de la estructura en su conjunto.

2) Los productos de corrosión tienen un volumen que es varias veces superior al del metal base que le da origen. Este aumento de volumen no lo puede absorber el concreto, por lo que tienden a generarse esfuerzos internos en éste último, agrietándolo e incluso desprendiéndolo totalmente del resto de la estructura, ver figura 1.6.

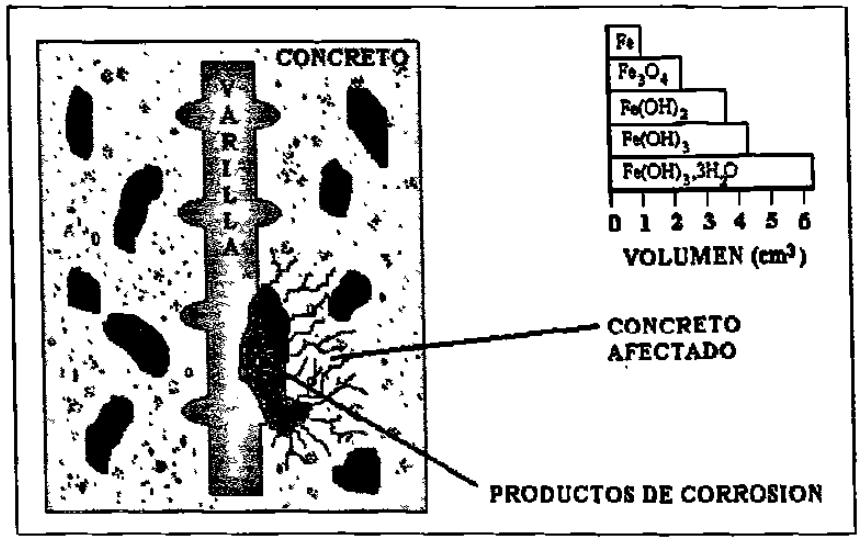


Figura 1.6: Productos de corrosión del acero embebido en el concreto y su efecto en el mismo.

La mayoría de los casos de corrosión en estructuras de concreto reforzado ocurren por procesos electroquímicos que involucran flujos de electrones, generados a partir de celdas electrolíticas creadas por diferencias de potencial electroquímico a lo largo de las propias varillas de acero[15]. Esta situación puede visualizarse por medio de la figura 1.7, en la que se tienen todos los elementos para formar una celda electrolítica de corrosión.

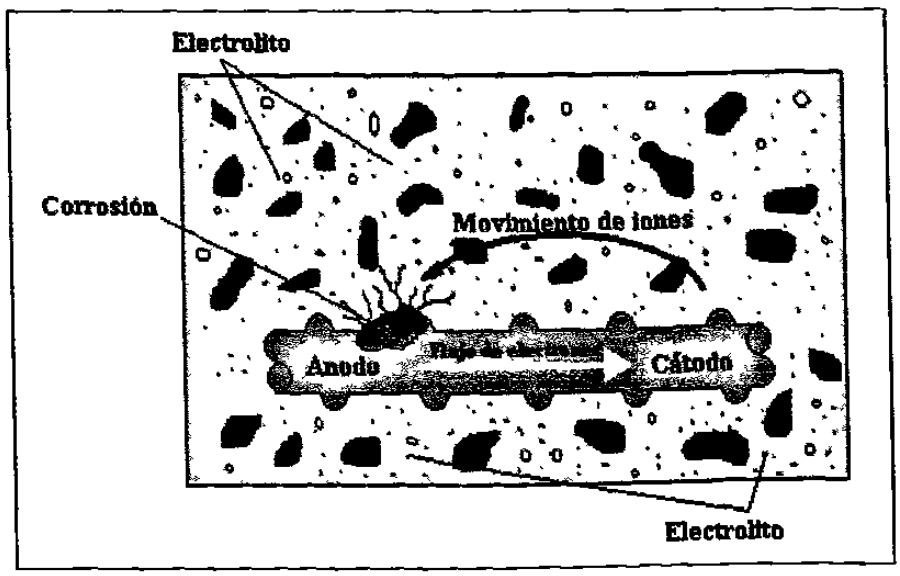


Figura 1.7: Figura que ilustra la representación esquemática de una celda de corrosión electrolítica en el concreto reforzado. Esta situación es comparable a la mostrada en la figura 1.4.

En la figura 1.7 se pueden identificar los elementos que forman la pila de corrosión. Como ya se había mencionado antes, en el ánodo o zona anódica de la superficie del acero se llevarán a cabo las reacciones de disolución del hierro o reacción de oxidación:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \qquad (1.6)$$

Esta reacción libera electrones que fluyen a través de la varilla de refuerzo, que constituye el contacto metálico, hacia el cátodo o zonas catódicas en donde estos electrones se consumen en reacciones de reducción, las cuales dependen de la cantidad de oxígeno disponible y del valor de pH de la solución acuosa contenida en los poros de la masa del concreto:

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad (1.7)$$
$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad (1.8)$$

El circuito de la celda de corrosión se cierra con el electrolito, constituido por la solución acuosa contenida en los poros del concreto, por medio de la cual se presenta el movimiento de los iones hidroxilo (OH^-) y ferrosos (Fe^{2+}). En las zonas anódicas de la varilla queda iones ferrosos cargados positivamente que al combinarse con los iones hidroxilo cargados negativamente dan por resultado las siguientes reacciones:

$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \qquad (1.9)$$

Hidróxido ferroso

$$Fe^{3+} + 3OH^- \rightarrow Fe(OH)_3 \qquad (1.10)$$

Hidróxido férrico (herrumbre)

Los productos de estas reacciones dan por resultado la formación de algunos de los productos de corrosión que se presentan en las estructuras de concreto reforzado, de acuerdo a la figura 1.6 [2,11,15].

1.7.1 Efecto de la carbonatación.

La carbonatación del concreto es un fenómeno que se presenta cuando el bióxido de carbono (CO_2) contenido en el aire entra en contacto con un constituyente del cemento hidratado. La carbonatación puede explicarse de la siguiente manera: cuando el CO_2 externo en forma gaseosa penetra el concreto a través de la red de poros, se combina con la humedad contenida en éstos últimos para formar ácido carbónico, reaccionando así con el hidróxido de calcio ($Ca(OH_2)$) que se libera durante las reacciones de hidratación del cemento, para dar a la formación de compuestos carbonatados:

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (1.11)$$

En el caso del $Ca(OH)_2$, los productos de reacción son el carbonato de calcio ($CaCO_3$) y se libera agua. El resultado de este tipo de reacciones tiene dos consecuencias:

a) Por un lado, la conversión del hidróxido de calcio a carbonato disminuye la alcalinidad del concreto de manera gradual. Esta afectación de la masa de concreto avanza desde la superficie expuesta al medio hacia el interior de la estructura.

b) La extracción de agua del hidróxido propicia una disminución del volumen del concreto, que se conoce como contracción por carbonatación, la cual afecta negativamente las propiedades de resistencia mecánica de toda la estructura.

La existencia de hidróxido de calcio en el concreto tiene la función de hacer de éste un medio favorable para la formación de la película pasiva que envuelve la superficie del acero de refuerzo, evitando así que éste pueda presentar fenómenos de corrosión (figura 1.8). Mientras el concreto conserve el contenido normal de hidróxido de calcio que propicia una alcalinidad superior al

valor 12 de la escala pH, la película pasiva del acero se desarrollará y permanecerá inalterable (tomando en cuenta que el potencial del hierro es de – 0.44 V)[6,12,16].

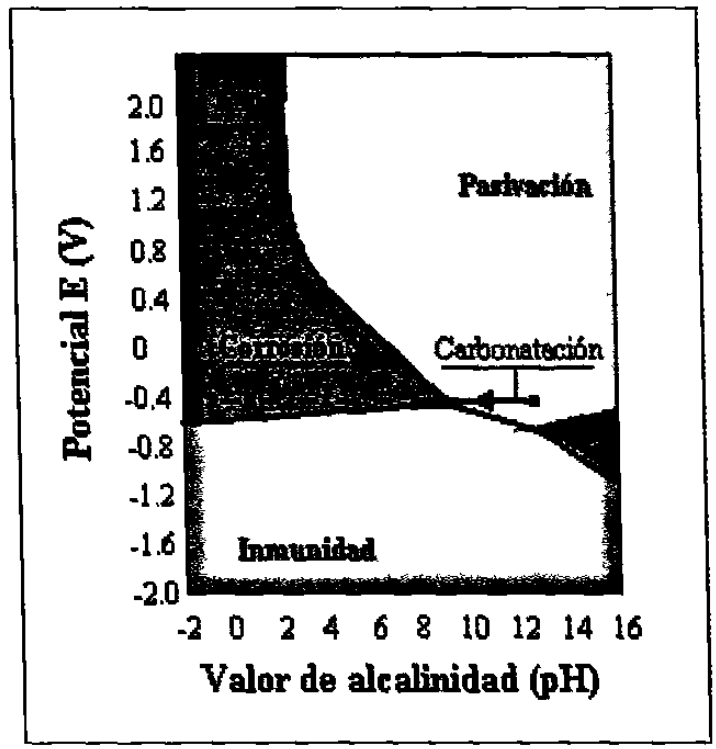


Figura 1.8: Diagrama de Pourbaix simplificado para el hierro a 25 °C.

