

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- Generalidades.

Ubicación:

El estudio se lo realiza en la Provincia Avilés del Departamento Autónomo de Tarija del Estado Plurinacional de Bolivia, en la Cuenca denomina Saladillo.

El Departamento de Tarija está ubicado al sur de Bolivia a 21° 33' latitud Sur 64° 42' longitud Oeste, tiene una superficie aproximada de 37.623 km², corresponde al 3% del territorio total de Bolivia, fue creada el 24 de septiembre de 1831, en el gobierno del Gral. Andrés de Santa Cruz, como consecuencia de su voluntaria incorporación a la República de Bolivia, sin embargo su fecha cívica departamental es el 15 de abril en conmemoración a la batalla de la Tablada efectuada el 15 de abril de 1817, en contra de la corona española.



Figura 1.1: División política del Departamento de Tarija-Bolivia

Fuente: www.mirabolivia.com

Como se muestra en la figura 1.1, el Departamento de Tarija está dividido en seis Provincias:

1. Provincia Cercado, Capital del Departamento.
2. Provincia Arce.
3. Provincia Gran Chaco.
4. Provincia Méndez
5. O'Connor.
6. Provincia Avilés, sitio del estudio.

La economía del Departamento de Tarija está basada en la producción agrícola, ganadería y principalmente en los recursos económicos provenientes de la explotación de los hidrocarburos y de la explotación del Gas.

Dentro sus características físicas, en el Departamento de Tarija se presentan montañas que se desprenden de la Cordillera de Lipez que, de occidente a oriente, las más importantes son: Quebrada Honda, Tacsara, Yunchará, de Tarija, Chorcoya, Sama, Cerro Negro. La topografía continúa con una serie de macizos montañosos que encierran los valles de Tarija, San Lorenzo, Concepción y Padcaya. La zona subandina, presenta una serie alargada de serranías con altura declinante, formando valles angostos.

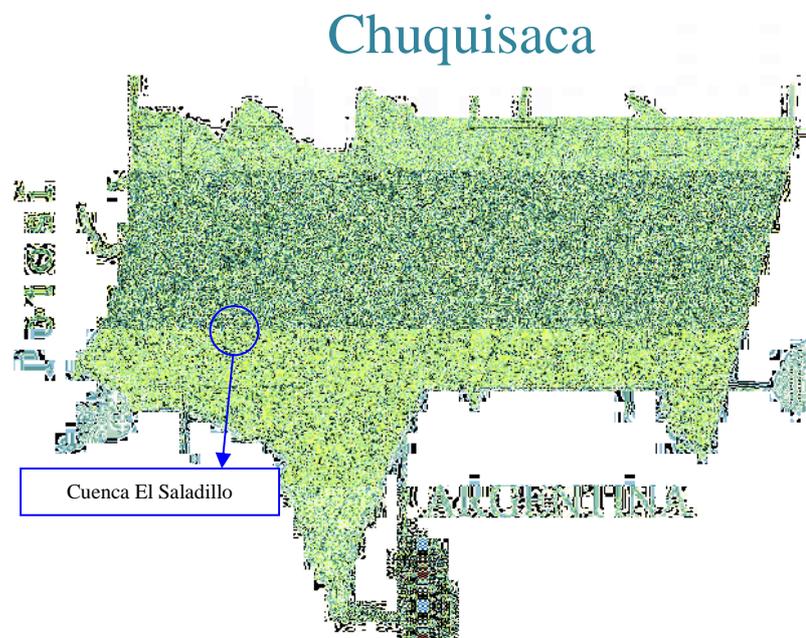


Figura: 1.2 Mapa Hidrográfico del Departamento de Tarija
Fuente: www.mirabolivia.com

Dentro de las características hidrológicas, el Departamento de Tarija es tributario de la Cuenca del Plata mediante los Ríos Pilcomayo y Bermejo. El primero cruza su territorio con dirección Sur - Este, desde la altura del cerro Isiperenda; tiene como principal tributario al río San Juan del Oro, el que cambia de nombre a Camblaya y Pilaya respectivamente a medida que recibe otros caudales (los tres forman el límite con el departamento de Chuquisaca).

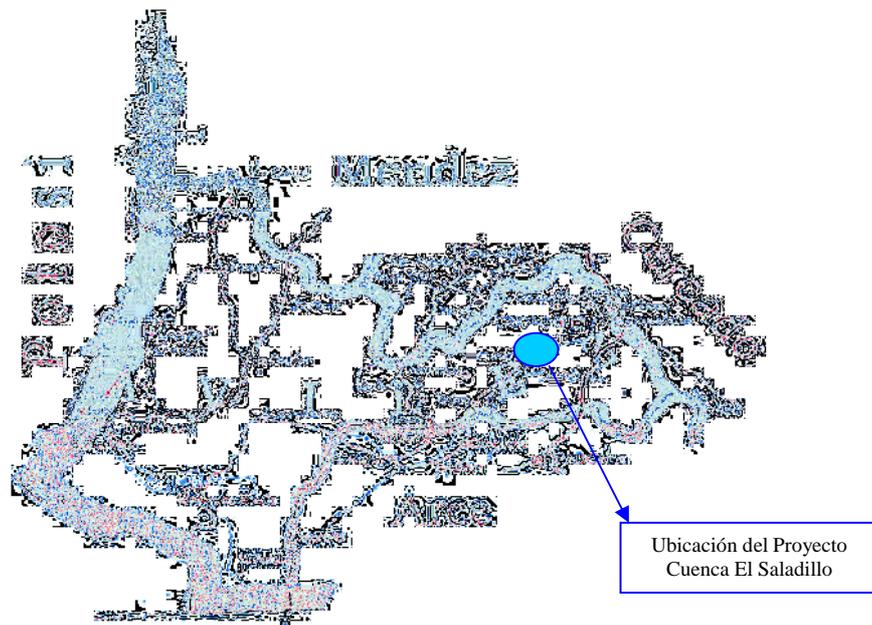


Figura: 1.3: Ubicación de la Cuenca del Saladillo en la Provincia Avilés
Fuente: www.mirabolivia.