La principal consecuencia de la carbonatación es la disminución del valor pH de la solución acuosa contenida en el poro, formando una zona de carbonatación que avanza progresivamente desde la superficie del concreto hasta el área donde se localiza la varilla de refuerzo. La carbonatación disminuye la alcalinidad del concreto a valores pH de 9.0 y menores, volviendo inestable o rompiendo la capa pasiva del acero embebido, lo cual permite el inicio de procesos de corrosión en el mismo[14]. Este tipo de corrosión se caracteriza por ser de tipo generalizado, es decir, como si el metal estuviese expuesto al medio ambiente y sin ninguna protección, esta varilla al estar en un medio húmedo y en presencia de oxígeno, genera productos de corrosión y óxidos, disminuyendo la sección transversal de la varilla y generando esfuerzos

internos en la estructura como se explicó en la sección 1.7. Esta situación se representa en la figura 1.9.

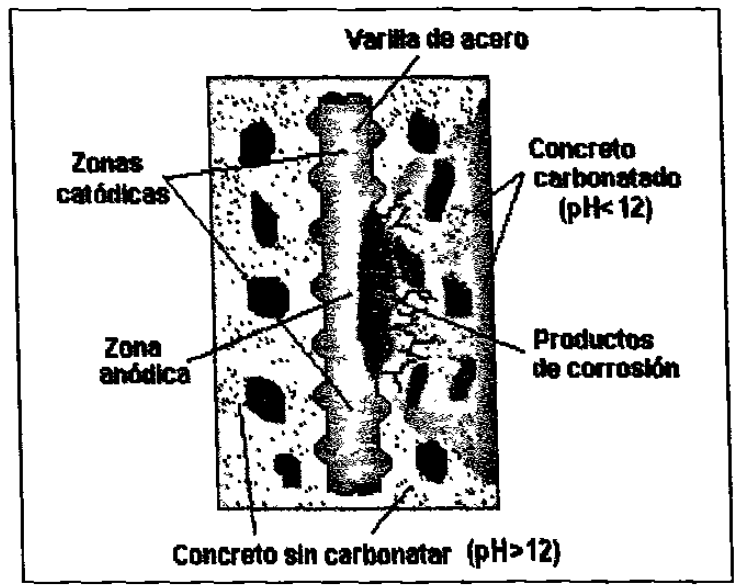


Figura 1.9: Corrosión en la armadura metálica debida a concreto carbonatado.

La carbonatación es un proceso relativamente lento, que puede agravarse por la presencia de grietas en el recubrimiento de concreto o cuando éste tiene un espesor delgado. Este proceso no puede desencadenarse sin una humedad relativa mayor al 50%, sin embargo, cuando el concreto sólido presenta demasiada humedad en la red interna de poros, la carbonatación no progresa ya que la difusión de CO_2 a través de la solución del poro es extremadamente lenta[14].

1.7.2 Corrosión por ataque de cloruros.

Los cloruros o iones cloruro, son sales inorgánicas que pueden encontrarse en los componentes del concreto y en las aguas y suelos que tienen contacto con las estructuras construidas. El ion cloruro (Cl^-) es un

agente impulsor de fenómenos de corrosión en la varilla de acero embebida en concreto. Los efectos de la presencia de cloruros son básicamente 2:

1) Cuando la solución de poro contenida en los poros del concreto que actúa como electrolito presenta cloruros, se incrementa la conductividad del mismo y facilita el movimiento de iones hidroxilo (OH^-) entre la zona catódica y la zona anódica de una varilla.

2) Cuando el contenido de cloruros tiene una alta concentración en la solución de poro, se producen reacciones químicas entre ésta y el metal de refuerzo que originan puntos de deterioro en la película pasivadora, los cuales al funcionar como ánodos dan lugar a la formación de celdas de corrosión. Este tipo de corrosión se conoce como corrosión por picadura[9,15].

La presencia de cloruros en el concreto puede originarse por vías internas o externas. La primera situación se presenta cuando al elaborar el concreto se utilizan aguas de mezclado con alto contenido de cloruros. Existen algunos aditivos que presentan cloruros en su composición, que al utilizarse en la mezcla de concreto, contaminan a la misma. La segunda situación se presenta cuando la estructura construida está en contacto con un medio externo (suelo, aire o agua) que contiene un alto nivel de cloruros, los cuales penetran a través de la red de poros u otras discontinuidades de la masa de concreto hasta llegar a zonas inmediatas a la varilla metálica.

Cuando los cloruros son adicionados a la mezcla de concreto durante los procesos de mezclado, éstos tendrán acceso directo al acero de refuerzo e inmediatamente comenzarán a actuar para desencadenar procesos de corrosión en condiciones de humedad y de suministro de oxígeno que favorezcan éste proceso. Los contenidos máximos de cloruros que pueden permitirse en el concreto endurecido y antes de entrar en servicio se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Contenidos máximos de cloruros en el concreto para minimizar el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo, según el Instituto Americano del Concreto (ACI) [17,18,19]

Concreto reforzado bajo condiciones de exposición	Contenido máximo tolerable de iones cloruro (Cl^-) en el concreto, expresado como porcentaje en peso del cemento, según el Instituto Americano del Concreto (ACI).		
	ACI 201[a]	ACI 222[b]	ACI 318[a]
Concreto en condiciones que representen riesgo de corrosión.	—	0.20	—
Concreto expuesto a la penetración de cloruros externos.	0.10	—	0.15
Concreto expuesto a humedad, sin cloruros.	0.15	—	0.30
Concreto en condición permanentemente seca.	Sin límite	—	1.00

Notas: (a) Cloruros solubles en agua.
(b) Cloruros solubles en ácido nítrico.

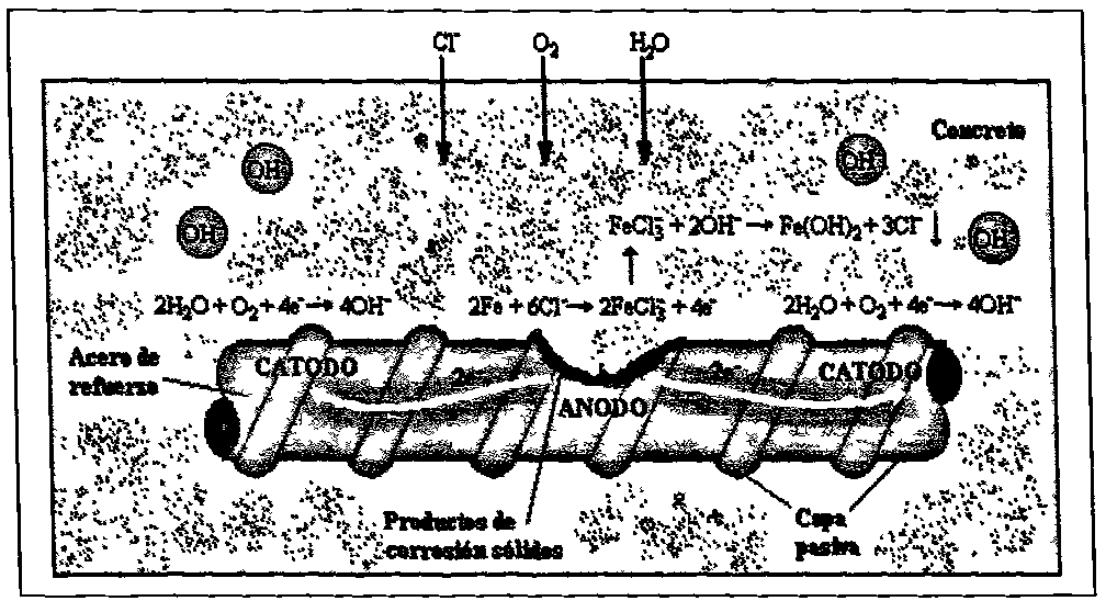


Figura 1.10: Corrosión por picadura de la varilla de acero embebida en concreto por acción de iones cloruro (Cl^-). Los cloruros rompen la capa pasiva que envuelve al acero, promoviendo la formación de celdas de corrosión electrolíticas.

Por otro lado, los cloruros pueden penetrar a través de la masa de concreto mediante varios mecanismos, siendo los más importantes la difusión (que es un mecanismo relativamente lento) y la fuerza capilar (mecanismo propio de ambientes marítimos). Sea cual fuere la causa de la presencia de los cloruros en el concreto, una vez que éstos entran en contacto con la varilla de acero, pueden destruir la capa pasiva de ésta última iniciando procesos de corrosión localizada, ver figura 1.10.

A pesar de que aún no es muy claro cómo los iones cloruro rompen la capa pasiva del acero, se acepta la teoría de la formación de compuesto[2], la cual propone que los cloruros libres que ingresan a la masa de concreto forman un compuesto soluble con los iones de hierro en las zonas anódicas:

$$2Fe + 6Cl^- \rightarrow 2FeCl^-_3 + 4e^- \qquad (1.12)$$

Las moléculas del compuesto soluble difunden hacia otras zonas donde el pH y la concentración de oxígeno son elevados. Luego, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro y liberando nuevamente los iones cloruro:

$$FeCl^-_3 + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl^- \qquad (1.13)$$

Como los cloruros no se agotan y existe un alto contenido de hierro en la vecindad del acero, el proceso continuará por sí mismo, así al emigrar los iones de hierro que reaccionan con el oxígeno y los hidroxilos presentes, formarán óxidos o hidróxidos de hierro. En consecuencia, los puntos de corrosión continúan en las zonas anódicas sin que se propaguen en toda la superficie del acero, propiciando la formación de picaduras profundas en dichas zonas.

Algunas variables que pueden influir en el proceso de corrosión arriba descrito son la temperatura del medio, el contenido de humedad en el sistema varilla - concreto, concentración de iones y la permeabilidad de la masa de concreto.

1.8 Vida útil de las estructuras de concreto reforzado.

Por lo anteriormente expuesto, se puede considerar a la corrosión de las estructuras construidas con concreto reforzado como un problema que no puede ser fácilmente enfrentado. Los costos relacionados con el mantenimiento y la reparación de dichas estructuras alcanzan los miles de dólares por metro cuadrado y en ciertas ocasiones es preferible demoler la estructura afectada y volverla a construir, que continuar con su mantenimiento.

Es difícil predecir cuál será la vida útil de una estructura determinada, ya que es necesario considerar variables tales como: calidad del cemento, aditivos y agregados utilizados en la mezcla del concreto, métodos de construcción, ambiente que rodea a la estructura, estado inicial de la superficie de la varilla, humedad relativa en la masa de concreto, acceso de oxígeno y otros agentes externos al concreto, temperatura ambiental, etc.[6,15,21]. Los diseños de estas estructuras buscan que la vida útil de las mismas alcancen de 80 a 100 años de servicio, sin embargo, las tendencias actuales en los diseños involucran una vida útil de por lo menos 140 años[21,22].

Una manera de representar la vida útil de una estructura de concreto reforzado puede hacerse mediante el diagrama de la figura 1.11[2,5,15]. En dicha figura se ilustra de manera simplificada cómo puede evolucionar el deterioro por corrosión de la armadura metálica de una estructura de concreto reforzado en función del tiempo. Esta gráfica se conoce como el "modelo de Tutti".

En este modelo se presentan dos etapas:

1) Durante un periodo de tiempo t_1 los agentes o mecanismos que desencadenan procesos de corrosión penetran la masa de concreto hasta llegar a la varilla de acero, lo cual ocurre al terminar t_1, para iniciar luego la destrucción de la película de pasivación.

2) En un segundo lapso t_2 inicia propiamente el proceso de corrosión en el refuerzo metálico a una velocidad tal que, al término del periodo t_2 se alcanza un grado de daño tal en la estructura que es necesario efectuar reparaciones.

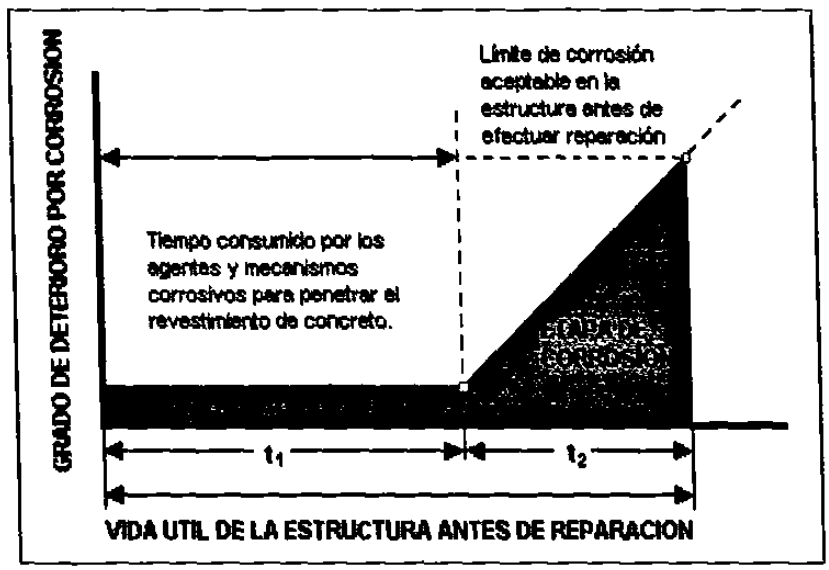


Figura 1.11: Modelo de vida útil de una estructura de concreto reforzado.

De la figura 1.11 podemos deducir que entre mayor sea el periodo t_1, mejor expectativa de vida útil tendrá la estructura. Dicho periodo de tiempo dependerá de la calidad con que se llevó a cabo la construcción de la estructura, mientras que el periodo t_2 es impredecible por el número de variables a considerar.

Por lo anteriormente expuesto, es posible resumir lo siguiente:

a) El concreto reforzado destaca como una combinación de materiales, ampliamente utilizado en la construcción de estructuras y obras civiles de muy variados tipos y funciones.

b) Los fenómenos de corrosión involucrados en las estructuras de concreto reforzado están en función de un sinnúmero de variables, que van desde la calidad de los materiales utilizados en la construcción de la obra, hasta variables que involucran las características ambientales del lugar donde se construyó dicha obra.

c) Los fenómenos de corrosión en las estructuras fabricadas con concreto reforzado, son un problema que afectan las propiedades mecánicas, y en consecuencia, la vida útil de las mismas.

d) Es necesario encontrar mecanismos o procesos que permitan extender la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, cuando éstas se encuentran ante un medio que presente riesgos de desencadenar reacciones de corrosión en la varilla de refuerzo.

CAPÍTULO 2

ACEROS AL SILICIO

2.1 El acero.

Las aleaciones de metales se han empleado exitosamente para impulsar el desarrollo de la tecnología, esto debido a que el hombre ha sabido aprovechar las diferentes propiedades que se pueden obtener de un metal aleado al modificar su composición química y estructura. Una aleación metálica puede ser una solución en estado sólido, obtenida generalmente en el estado líquido por la fusión de sus elementos, los cuales se conocen como constituyentes, componentes o aleantes[23].

El acero es una solución sólida, fabricada a base de hierro que puede contener de manera sustitucional o intersticial otros elementos, generalmente carbono, silicio y manganeso. Un acero aleado se define como cualquier acero cuyas propiedades más significativas son debidas a la adición de algún elemento diferente del carbono durante los procesos de fusión[8].

Un acero cualquiera puede ser clasificado tomando en cuenta el método de fabricación, su aplicación o su composición química, para lo cual existen un número de organismos que han propuesto diferentes clasificaciones[8,24,25,26].

2.2 El silicio como elemento de aleación en el acero.

El silicio es un elemento de características metaloides, siendo uno de los elementos más abundantes en la naturaleza. Aunque no se le encuentra en estado libre, se combina con otros elementos para formar óxidos (cuarzo y amatista), además de silicatos de hierro, magnesio, sodio, aluminio y calcio, diseminándose éstos en la corteza terrestre[27].

El silicio y sus compuestos tienen muchas aplicaciones industriales, siendo una de las principales el mejorar algunas de las propiedades de los aceros durante los procesos siderúrgicos. Ya desde principios de siglo se conocían algunos de los efectos del silicio en el acero[28]. Generalmente el silicio es utilizado como un desoxidante del acero líquido, ya que detiene la reacción entre el carbono grafítico y el óxido de hierro y, la evolución de gases contribuyendo así a mejorar la calidad del producto final[29]. Otro efecto del silicio en los aceros fundidos, es que conforme aumenta el contenido de este elemento en la aleación, el diagrama $Fe\text{-}Fe_3C$ se modifica, desplazando hacia arriba las líneas Ac1 y Ac3 de dicho diagrama, lo cual puede observarse mediante el gráfico de la figura 2.1[31]. Los contenidos de silicio en el acero dependerán del tipo de aleación que se desea producir y pueden variar desde valores mínimos de 0.2% hasta contenidos de 3.3%.

Otro de los usos del silicio en la industria siderúrgica, es en la fabricación de aceros para aplicaciones magnéticas o eléctricas, esto debido a que el silicio es un elemento que incrementa la resistividad eléctrica del acero, reduciendo

así la formación de corrientes parásitas cuando se presentan fenómenos de magnetización por corrientes alternas. Sin embargo uno de los efectos negativos del silicio en el acero es que tiende a reducir la conductividad térmica del acero, haciendo lento y difícil su recalentamiento[29,30].

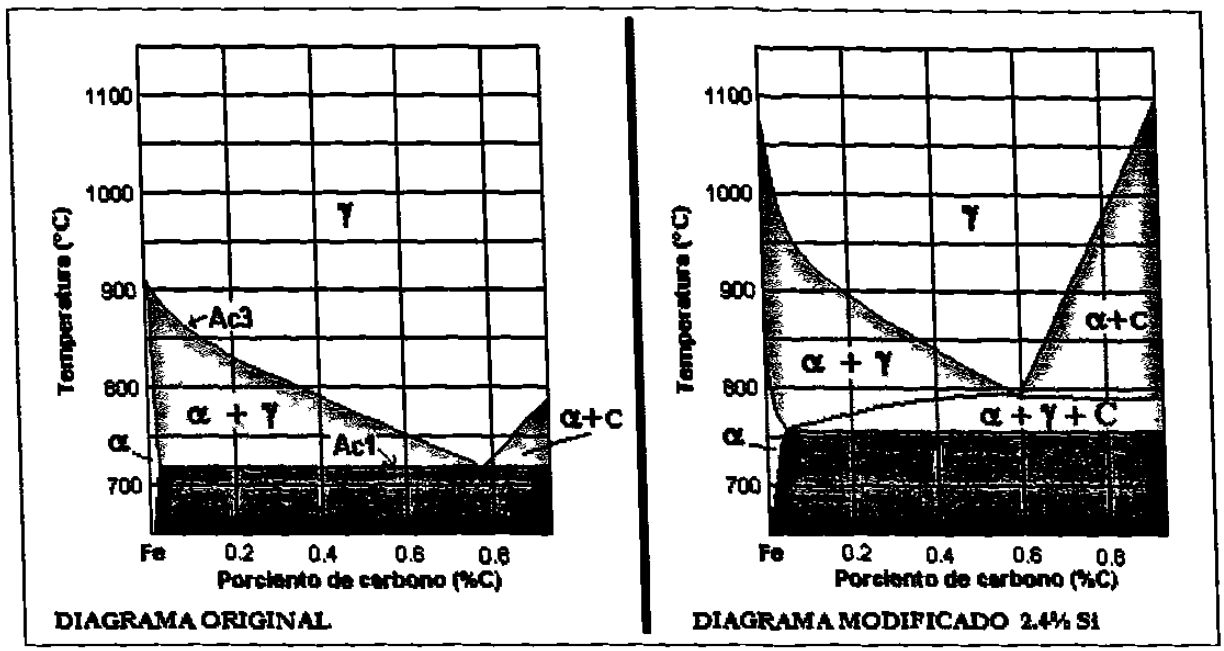


Figura 2.1: Sección de diagrama de fase que muestran la modificación del diagrama Fe-Si-C al adicionar 2.4% de silicio en peso a la aleación.