La cuenca del Saladillo está ubicada en la primera sección de la provincia Avilés del Departamento de Tarija, se encuentra entre los paralelos 21°42`33,97” y 21°43`09,39” de latitud Sur. Tiene una superficie aproximada de 15.16 km² y se encuentra a una altitud media de 1.870 m.s.n.m., su relieve es accidentada, en la parte alta con pendientes altas y en la parte baja presenta pendientes suaves que permite la utilización del suelo para cultivos.

La Cuenca del Saladillo, es una subcuenca del Camacho que vierte sus aguas al Río Camacho y se encuentra en el trayecto entre el Valle de la Concepción y el santuario de la Virgen de Chaguada, aproximadamente a unos 2 km. del Valle de la Concepción.

1.2.- Clima.

Para caracterizar el clima de la cuenca de Saladillo (Figura 1.4:), se han utilizado los datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI – Tarija), utilizando el índice climático de Thorntwaite, llegando a la conclusión que en la zona puede clasificarse con el siguiente tipo climático:

Clima Mesotermal semiárido: Se ubica en los valles de la Cordillera Oriental, con una temperatura anual media de 16,7 °C y con una precipitación media anual de 619 mm

1.3.- Geología.

Previo a realizar el análisis de la geología, se ha realizado un análisis de sus características físicas de la Cuenca El Saladillo.

1.3.1.- Características Físicas de la Cuenca El Saladillo.

GEOMORFOLOGÍA



Foto 1.4: Morfología de la Cuenca
Fuente: Elaboración propia

La Cuenca del Saladillo presenta características geomórficas complejas, como resultado de los movimientos tectónicos a los que estuvo sometido en épocas pasadas; es decir, eventos geodinámicos internos y geodinámicos externos; los mismos que son responsables del desarrollo y evolución del paisaje actual. Esta cuenca se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Cordillera Oriental.

1.3.1.1. Evolución Geomorfológica.

La sucesión de acontecimientos tecto-sedimentarios y tectorogénicos que contribuyeron en la formación de la Cordillera Oriental de los Andes, se inicia posiblemente, a partir del Ordovícico al Devónico superior, con movimientos, principalmente de tipo vertical, que acompañaron a la evolución sedimentaria que se iniciaba.

A principios del Cretácico inferior se inicia la tectónica Andina, responsable de las características actuales de la Cordillera Oriental, en principio con un movimiento de tipo vertical, lo que permitió una transgresión del mar sobre la plataforma hercínica peneplanizada, erosión que permitió la sedimentación en cuencas terciarias formadas en el Paleoceno-Eoceno. Es justamente a fines del Eoceno e inicios del Oligoceno que se produce la primera fase compresiva de la orogénesis Andina en la Cordillera Oriental de los Andes, la que provoca pliegues y fallas, íntimamente ligada a ella.

La segunda fase de plegamiento de la orogénesis Andina de fines del Mioceno, afectó principalmente a la Cordillera Oriental.

El Plioceno marca el acontecimiento de la última fase de plegamiento andino, de gran extensión y sincrónica a un levantamiento generalizado del dominio andino y un particular plegamiento del dominio subandino que empieza a levantarse. En el Plioceno las estructuras precedentes ya plegadas, aumentaron su deformación y fallamientos, provocando el volcamiento de las estructuras subandinas.

El acontecimiento más importante en el departamento de Tarija, durante el Pleistoceno medio a superior, fue el relleno de la Cuenca Lacustre de Tarija, donde también está emplazada la población de Padcaya, definida por los bordes de cordones orográficos elevados, constituidos por rocas más antiguas.

El Pleistoceno se caracterizó por una serie de eventos de tipo climático: periodos de glaciaciones y de interglaciaciones, es decir, periodos alternativamente secos y húmedos, respectivamente. En los periodos secos las lluvias fueron irregulares, violentas y de corta duración, donde predominó el escurrimiento laminar y la vegetación escasa, condiciones que permitieron el aporte de gran cantidad de material clástico grueso a la cuenca.

En los periodos interglaciales se sucedieron deshielos y precipitaciones abundantes continuas y regulares, responsables de la formación del lago en la cuenca; en general un clima húmedo y estable, situación que permitió el aumento de la biomasa y extensión de formaciones vegetales continuas. Consiguientemente, los aportes de material al vaso de la cuenca fueron de carácter fluvial, por cursos de ríos bien definidos, depositados en un ambiente lacustre, que finalmente rellenaron toda la cuenca.

Con la colmatación de la cuenca, la profundidad de la misma disminuyó, incrementándose la evaporación y exponiendo los materiales depositados. De esta forma se origina un paisaje de fisonomía mesiforme, ligeramente inclinada. Nuevos cursos de ríos se instalaron en la reciente superficie, los que iniciaron y modelaron su propio cauce, los que al mismo tiempo facilitaron el total desagüe del lago hacia el sur, rompiendo y modelando el actual cañón de la Angostura.

Posiblemente, como efecto de un deterioro climático hacia condiciones de aridez, las características de la vegetación fueron trasmutándose a especies espinosas, y que por las condiciones litológicas frágiles pre-existentes se acelera un proceso de acarcavamiento (*badlands*) de parte de los principales ríos, así como de las nuevas condiciones y tipos de precipitación, torrenciales y de corta duración.

Finalmente, la fragilidad del medio se ve profundamente vulnerada por la participación del hombre.

Fruto de esta evolución geomórfica el área de influencia de la cuenca de Saladillo presenta una importante complejidad en términos de paisaje, que se expresa en paisaje de serranías y colinas, con una fuerte variación altitudinal, desde los 1.740 m.s.n.m. en la parte baja de la cuenca de Saladillo (confluencia con el Río Camacho) hasta los 2080 m.s.n.m. en la cabecera de la cuenca.