2.3 Aceros doble - fase aleados al silicio.

Los aceros doble-fase ferrítico martensíticos (Dual-phase Ferritic Martensitic steels) comenzaron a ser desarrollados e investigados a finales de la década de 1970, cuando existía una necesidad por desarrollar aleaciones ferrosas que tuviesen una gran capacidad de deformación, que fuesen económicas y además ligeras, necesidades de la industria automotriz de esos años. Estas investigaciones han mostrado que los aceros doble-fase pueden desarrollar mayores resistencia tensil, resistencia al impacto, ductilidad y resistencia a la fatiga que los aceros convencionales[32].

Los aceros doble - fase ferrítico martensíticos se caracterizan por tener una microestructura metalográfica consistente en una matriz de ferrita poligonal de grano fino (80% de la microestructura), en la que se encuentra dispersa una segunda fase de pequeñas islas de martensita (ver figura 2.2), aunque también pueden presentarse mínimas cantidades de perlita, bainita o austenita retenida. Esta microestructura en el acero puede obtenerse por medio de un tratamiento térmico de temple desde una temperatura dentro de la región $\alpha + \gamma$ de los diagramas de fase (ver figura 2.1)[36,37,38].

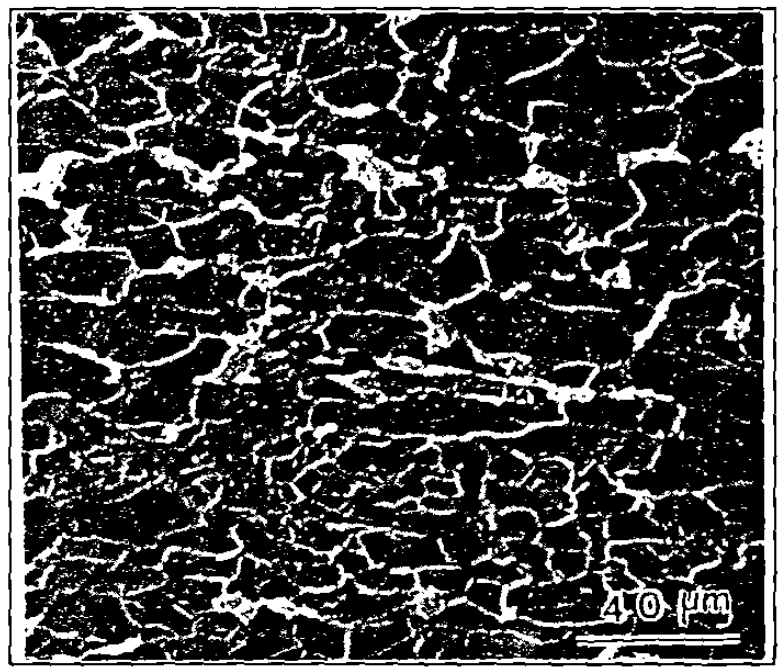


Figura 2.2: Microestructura característica de un acero doble fase. En la misma se observa una matriz de ferrita (color oscuro), además de una segunda fase de martensita (color claro), formando islas.

Es a esta microestructura a la que se le relacionan las propiedades mecánicas de los aceros doble-fase. Se ha observado que la matriz de ferrita es responsable de la ductilidad, mientras que la función de la martensita es la de aumentar la resistencia del acero doble-fase. Por ello, la resistencia y la ductilidad de estos aceros debe regularse al controlar las fracciones volumétricas de ferrita y martensita. Sin embargo, se ha encontrado que las

propiedades óptimas de estos aceros se logran cuando la presencia de martensita es de alrededor del 20% de la microestuctura[36,37].

A fin de poder obtener la microestructura antes descrita, es necesario evitar la formación de carburos de cementita en el acero, los cuales tienden a disminuir la templabilidad del mismo. Los elementos de aleación para lograr tal propósito son el manganeso, el silicio, el molibdeno y el vanadio, siendo el silicio un importante elemento que retrasa la formación de la cementita en el acero[36,38]. Así, al incrementar la cantidad de silicio en el acero, la probabilidad de poder formar martensita en el acero aumenta, dando por resultado un incremento en las propiedades mecánicas del mismo[37], lo cual puede observarse mediante la figura 2.3:

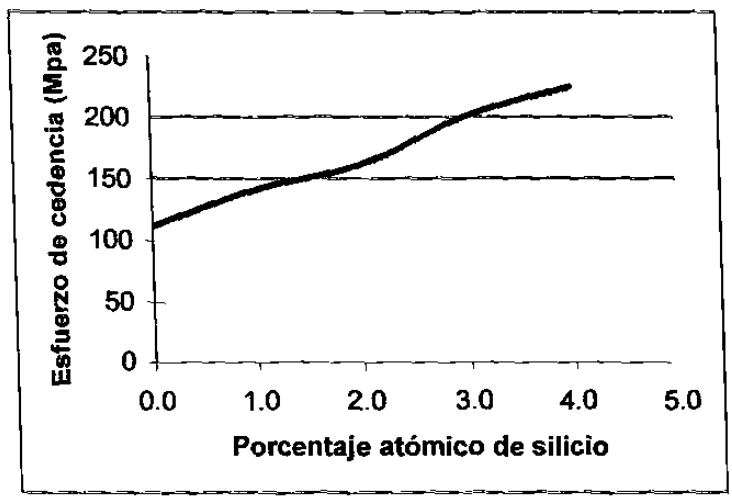


Figura 2.3: El esfuerzo de cedencia como función del contenido de silicio en el acero.

Es importante señalar que al presentarse deformación en estos aceros, la presencia del silicio tiene una fuerte tendencia a elevar el índice de endurecimiento por deformación[36], lo cual es deseable para materiales que se utilizan en elementos y estructuras sujetos a esfuerzos que pudieran ocasionar deformación permanente.

2.4 Aceros aleados al silicio resistentes a la corrosión.

Además de los efectos del silicio en el acero arriba mencionados, se han desarrollado investigaciones para conocer cuál es la influencia del silicio en las propiedades de resistencia a la corrosión de distintos aceros. Los resultados de una de estas investigaciones se resumen mediante la gráfica de la figura 2.4[25], en la que se observa que al incrementar el contenido de silicio en los aceros involucrados, también se eleva su resistencia a la corrosión ante un ambiente determinado.

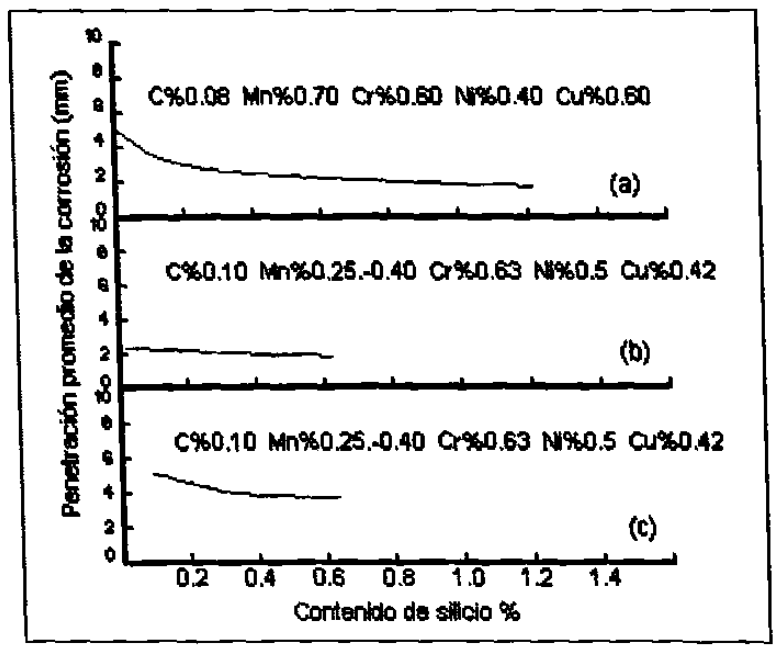


Figura 2.4: Comportamiento de aceros a ambientes corrosivos: (a) y (b) ambiente industrial, (c) atmósfera marina.

Otras investigaciones se centran en el estudio de los denominados aceros doble – fase ferrítico martensíticos (DFM steels), los cuales sirvieron como antecedente para la realización del presente estudio[31,32]. Como ya se mencionó, se trata de aceros convencionales que se pueden obtener al enfriar por temple desde la temperatura de la mezcla de fases $\alpha + \gamma$.