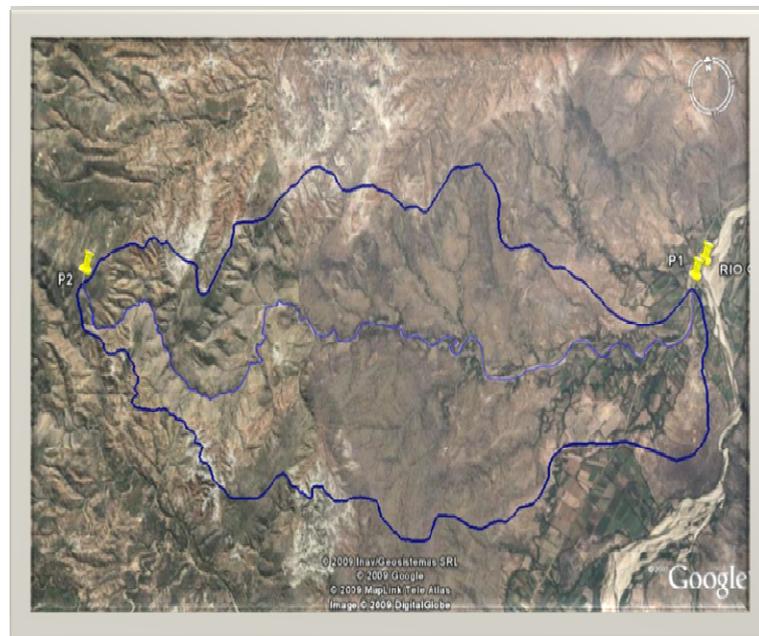


Foto 1.5: Imagen satelital de la Cuenca del Saladillo
Fuente: Elaboración propia

El **Valle Central**, si bien corresponde a la provincia fisiográfica de la Cordillera Oriental, es una región de serranías y colinas que rodean los valles de los ríos Guadalquivir, Tolomosa, Santa Ana y Camacho. El valle se encuentra a una altura entre 1.730 y 2.100 m.s.n.m.. Muestra un clima templado semiárido con temperatura media mensual, entre 15 y 23 °C, la precipitación media anual varía entre 500 y 700 mm y un periodo libre de heladas de 6 a 7 meses; datos que configuran condiciones agroclimáticas favorables para la agricultura y horticultura intensiva. Sin embargo,

sequías, irregularidad en las precipitaciones, granizadas, heladas tardías e inundaciones en los valles son importantes limitaciones naturales que afectan a esta región. La vegetación natural en el Valle Central ha sido mayormente removida mientras la vegetación en las serranías y laderas que rodean al valle, a alturas superiores a 2.100 m.s.n.m., consiste en matorrales andinos xerofíticos en diferentes etapas de degradación y pastizales naturales en las partes más altas.

CORDILLERA ORIENTAL

a) Montañas

Las montañas se constituyen en el gran paisaje, más característico de la Cordillera Oriental. De acuerdo a su amplitud de relieve presenta a nivel de paisaje Montañas altas y medias, se encuentran flanqueando el Valle Central de Tarija, en el sector Noroeste de la zona de estudio, con montañas altas y montañas medias, también se presentan por el lado noreste.

Las montañas se caracterizan por presentar fisonomía de aspecto masivo, cimas variables, divisorias de aguas poco discernibles y con grado de disección de ligero, moderado y fuerte. En muchos sitios se presentan movimientos en masa y vestigios de acción glaciaria. Las pendientes son generalmente extremadamente escarpado mayor a 60 por ciento, con mucha rocosidad y pedregosidad superficial. La litología es variable: se encuentran rocas sedimentarias: areniscas, limonita, arcillita y lutitas.

Los suelos en las montañas son generalmente superficiales, sólo en lugares en procesos de acumulación de material coluvial, algo profundas. Generalmente muestran signos de erosión laminar a moderada y en algunos sectores severa con cárcavas. El drenaje varía de bien a moderadamente bien drenado y los colores de suelo varían de pardo oscuros en los horizontes superficiales a pardo amarillento oscuro en los horizontes a más profundidad. La textura es predominantemente franco arenosa, con muy pocos a abundantes fragmentos gruesos.

b) Serranías

Las serranías a nivel de paisaje son altas, medias y bajas, de formas elongadas con cimas subredondeadas, irregulares, cuyas divisorias de aguas son perfectamente discernibles; la disección varía de moderada, fuerte a muy fuerte, donde las pendientes varían desde fuertemente escarpado de 30 a 60 por ciento a extremadamente escarpado mayor a 60 por ciento. La cantidad de piedras y rocas superficiales varía desde poca a mucha. El material a partir del cual han sido modeladas las serranías es preponderantemente de origen sedimentario, como areniscas, lutitas, limonitas y arcillita, con intercalaciones de rocas metamórficas como cuarcitas.

Los suelos varían de superficiales a profundos; frecuentemente se aprecia erosión principalmente laminar, cuya intensidad puede variar desde ligera hasta severa, y diferentes tipos de movimientos en masa. Los suelos son bien drenados, con colores pardos amarillento oscuro a pardo oscuros. La textura varía de franco arcillosa a franco arenosa, con pocos a abundantes fragmentos de grava fina a piedras y la estructura generalmente es en bloques subangulares.

c) Colinas

Las colinas presentan a nivel de paisaje de altas, medias y bajas, presentando normalmente, cimas subredondeadas a redondeadas, con divisorias de aguas poco discernibles. Con ligera, moderada a fuertemente disectadas, con pendientes de moderadamente escarpados de 15 a 30 por ciento a fuertemente escarpados de 30 a 60 por ciento, con mucha rocosidad en la superficie y abundante pedregosidad superficial. Las pendientes son afectadas por movimientos en masa. La litología está constituida, en orden de importancia, por lutitas, limolitas y areniscas de origen sedimentario, como también por material de rocas metamórficas como cuarcitas.

Los suelos varían de muy superficiales a moderadamente profundos, con erosión laminar y surcos. Son moderadamente bien a bien drenados, pardo amarillentos oscuros, de textura franco arcillosa, con contenidos bajos a medios de materia orgánica, mientras la disponibilidad de nutrientes es baja a media.

d) Piedemontes

Los piedemontes tienen ligera, moderada hasta fuerte a muy fuertemente disectación. Este paisaje presenta inclusiones de llanuras de piedemonte. Las pendientes varían desde ligeramente ondulado, ondulado, fuertemente ondulado, moderadamente escarpado y fuertemente escarpado, sin o con poco afloramiento rocoso, pero con abundante pedregosidad superficial. Mayoritariamente los piedemontes están constituidos por material coluviales, coluvio-aluvial con diverso grado de selección y redondeamiento.