Investigaciones realizadas con estos aceros han demostrado que los aceros doble-fase son capaces de resistir fenómenos de corrosión cuando son embebidos en concreto, aún y cuando se permite la presencia de iones cloruro (Cl^-) en el sistema acero-concreto bajo condiciones de laboratorio. Algunos de los resultados obtenidos en estas investigaciones se muestran en la gráfica de la figura 2.5[31,32].

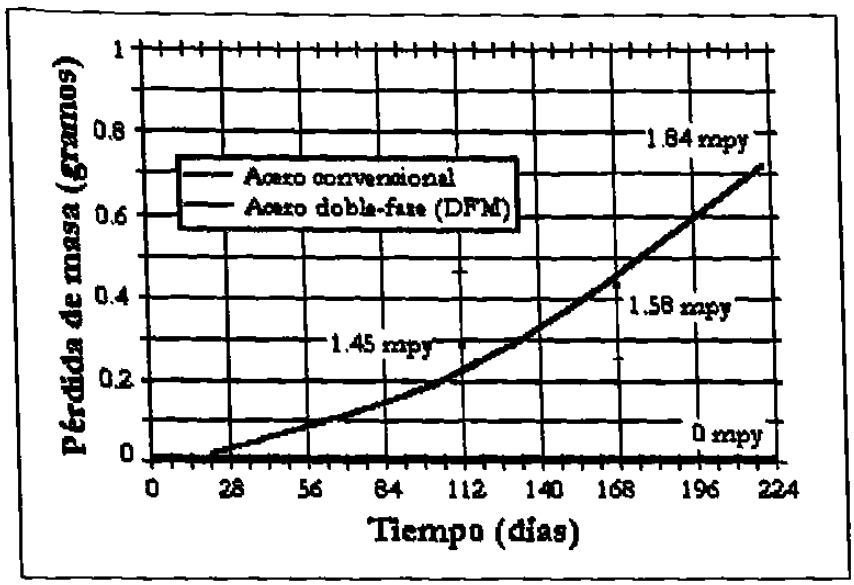


Figura 2.5: Gráfico que muestra los resultados de pruebas de corrosión en aceros convencionales y aceros doble fase, de acuerdo a norma ASTM-G1.

En la figura 2.5 se puede observar que, para las condiciones de experimentación en laboratorio, los aceros doble-fase involucrados fueron capaces de no presentar ningún fenómeno de corrosión después de permanecer 60 semanas embebidos en concreto[31,32]. Esto indica que no se presentó ningún mecanismo de corrosión que involucrara corrosión por picadura o corrosión generalizada en la superficie de las barras de acero bajo prueba.

De acuerdo a los autores de estas investigaciones, los resultados obtenidos son atribuidos a las siguientes causas:

a) Composición química de la aleación. El bajo contenido de carbono evita la formación de carburos, los cuales fomentan la formación de pares galvánicos con otras fases presentes en el acero.

b) Distribución de fases. La microestructura obtenida después del tratamiento térmico de temple, permite la formación de una matriz de ferrita, que rodea a las islas de martensita. Esta distribución metalográfica permite mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión (ver figura 2.6).

c) El alto contenido de silicio en el acero permite la formación de una capa pasiva superficial en el acero embebido, la cual estará compuesta de óxido de silicio (SiO_2)[33].

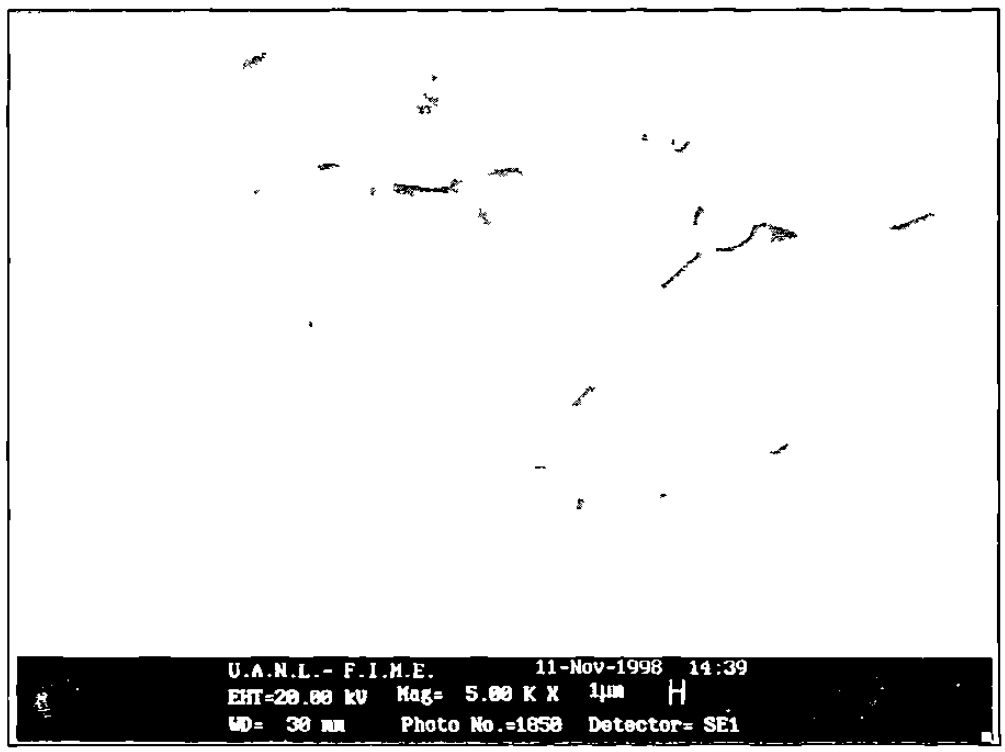


Figura 2.6: Imagen de SEM que muestra la microestructura de un acero doble-fase (DFM steel). Se aprecia la matriz de ferrita en color oscuro, mientras que las islas de martensita son representadas por las zonas claras.

2.4 Familia de aceros al silicio.

Teniendo como referencia los estudios sobre resistencia a la corrosión de los aceros doble-fase (DFM steels), la empresa Hojalata y Lámina S.A. (HyLSA) produjo una familia de aceros con bajo contenido de carbono y aleados principalmente con silicio, donde este elemento varía para conocer las características de resistencia a ña corrosión de las aleaciones obtenidas.

Además de variar el contenido de silicio en la aleación, cada uno de los aceros obtenidos sufrió también un tratamiento térmico intercrítico de temple, a fin de reproducir la estructura dual ferrita-martensita descrita en los aceros doble-fase. El objetivo de estos procedimientos fue el de encontrar el contenido óptimo de silicio y la temperatura de tratamiento térmico intercrítico para obtener las propiedades microestructurales, mecánicas y de resistencia a la corrosión, que permitieran obtener un acero viable para la fabricación de varilla de refuerzo en la industria de la construcción y, que además, pudiese adaptarse a los procesos de producción de varilla existentes.

Mediante la figura 2.7 se presenta el proceso de fabricación de la familia de aceros al silicio involucrada en la presente evaluación. La fabricación de esta familia de aceros se realizó en las instalaciones de la empresa arriba mencionada. Se procedió a la selección de chatarra de acero para luego efectuar los procesos de fusión en un horno de inducción tipo crisol con una capacidad de 1 tonelada. En este horno también se realizaron los procedimientos de ajuste y adición de ferroaleantes para obtener las composiciones químicas deseadas para cada grupo de aceros.

Una vez obtenida la aleación, se procedió a su vaciado en moldes diseñados para obtener barras sólidas de 10.16 cm de diámetro. Se utilizaron corazas metálicas revestidas interiormente con mangas refractarias de alúmina, uniendo grupos de 6 piezas mediante un único alimentador. Una vez que las

barras de acero solidificaron, se cortó la alimentación o colada y las piezas obtenidas se prepararon para el siguiente proceso, el cual consistió en laminar las barras de acero para obtener barras cilíndricas sólidas con un diámetro de 5.8 cm. Esto se realizó en un molino Cross Country con una capacidad de 10 ton/hr.