*Figura 1.6: Características topográficas de la Cuenca El Saladillo
Fuente: Elaboración propia.*

Los suelos varían desde poco desarrollados, con características flúvicas, a otros suelos calcáreos, mientras que otros evidencian iluviación de arcilla. Generalmente se aprecia una erosión acelerada en cárcavas y laminar moderada, como también eólica ligera. En general son moderadamente profundos a profundos, desde bien a imperfectamente drenados. Los colores dominantes varían de pardo oscuros a pardo amarillento oscuro y las texturas de franco arcillo arenosas a franco-limosas, con cantidades variables de fragmentos gruesos. La estructura se presenta en bloques subangulares.

GEOLOGÍA

1.3.1.2. Marco Estructural Regional.

Desde el punto de vista estructural, la región muestra el estilo tectónico correspondiente a la Cordillera Oriental el cual presenta plegamientos y un intenso fallamiento en las formaciones de roca, con mayor perturbación y complicación tectónica.

Tal actitud morfoestructural es la consecuencia de una rígida comprensión cortical acentuada por la tectónica que imprimieron los movimientos andinos de fines del terciario, que también son los responsables de su considerable elevación.

En esta gran unidad geológica predomina el fallamiento en bloque con fracturas escarpadas, manifestando elocuentemente por los cabalgamientos de los cuerpos rocosos que conforman los cordones montañosos de Tacsara-Sama (basamento precámbrico-paleozoico inferior).

Las fallas regionales más destacadas son: la falla Tacsara cuya traza en inmediaciones de Camacho contacta rocas del basamento precámbrico con ordovícicas y prosigue al

Norte con morfología escarpada marginando el valle de Tarija para internarse en el río La Victoria. La cuenca de Saladillo se encuentra flanqueada por dos fallas inversas paralelas entre sí con rumbo nor noreste – sud sudeste. (*Figura 1.11*).

ORODOVICICO

Formación Cieneguillas compuestas de Limolitas y lutitas gris oscuras, con niveles de areniscas



Figura 1.7: Formación Cieneguillas
Fuente: Elaboración propia

SILÚRICO

Formación Kirusillas compuesta por Limolitas y lutitas color gris oscuro La cuenca de Saladillo



*Figura 1.8: Formación Kirusillas,
Fuente: Elaboración propia*

CUATERNARIO

- **Sedimentos.**

Fluviales Lacustres

Fluviales Evaporíticos



*Figura 1.9: Rocas sedimentarias.
Fuente: Elaboración propia.*

PLANO GEOLÓGICO

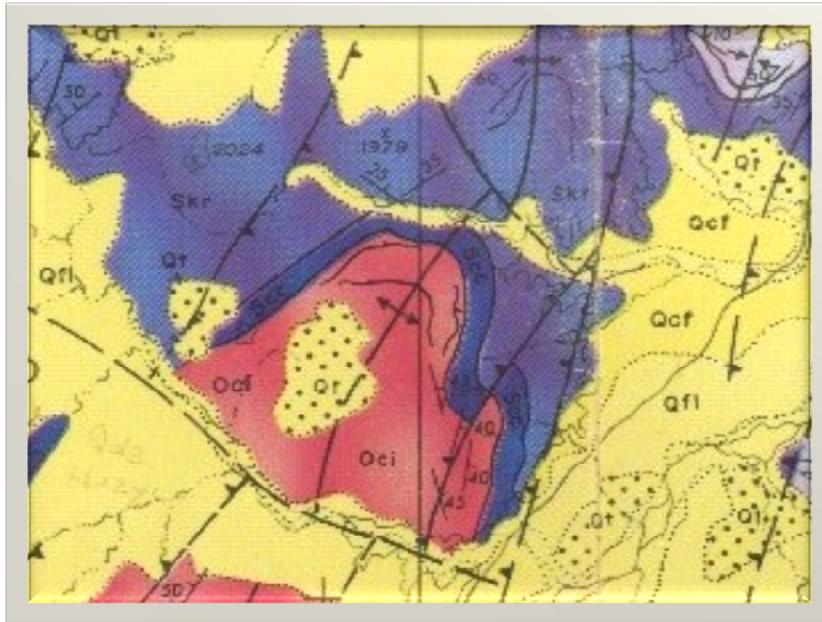


Figura 1.10: Plano Geológico

REFERENCIAS

	Ordovícico - Formación
	Silúrico Formación Kirusillas
	Sedimentos Cuaternarios
	Falla Inversa dentadura indica bloque elevado
	Falla
	Rumbo y Buzamiento.

RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA EL SALADILLO

Característica	Cuenca El Saladillo
Área de la Cuenca (A)	15.16 Km ²
Perímetro (P)	21.13 Km
Cota Máxima de la cuenca (H _{cmax})	2080.0 m.s.n.m.
Cota Máxima del Curso Principal (H _{rmax})	2000.0 m.s.n.m.
Cota a la Salida de la Cuenca (H _{min})	1740.0 m.s.n.m.
Cota media de la cuenca (H _{med} = (H _{max} - H _{min})/2 + H _{min})	1870.0 m.s.n.m.
Diferencia de Cotas en el Curso Principal (DH _r =H _{rmed} -H _{min})	260.0 m
Longitud del Curso Principal (L)	9.0 Km
Pendiente del Curso Principal (S=DH _r /L)	3.0 %

*Cuadro 1.1: Características Físicas de la Cuenca El Saladillo.
Fuente: Elaboración propia.*

1.4.- Hidrología de La Cuenca.

El estudio hidrológico tiene por objetivo recopilar información relacionada con las características hidrológicas de la cuenca, la misma presenta diversas sub cuencas de drenaje que colectan las aguas generadas por lluvias en la zona y las evacuan a los cauces principales.

Como se muestra en la figura 12 (Área de Estudio), la zona de estudio posee un sistema de drenaje definido por la dirección del escurrimiento y áreas de aporte de todos los cursos de aguas tributarias de la Quebrada Saladillo, las mismas son evacuadas al cauce del Rio Camacho.