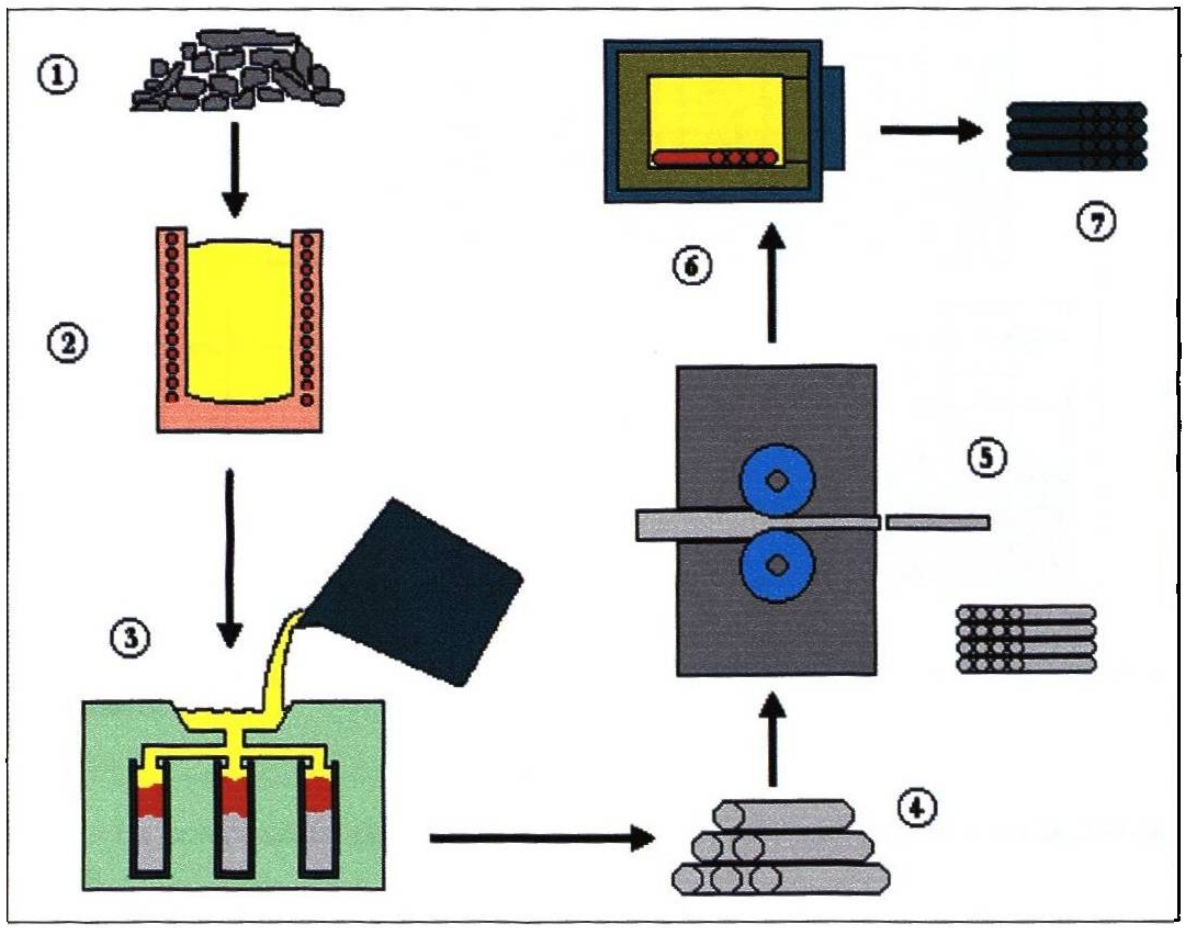


Figura 2.7: Figura que ilustra los procesos de fabricación de la familia de aceros al silicio involucrada en la evaluación: (1) Selección de materia prima; (2) fusión en horno de inducción y ajustes de aleación; (3) vaciado en moldes; (4) corte de coladas; (5) laminación de barras; (6) tratamiento térmico; (7) Clasificación de familia de aceros al silicio.

El último proceso que se realizó a las barras de acero fue un tratamiento térmico de temple para obtener la microestructura ferrita-martensita descrita para los aceros doble - fase (DFM steels). Este tratamiento térmico se efectuó

en un horno de calentamiento por resistencias y el temple se realizó en agua a temperatura ambiente (ver figura 2.8). De esta manera se produjo una familia de aceros aleados al silicio, en donde además de variar el contenido de silicio, se varió también la temperatura de tratamiento térmico de temple.

Grado de acero	%Silicio	Temperature intercrítica (°C)				Ac3	Ac1
		A	B	C	D		
1	0.007	751	786	821	857	892	716
2	0.387	765	801	838	875	911	728
3	1.230	789	827	866	905	943	750
4	2.020	814	855	896	937	978	773
5	0.656	775	813	852	890	928	739
6	0.383	763	799	836	872	909	726

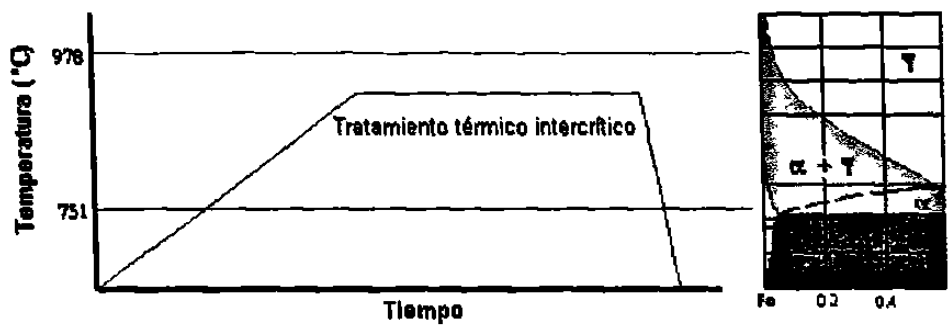


Figura 2.8: Tabla de los aceros en los que se efectuó el tratamiento intercrítico y gráfica del mismo.

La composición química de los aceros al silicio se muestra en la Tabla 2.1[35]:

Tabla 2.1: Análisis químico de aceros al Silicio.

Grado de acero	Determinación (%)		
	Carbono	Silicio	Manganeso
1	0.133	0.0075	0.618
2	0.102	0.387	0.483
3	0.110	1.230	0.751
4	0.121	2.020	0.731
5	0.095	0.656	0.439
6	0.111	0.383	0.637

2.6 Caracterización metalográfica de la familia de aceros al silicio.

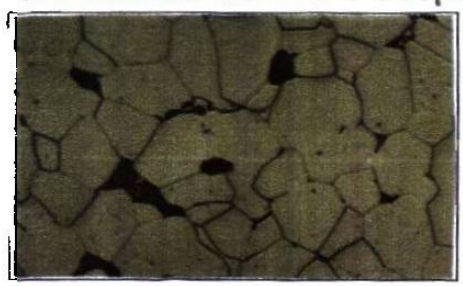
A continuación se presentan las estructuras metalográficas encontradas en los aceros de la familia al silicio. Todas las imágenes se obtuvieron a partir de muestras de cada uno de los aceros proporcionados por HyLSA sujetos a evaluación. La preparación y el análisis metalográfico de las muestras se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Todas las muestras de los aceros fueron atacadas con Nital al 2% para revelar la microestructura presente en las mismas[39].

El procedimiento llevado a cabo va desde el corte, montaje y preparación metalográfica de las muestras, ataque químico y observación al microscopio. A fin de identificar las fases presentes en los aceros, además de la observación, se recurrió al uso de un microdurómetro Vickers para relacionar las propiedades de dureza encontradas en las fases con las de otros resultados publicados. Mediante la observación metalográfica y la determinación de la dureza es posible inferir el tipo de fase presente en la microestructura de un metal[42,43].

Para conocer las variaciones en la morfología y distribución de las fases en los aceros, producto de las diferencias en composición y de los tratamientos térmicos efectuados, se utilizó un analizador de imágenes Leica *Quantimet 250,* mediante el cual se realizaron todas las mediciones correspondientes.

En las siguientes imágenes se diferencian las fases de la siguiente manera: ferrita en color claro, perlita y segunda fase en color oscuro.

2.6.1 Grados de acero después del proceso de laminado.



20 µm

400X

Figura 2.9: **Acero 1.**
Contenido de silicio: 0.0075
Porcentaje de ferrita: 94.1%
Porcentaje de perlita: 5.9%

20 µm

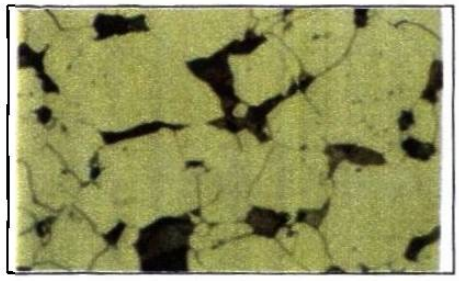
400X

Figura 2.10: **Acero 2.**
Contenido de silicio: 0.387
Porcentaje de ferrita: 90.8%
Porcentaje de perlita. 9.2%

20 µm

400X

Figura 2.11: **Acero 3.**
Contenido de silicio: 1.230
Porcentaje de ferrita: 90.8%
Porcentaje de perlita: 9.2%



20 µm

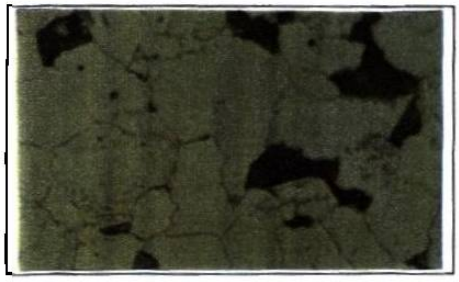
400X

Figura 2.12: **Acero 4.**
Contenido de silicio: 2.020
Porcentaje de ferrita: 89.1%
Porcentaje de perlita: 10.9%

20 µm

400X

Figura 2.13: **Acero 5.**
Contenido de silicio: 0.656
Porcentaje de ferrita: 93%
Porcentaje de perlita: 7.0%



20 µm

400X

Figura 2.14: **Acero 6.**
Contenido de silicio: 0.383
Porcentaje de ferrita: 89.3
Porcentaje de perlita: 10.7%

2.6.2 Familia de aceros grado A.

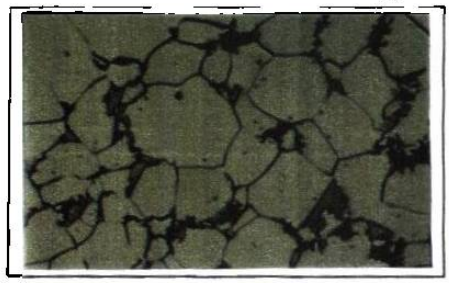


Figura 2.15: Acero A1.
Contenido de silicio: 0.0075
Porcentaje de ferrita: 91.8%
Porcentaje de segunda fase: 8.2%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 751 °C
Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 µm 400X

Figura 2.16: Acero A2.
Contenido de silicio: 0.387
Porcentaje de ferrita: 89%
Porcentaje de segunda fase: 11%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 765 °C
Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 µm 400X