Considerado las estaciones meteorológicas mas cercanas al área de estudio (cuenca del Saladillo), se ha tomado en cuenta las estaciones meteorológicas de la Comunidad de Chocloca y del CENAVIT (Concepción), con los datos extraídos de estas estaciones se han determinado las características hidrológicas de la cuenca.

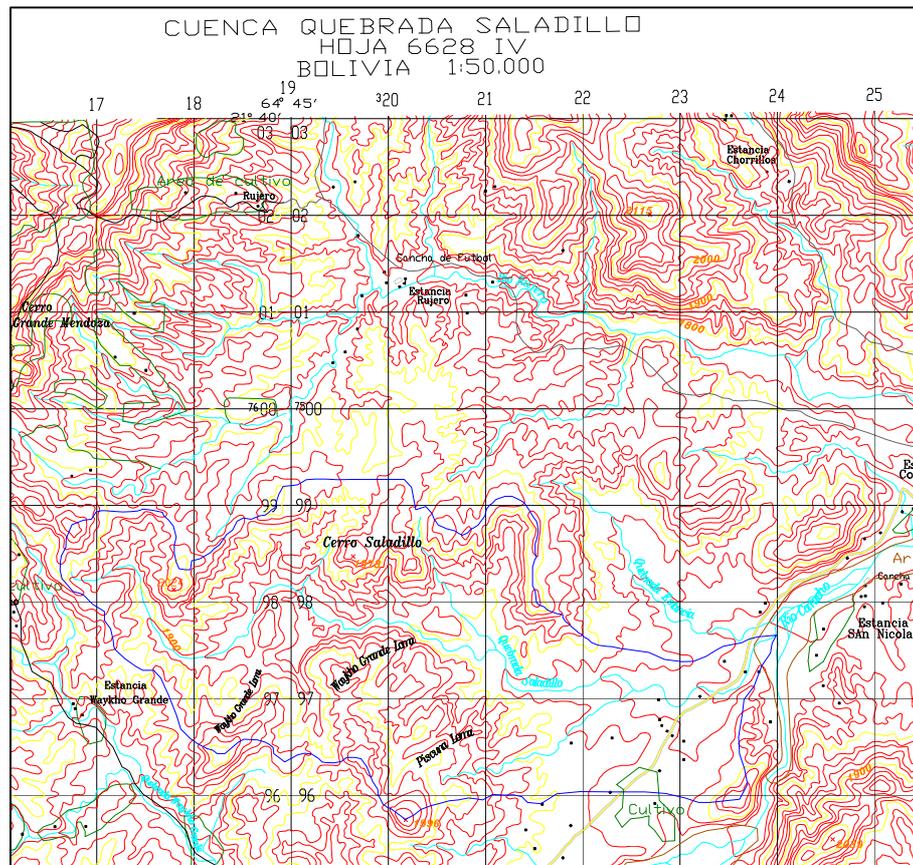


Figura 1.12: Área de Estudio.
Fuente: I.G.M.

1.4.1. Temperaturas.

De acuerdo a los datos extraídos de las estaciones de Chocloca y CENAVIT, se tiene los valores extremos, máximos y mínimos de 39.5 °C y -8.5°C en la estación de Chocloca y de 41 °C y -9 °C en la estación del CENAVIT.

1.4.2. Evaporación.

De acuerdo a los datos extraídos de las estaciones de Chocloca y CENAVIT, se tiene los valores promedios anuales de 52.40 mm. en la estación de Chocloca y de 62.10 mm. en la estación del CENAVIT.

1.4.3. Humedad.

La humedad relativa, promedio mensual, fluctúa de un mínimo del orden de 40% hasta un máximo de 76%, los datos correspondientes a las estaciones del CENAVIT y de Chocloca.

1.4.4. Viento.

Los vientos dominantes tienen dirección Sur-Este; presentándose también con dirección Sur.

La velocidad media observada varía, en los meses de mínima de 2 a 10 Km/hora y en los meses de máxima alcanza los 20 Km/hora.

En general los vientos son débiles, sin embargo excepcionalmente se presentan vientos fuertes que alcanzan velocidades de cerca a los 90 Km/hora.

1.4.5. Precipitación pluvial.

La precipitación pluvial en la cuenca, se caracteriza por ser predominantemente convectivo-orográfica, concentrada en los meses de Noviembre a Marzo, siendo prácticamente nula en el período de Mayo a Septiembre. La precipitación media anual varía desde los 657,8 mm en Chocloca hasta 443,2 mm en Concepción.

1.4.6. Caudales.

En el cuadro siguiente se resumen los resultados obtenidos de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno.

Lugar de Estudio	Período de Retorno	Caudal en m ³ /s		
		SCS	Racional Modificado	Adoptado
Qda. Saladillo	100	147	108.91	109
A = 19,34 km ²	50	132	98.85	99

Cuadro 1.2: Caudales máximos en la cuenca del saladillo.
Fuente: Elaboración propia.

1.5. Obras Civiles Existentes en la Cuenca.

1.5.1. Obras civiles de Hormigón Armado.

La principal obra construida en la cuenca El Saldillo, es el puente de Hormigón Armado con vigas pretensadas, construido en el año 2006, este puente une las comunidades de Chocloca, Juntas, Chaguaya y otras con el Municipio de Uriondo.



Figura 1.13: Puente de hormigón con vigas pretensadas construido el año 2006.
Fuente: Elaboración propia.

Canal tapado semidestruído que provee agua captada del Río Camacho para regar terrenos ubicados en la margen izquierda de la Quebrada del Saladillo. Figura 1.14.



*Figura 1.14: Canal de Riego.
Fuente: Elaboración propia.*

1.5.2. Obras civiles de Protección con Gaviones.

Las obras civiles de mayor presencia en la Cuenca del Saladillo, son los gaviones construidos a lo largo de la Quebrada del Saladillo, en las visitas realizadas al lugar, se ha podido observar que existen gaviones construidos recientemente que se encuentran en buen estado y gaviones viejos colapsados.



*Figura 1.15: Gavión en buen estado.
Fuente: Elaboración propia.*



Figura 1.16: Gavión colapsado.
Fuente: Elaboración propia.

Aunque no es el tema de estudio, los gaviones observados en su mayoría se encuentran afectados por la corrosión, unos con principios de corrosión y otros seriamente corroídos.

CAPÍTULO II
DETERMINACIÓN DE LA SALINIDAD

2.1. El Problema de la Salinidad.

2.1.1. Sales.

Las sales son compuestos que se forman cuando un ion metálico positivo se une con un ion halogénico negativo.

- a. **Iones Metálicos:** son átomos de metales que se caracterizan por tener electricidad siempre positiva, y esta carga es numéricamente igual al número de oxidación.

Ejemplo:

Na⁺ ion sodio

Fe²⁺ ion ferroso

Fe³⁺ ion férrico

- b. **Iones Alógenos:** son átomos de no-metales cargados de electricidad negativa. Existen dos clases de iones halogénicos:

- De tipo -uro o sin oxígeno

Son átomos no-metálicos con electricidad negativa sin oxígeno.

Ejemplo:

Cl¹⁻ Cloro, átomo de no-metal halógeno sin oxígeno con carga eléctrica 1-

S²⁻ Fósforo, átomo de no-metal calcógeno sin oxígeno con carga 2-

- Oxigenados o de tipo -ito, -ato.

Son átomos no metálicos con electricidad negativa con oxígeno, son iones provenientes de los oxácidos.

Ejemplo:

SO_4^{2-} ion sulfato

PO_4^{3-} ion fosfato

2.1.2. Clases de Sales.

Hay dos clases de sales:

- a. **Sales holoideas** (sales del tipo uro) que presentan su ion hologénico sin oxígeno

Ejemplo:

NaCl cloruro de sodio

SnS_2 sulfuro de estaño

- b. **Sales oxisales** (sales del tipo ito-ato) presentan un ion hologénico con oxígeno.

Ejemplo:

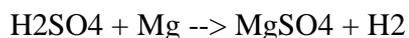
FeSO_4 sulfato de hierro

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ fosfato de calcio

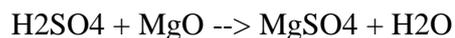
2.1.3. Obtención de las Sales.

Las sales se obtienen principalmente por la reacción de:

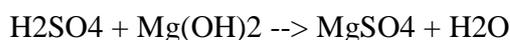
a. Ácido + Metal --> SAL + H₂



b. Ácido + óxido --> SAL + H₂O



c. Ácido + Hidróxido --> SAL + H₂O



2.1.4. Clasificación de las Sales.

Las sales se clasifican en 5, esta clasificación se basa en su composición:

a. Neutras o normales

Las sales neutras o normales, son las que contienen un ion metálico positivo y un ion hologénico negativo.

Ejemplo:

NaCl cloruro de sodio

Cu(NO₃)₂ nitrato de cobre(II)

b. Ácidas o hidrógeno sales

Las sales ácidas o hidrógeno sales, contienen un ion metálico positivo y un ion hidrógeno hologénico negativo.

Ejemplo:

Ba(HCO₃)₂ carbonato ácido de bario

KHSO₄ Sulfato ácido de potasio

c. Básicas o hidróxido sales

Las sales básicas o hidróxido sales, tienen un ion metálico, iones hidróxido y un ion hlogénico. Estas sales básicas son sales e hidróxidos a la vez.

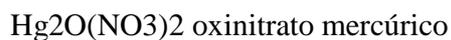
Ejemplo:



d. Óxido sales

Óxido sales, llevan el ion metálico, iones negativos óxido O^{2-} y el ion halogénico.

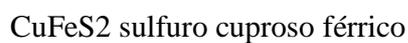
Ejemplo:



e. Sales dobles.

Las sales dobles, llevan dos iones metálicos distintos y un ion hlogénico, o también pueden llevar un ion metálico y dos iones hlogénicos distintos, es decir, que estos compuestos

Ejemplo:



2.1.5. Definición de salinidad:

“La salinidad se define como el contenido de sal disuelta en un cuerpo, esta expresión válidamente es utilizado par referirse al contenido salino de agua y suelo”.

Antes de 1978, la salinidad se expresaba en partes por mil ‰ (gramos de sal por litro de solución), basándose en la relación de conductividad eléctrica de la muestra de "agua de Copenhague" (un medio acuoso "agua de mar" artificial, hecho para servir como "estándar").

En 1978, los oceanógrafos redefinen la salinidad en **Unidades Prácticas de Salinidad (psu)**: relación de conductividad de una muestra de agua de mar con una solución estándar de *KCl*. Como las relaciones no tienen unidades, pero no es el caso aquí ya que 35 psu exactamente equivale a 35 g de sal por L de solución.

2.1.6. Fuente de las sales solubles.

Las sales solubles del suelo consisten principalmente en varias proporciones de los cationes sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg), y de los aniones cloruro de sulfato; el catión potasio (K) y los aniones bicarbonato (HCO_3), carbonato (CO_3) y nitrato (NO_3), se encuentran generalmente en cantidades menores. **La fuente original y en cierto modo la más directa de la cual provienen las sales antes mencionadas, son los minerales primarios que se encuentran en los suelos y en las rocas expuestas de la corteza terrestre.** Clarke (1924) ha estimado que el contenido medio de cloro y azufre de la corteza terrestre es de 0.05 y 0.06 por ciento, respectivamente, mientras que el sodio, calcio y magnesio casi se encuentran a razón de 2 a 3 por ciento. Durante el periodo de intemperización química que comprende hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación, estos constituyentes gradualmente son liberados adquiriendo mayor solubilidad.

Los iones bicarbonato se forman como consecuencia de la solución del CO_2 en agua. El CO_2 puede ser de origen atmosférico o biológico y el agua que contiene CO_2 es un activo agente químico intemperizante que libera cantidades apreciables de cationes en

forma de bicarbonatos. Los iones carbonato y bicarbonato están relacionados entre sí, y la cantidad que hay de cada uno es una función del pH de la solución. Mayores cantidades de iones carbonato, solo pueden presentarse para valores de pH de 9,5 o más altos.