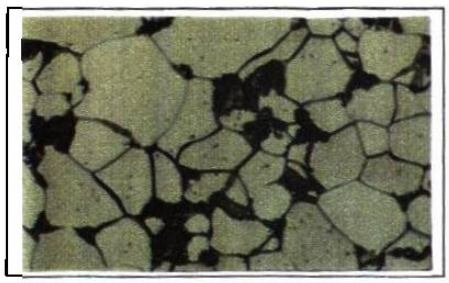


Figura 2.17: Acero A3.
Contenido de silicio: 1.230
Porcentaje de ferrita: 89.9%
Porcentaje de segunda fase: 10.1%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 789 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm 400X

Figura 2.18: Acero A4.
Contenido de silicio: 2.020
Porcentaje de ferrita: 89.2%
Porcentaje de segunda fase: 10.8%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 814 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm 400X

Figura 2.19: Acero A5.
Contenido de silicio: 0.656
Porcentaje de ferrita: 88.5%
Porcentaje de segunda fase: 11.5%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 775 C
Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm 400X

Figura 2.20: Acero A6.
Contenido de silicio: 0.383
Porcentaje de ferrita: 81%
Porcentaje de segunda fase: 19%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 763 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 µm 400X

2.6.3 Familia de aceros grado B.

Figura 2.21: Acero B1.
Contenido de silicio: 0.0075
Porcentaje de ferrita: 91.8%
Porcentaje de segunda fase: 8.2%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 787 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 µm 400X

Figura 2.22: Acero B2.
Contenido de silicio: 0.387
Porcentaje de ferrita: 87.1%
Porcentaje de segunda fase: 12.9%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 802 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 µm 400X

Figura 2.23: Acero B3.
Contenido de silicio: 1.230
Porcentaje de ferrita: 86.8%
Porcentaje de segunda fase: 13.2%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 827 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm 400X

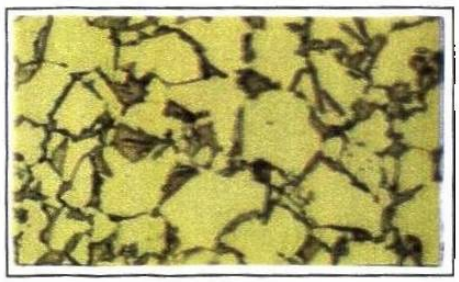


Figura 2.24: Acero B4.
Contenido de silicio: 2.020
Porcentaje de ferrita: 82.5%
Porcentaje de segunda fase: 17.5%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 855 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 90%

20µm 400X

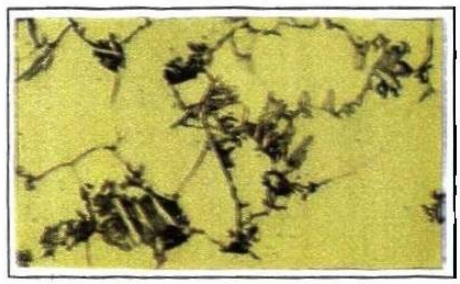


Figura 2.25: Acero B5.
Contenido de silicio: 0.656
Porcentaje de ferrita: 83.7%
Porcentaje de segunda fase: 6.3%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 814 °C
Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 µm 400X

Figura 2.26: Acero B6.
Contenido de silicio: 0.383
Porcentaje de ferrita: 85.6%
Porcentaje de segunda fase: 14.4%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 800 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 µm 400X

2.6.4 Familia de aceros grado C.

Figura 2.27: Acero C1.
Contenido de silicio: 0.0075
Porcentaje de ferrita: 95%
Porcentaje de segunda fase: 5%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 822 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm 400X

Figura 2.28: Acero C2.
Contenido de silicio: 0.387
Porcentaje de ferrita: 86.4%
Porcentaje de segunda fase: 14.6%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 839 °C
Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 μm 400X

Figura 2.29: Acero C3.
Contenido de silicio: 1.230
Porcentaje de ferrita: 84.3%
Porcentaje de segunda fase: 15.7%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 867 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm 400X

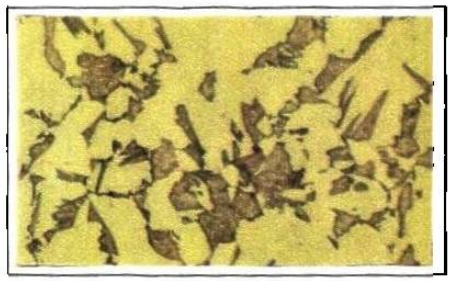


Figura 2.30: Acero C4.
Contenido de silicio: 2.020
Porcentaje de ferrita: 83.1%
Porcentaje de segunda fase: 16.9%
Temperatura de tratamiento intercrítico. 896 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 99.9%

20 μm 400X

Figura 2.31: Acero C5.
Contenido de silicio: 0.656
Porcentaje de ferrita: 84.4%
Porcentaje de segunda fase: 15.6%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 852 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm 400X

Figura 2.32: Acero C6.
Contenido de silicio: 0.383
Porcentaje de ferrita: 83.8%
Porcentaje de segunda fase: 16.2%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 836 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 90%

20 μm 400X

2.6.5 Familia de aceros grado D.

Figura 2.33: Acero D1.
Contenido de silicio: 0.0075
Porcentaje de ferrita: 90.1%
Porcentaje de segunda fase: 9.9%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 857 °C
Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 µm 400X

Figura 2.34: Acero D2.
Contenido de silicio: 0.387
Porcentaje de ferrita: 87.8%
Porcentaje de segunda fase: 12.2%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 875 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm 400X

Figura 2.35: Acero D3.
Contenido de silicio: 1.230
Porcentaje de ferrita: 83.5%
Porcentaje de segunda fase: 16.5%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 905 °C
Probabilidad de formar martensita: < 90%

20 µm 400X

Figura 2.36: Acero D4.
Contenido de silicio: 2.020
Porcentaje de ferrita: 77%
Porcentaje de segunda fase: 23%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 937 °C
Probabilidad de formar martensita: > 90%

20 µm 400X

Figura 2.37: Acero D5.
Contenido de silicio: 0.656
Porcentaje de ferrita: 72.5
Porcentaje de segunda fase: 27.5%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 890 °C
Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 µm 400X

Figura 2.38: Acero D6.
Contenido de silicio: 0.383
Porcentaje de ferrita: 81.5%
Porcentaje de segunda fase: 28.5%
Temperatura de tratamiento intercrítico: 873 °C
Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm 400X

2.6.6 Defectos encontrados en las aleaciones evaluadas.

Desde un punto de vista estructural, la presencia de defectos en un material dará por resultado una disminución de sus propiedades mecánicas, ya que estos defectos actúan como concentradores de esfuerzos cuando dicho material es utilizado en una aplicación donde existan esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión, esfuerzos combinados, etc.

Desde el punto de vista de la corrosión, la presencia de defectos demerita las características de resistencia a la corrosión de los materiales al ser sujetos a un ambiente agresivo. La presencia de defectos en la superficie y en el interior de un material expuesto a un medio corrosivo, aumenta la posibilidad de que se presenten fenómenos de corrosión localizada , ya que estas imperfecciones pueden actuar como iniciadores de los mismos. La diferencia de composiciones o heterogeneidades en la estructura de un material, permite la formación de pares galvánicos que bajo condiciones determinadas pueden desencadenar fenómenos de corrosión localizada y generalizada[8,9,11].

Durante la evaluación metalográfica de los aceros, se encontraron distintos tipos de defectos que afectan las propiedades de resistencia mecánica y de resistencia a la corrosión de los mismos. Los defectos más generalizados fueron:

1) Presencia de inclusiones debido a los procesos de vaciado.
2) Presencia de un anillo de ferrita superficial debida decarburaciones durante los procesos de laminación y de tratamiento térmico.
3) Presencia de grietas superficiales debidas al proceso de laminación.
4) Presencia de heterogeneidades en la distribución de fases del material.

En los casos de la presencia del anillo de ferrita y de las grietas superficiales, la presencia de este tipo de defectos en productos laminados en caliente, como la varilla para construcción, es permitida de acuerdo a ciertas

restricciones. Sin embargo, para la familia de aceros bajo estudio, los defectos encontrados van más allá de estas restricciones y, una varilla fabricada con este tipo de problemas y expuesta a un medio agresivo extremo, tendrá como resultado una vida útil reducida, debiéndose realizar operaciones de reparación prematuras.

A continuación se muestran se presentan imágenes de los defectos encontrados en los aceros aleados al silicio.

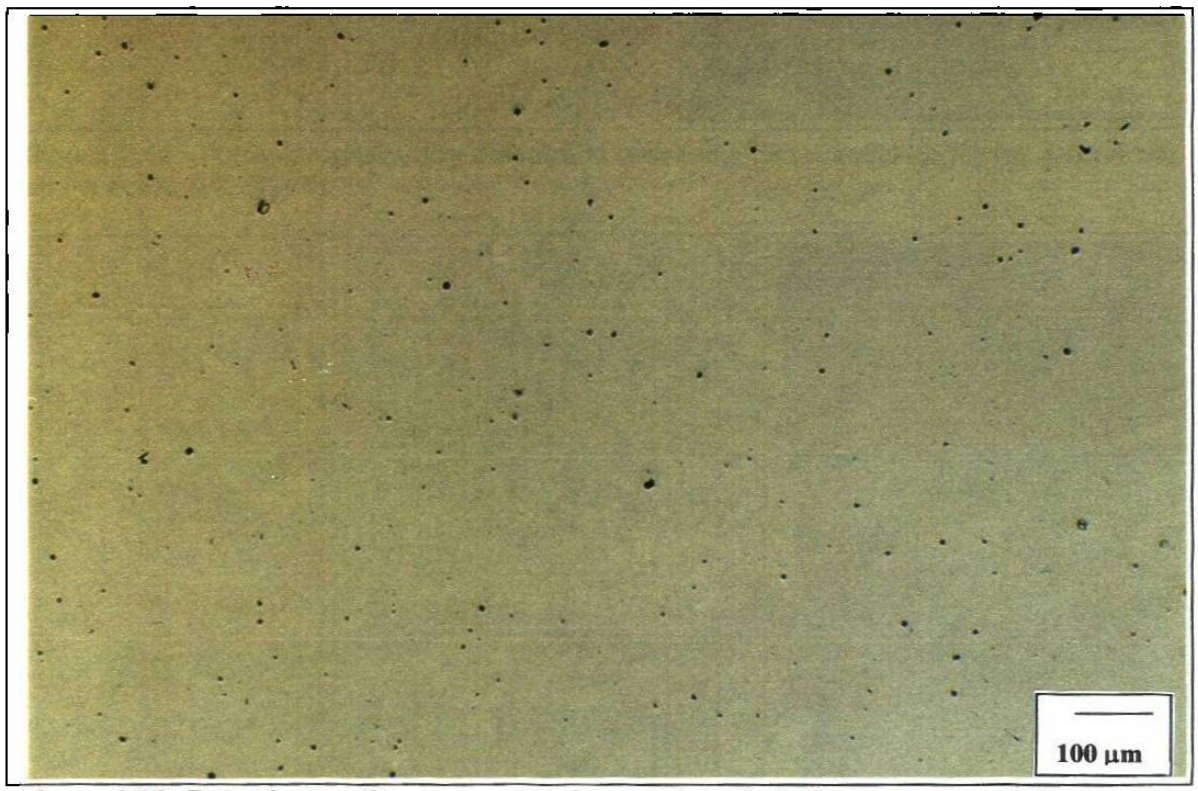


Figura 2.39: Fotomicrografía que muestra la presencia de inclusiones no metálicas en un acero A5. (100X)

Figura 2.40: Fotomicrografía que muestra la presencia de un anillo de ferrita superficial en un acero A4. (100X)

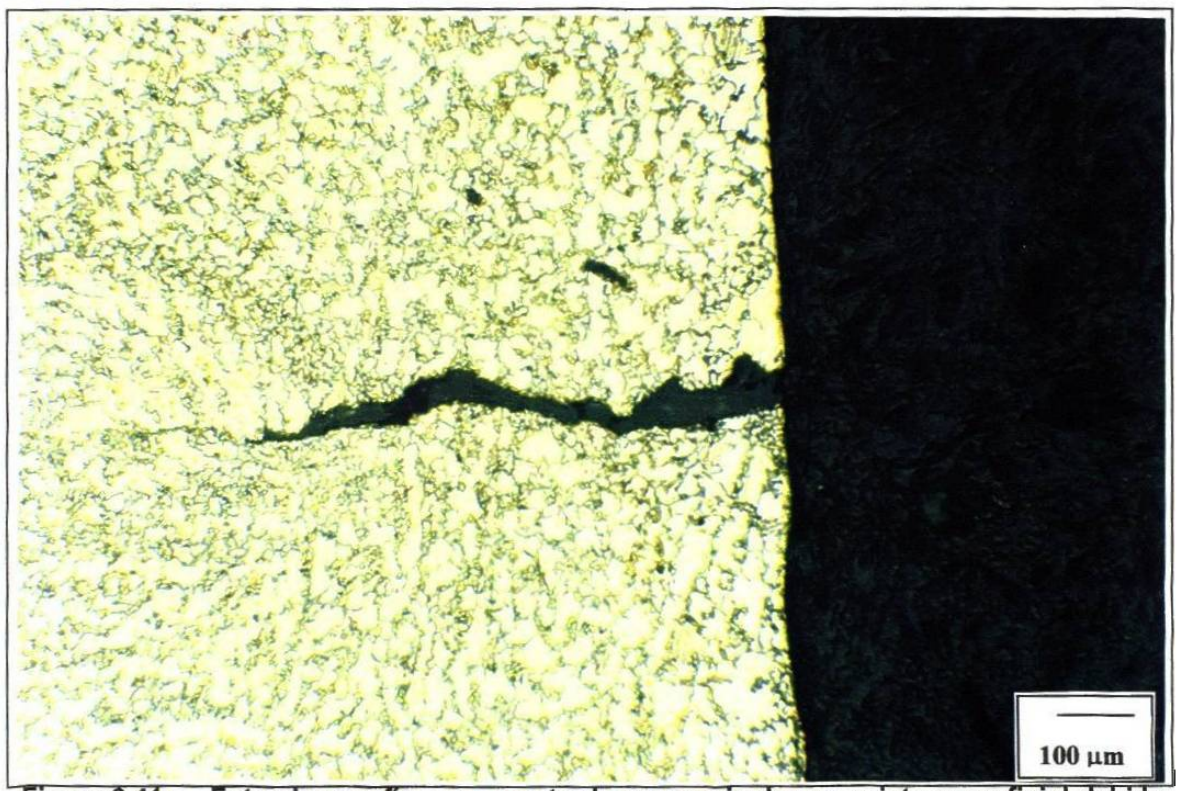


Figura 2.41: Fotomicrografía que muestra la presencia de una grieta superficial debida al proceso de laminación en un acero B3. (100X)

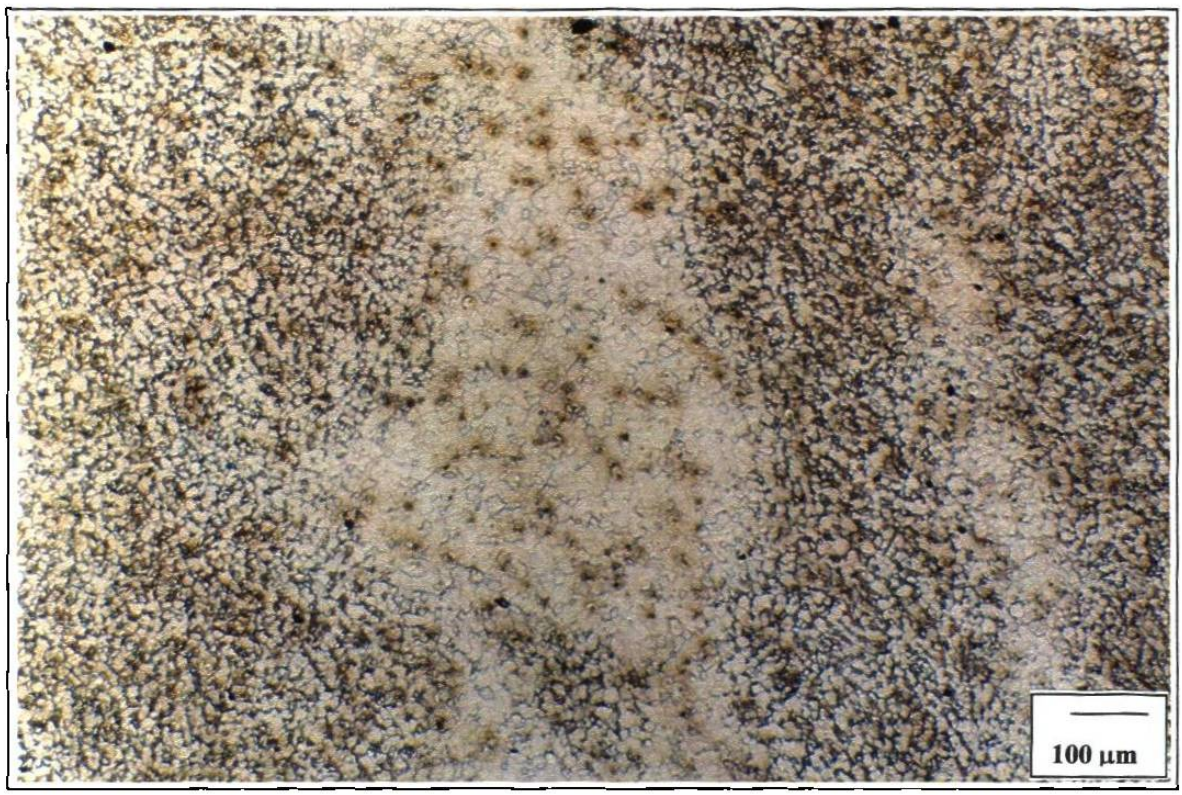


Figura 2.42: Fotomicrografía que muestra la presencia de heterogenidad en la distribución de fases de un acero A4. (100X)

De lo anteriormente expuesto, es posible obtener las siguientes ideas principales:

a) El silicio es un elemento de aleación que afecta las propiedades de fusión, resistencia mecánica y de resistencia a la corrosión del acero.
b) La variación en el contenido de silicio produce cambios en la distribución y composición de las fases presentes de los aceros doble – fase bajo estudio.
c) Los aceros que presentaron mayores probabilidades de formar la doble fase son: acero B4, acero C4, acero C6, acero D4 y acero D6
d) Los aceros aleados al silicio evaluados presentan defectos en su estructura, tales como presencia de inclusiones no metálicas, grietas superficiales y heterogeneidad en la distribución de fases, defectos que pueden desencadenar procesos de corrosión en la varilla de una estructura de concreto reforzado.