Aunque la intemperización de los minerales primarios es la fuente indirecta de casi todas las sales solubles, hay pocos ejemplos en los que se haya acumulado suficiente cantidad de sal de este origen para formar un suelo salino. Los suelos salinos generalmente se encuentran en áreas que reciben sales de otras localidades, siendo el agua el principal factor de acarreo. El océano puede ser la fuente de sales en aquellos suelos en los que el material original está constituido por depósitos marinos que se asentaron durante periodos geológicos antiguos y que a partir de entonces han emergido. El océano es también la fuente de sales en los suelos bajos que se encuentran a lo largo de la costa. A veces la sal se mueve tierra adentro a consecuencia del transporte por la brisa, denominándose sal cíclica (Teakle, 1937). Sin embargo es más común que la fuente directa de estas sales sean las aguas superficiales y también las subterráneas, ya que las contienen disueltas y su concentración depende del contenido salino del suelo y de los materiales geológicos que han estado en contacto con estas aguas.

De acuerdo al análisis geológico de la Cuenca del Saladillo se ha podido detectar que la fuente de contaminación sales se debe a la meteorización de las rocas en la parte alta de la cuenca y a la evaporación del agua que drena en pequeñas cantidades en algunos sectores donde existe estratos de suelo poroso, como resultado de esto da un polvo blanco arcilloso.



*Figura: 2.1: Estrato poroso de color amarillento.
Fuente: Elaboración propia*

La Figura: 2.1: muestra el estrato poroso de color amarillento compuesto por areniscas por donde el agua en pequeñas cantidades drena a la superficie, al evaporarse en la superficie de la roca, se forma una capa de un polvo de color blanco arcilloso que se puede apreciar a simple vista.



*Figura: 2.2: Polvo blanco arcilloso que se encuentra en la parte alta de la Cuenca del Saladillo.
Fuente: Elaboración propia*

2.1.7. Salinidad del Agua.

El agua es el más importante de todos los compuestos y uno de los principales constituyentes del mundo en que vivimos y de la materia viva, por lo tanto es el componente más importante para todo ser vivo, por ello es indispensable tomar en cuenta tanto su calidad como su disponibilidad en el medio. Casi las tres cuartas partes de nuestra superficie terrestre están cubiertas de agua.

El agua está conformada por dos elementos: El hidrógeno (H) y el oxígeno (O) y su fórmula química es H₂O.

En forma natural el agua puede presentarse en tres estados físicos: Sólido, líquido y gaseoso, sin embargo, debe tenerse en cuenta que en forma natural casi no existe pura, pues casi siempre contiene sustancias minerales y orgánicas disueltas o en suspensión.

El océano es una de las fuentes principales de sales solubles, se caracteriza por la presencia de un 35 % de sales solubles en peso. Las mayores concentraciones iónicas son las del Na y del Cl, también hay cantidades significativas de Mg y SO₄. El pH varía entre 7,5 y 8,4.

El agua salina que se encuentra en los continentes está compuesta principalmente de: cationes sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg), y de los aniones cloruro de sulfato; el catión potasio (K) y los aniones bicarbonato (HCO₃), carbonato (CO₃) y nitrato (NO₃).

En este caso particular nos referiremos al cloro, calcio y bicarbonatos que es el compuesto químico que se encuentra en mayor cantidad en el agua salina de la cuenca del saladillo y además como el agente principal de corrosión en las armaduras de acero que forma parte de las estructuras de hormigón armado.

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, el agua de la Cuenca del Saladillo tiene las siguientes características:

ANÁLISIS DE AGUA

MUES TRA	T °C	pH	CE uS/cm	Bicarbonato HCO ₃ mg/l	Dureza CaCO ₃ mg/l	Cl mg/l	Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	Sulfato mg/l	Sólidos en suspensión mg/l	Sustancias Disueltas mg/l
MA-1	24	8.00	1333.00	125.00	559.00	160.3	114.5	11.5	62.9	300.4	23.8	495.50
MA-2	24	7.70	1172.00	121.00	560.00	165.8	115.0	11.9	65.5	298.0	20.0	493.75
MA-3	24	6.90	1151.00	120.00	558.00	170.0	114.5	12.3	66.2	276.8	24.0	494.80
MA-4	24	8.80	1180.00	155.00	530.00	160.0	112.8	13.0	66.0	275.7	22.3	496.71
MA-5	24	7.60	1171.00	139.00	559.00	186.9	113.2	12.8	64.5	280.9	23.5	494.50
MA-6	24	7.60	1.176.00	130.00	520.00	180.0	111.2	12.4	64.0	290.0	22.9	495.00
MA-7	24	7.30	1.360.00	155.00	525.00	180.0	109.9	11.9	62.6	275.3	22.9	495.80
MA-8	24	7.50	1350.00	121.00	530.00	186.2	106.5	12.9	63.5	273.5	21.5	494.00
MA-9	24	7.5	1176.00	120.00	520.00	160.0	105.0	11.0	62.6	300.4	24.0	496.71
MA-10	24	7.3	1169.00	194.00	560.00	186.9	115.0	13.0	66.7	272.9	20.0	493.75
MA-11 Rio Cam.	24	6.9	415.00	100.00	112.00	15.3	55.0	50.0	6.15	125.1	11.0	175.28

Cuadro 2.1: Resultados del análisis de las muestras de agua, analizadas en el laboratorio.

Fuente: Elaboración propia

Las diez primeras muestras de agua, de la MA-1 hasta la MA-10, se tomaron de la Quebrada El Saladillo y la muestra MA-11, se tomo del cauce del Rio Camacho, por lo que para nuestro estudio, se considerara las diez primeras muestra.

La muestra tomada del Rio Camacho, ha sido extraída para fines de realizar una comparación de la contaminación salina entre las aguas del Rio Camacho y las aguas provenientes de la Quebrada del Saladillo, por lo que se puede apreciar que de acuerdo a los datos obtenidos del laboratorio, el agua del Rio Camacho presenta menor cantidad de sustancias contaminantes que el agua de la Cuenca del Saladillo.

2.1.8. Salinidad del Suelo.

Suelo Salino

Los suelos salinos deben su carácter particular al hecho de que contienen cantidades excesivas de sales solubles, que producen efectos perjudiciales a las plantas al

aumentar el contenido de la sal de la solución del suelo y también el grado de saturación de bases con sodio intercambiable.

Casi siempre se reconocen los suelos salinos por la presencia de costras blancas de sal en la superficie. La salinidad de un suelo puede ocurrir cuando éste tiene un perfil característico y plenamente desarrollado, o cuando posee material edáfico no diferenciado como en el caso del aluvión.

Las características químicas de los suelos salinos quedan determinadas principalmente por el tipo y cantidad de sales presentes. La cantidad de sales solubles presentes controla la presión osmótica de la solución del suelo. El sodio rara vez representa más de la mitad del total de los cationes solubles y por lo tanto, no es absorbido en forma importante. Las cantidades relativas de calcio y magnesio presentes en la solución del suelo y en el complejo de intercambio, varían considerablemente. Tanto el potasio soluble como el intercambiable son, en general, constituyentes de menor importancia, aun cuando ocasionalmente se tornen en constituyentes mayores. Los aniones principales son el cloruro, el sulfato y a veces el nitrato. Pueden presentarse también pequeñas cantidades de bicarbonato, pero invariablemente los carbonatos solubles casi no se encuentran. Aparte de sales rápidamente solubles, los suelos salinos pueden contener sales de baja solubilidad, como el sulfato de calcio, (yeso) y carbonatos de calcio y magnesio (caliza).

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, el suelo de la Cuenca del Saladillo tiene las siguientes características:

ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO

Muestra	pH	CE uS/cm	Ca mg/l	HCO ₃ mg/lt	Cl mg/lt	SO ₃ mg/lt
M-1	6,2	750,00	1073,00	0,25	0,00	0,00
M-2	6,2	750,00	1173,00	540,00	175,00	0,00

Cuadro 2.2: Resultados del análisis de las muestras de suelo, analizadas en el laboratorio.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN DE LA SALINIDAD

3.1. Generalidades.

En la evaluación de la salinidad en la Cuenca del Saladillo se ha empleado información obtenida a través de un levantamiento de doce muestras de agua y dos suelo, los resultados fueron obtenidos a través de ensayos en un laboratorio particular.

Además se ha obtenido información geográfica de cartas del Instituto Geográfico Militar (IGM), imágenes satelitales y fotografías realizadas a lo largo del cauce de la Cuenca del Saladillo.

3.2. Criterios de Evaluación.

En el establecimiento de la clasificación de la salinidad de los suelos, se ha diferenciado suelos con salinidad “incipiente” y suelos con salinidad “evidente”. Los primeros son aquellos que no manifiestan síntomas visibles de presencia de sales, demostrando sin embargo su condición salina. Aparentemente en los suelos con salinidad incipiente se encuentran algunas manchas salinas. Dentro de la evaluación de los problemas de salinidad, los suelos de salinidad incipiente no se han considerado como problemáticos.

Los suelos de salinidad evidente son aquellos que demuestran claramente la presencia de sales, ya sea bajo la forma de afloración de costras o manchas salinas.

Para la obtención del grado de salinidad de una sustancia, se ha considerado a la Conductividad Eléctrica (C.E.). Cuanto mas sales contiene una muestra de suelo, mayor será la Conductividad Eléctrica (C.E.).

Los diferentes niveles de la salinidad del suelo se muestran en el siguiente cuadro.

CLASIFICACIÓN DE LA SALINIDAD

C.E. (uS/cm) a 25°C	Calificación
Hasta 750	Salinidad Baja
750 a 1.500	Salinidad Media
1.500 a 3.000	Salinidad Alta
Mayor de 3.000	Salinidad Muy Alta

Cuadro 3.1: Calificación de la Salinidad según el Comité de Consultores de la Universidad de California

3.2.1. Agua.

Tomando la Conductividad Eléctrica (C.E.) de mayor valor, obtenida en el laboratorio de 1360,00 uS/cm. y relacionando con el clasificador de la salinidad de suelos según el Comité de Consultores de la Universidad de California (Cuadro 3.1), el agua de la Cuenca del Saladillo tiene una **SALINIDAD MEDIA**.

Para analizar los efectos que produce la salinidad en las estructuras de hormigón armado, se tomara los valores más altos, considerando que algunos de los compuestos químicos que se encuentran presente en la cuenca, como ser el Cl y CaCO₃ afectan radicalmente a las estructuras de hormigón armado.

3.2.2. Suelo.

Tomando la Conductividad Eléctrica (C.E.) obtenida en el laboratorio de 750,00 uS/cm. y relacionando con el clasificador de la salinidad de suelos según el Comité de Consultores de la Universidad de California (Cuadro 3.1), el suelo de la Cuenca del Saladillo tiene una **SALINIDAD BAJA**.

Sin embargo que el suelo analizado presenta baja concentración salina, presenta cantidades apreciables de Calcio (Ca), Bicarbonatos (HCO_3) y Ion Cloro (Cl^-) tal como se muestra en el cuadro 2.1.

Para analizar los efectos que produce la salinidad en las estructuras de hormigón armado, se tomara los valores más altos, considerando que algunos de los compuestos químicos que se encuentran presente en la cuenca, como ser el Ion Cloro (Cl^-) y los Bicarbonatos (HCO_3) afectan radicalmente a las estructuras de hormigón armado.

En la figura 3.1, se presenta la Muestra N° 1 (M-1) del suelo extraído del lecho de la Quebrada El Saladillo, ubicada en la cabecera de la Cuenca El Saladillo, que ha sido analizado en laboratorio para determinar el contenido del Ion Cloro (Cl^-) y los Bicarbonatos (HCO_3) y otras sustancias que afecten a las estructuras de hormigón armado existentes en la Cuenca El Saladillo..



*Figura 3.1: Muestra de suelo (Muestra 1).
Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 3.2, se presenta la Muestra N° 2 (M-2) del polvo blanco extraído del lecho de la Quebrada El Saladillo, ubicada en la cabecera de la Cuenca El Saladillo,

que ha sido analizado en laboratorio para determinar el contenido del Ion Cloro (Cl^-) y los Bicarbonatos (HCO_3^-) y otras sustancias que afecten a las estructuras de hormigón armado existentes en la Cuenca El Saladillo.



*Figura 3.2: Polvo fino de color blanco (Muestra 2, M-2)
Fuente: Elaboración propia.*

CAPÍTULO IV
EFFECTOS DE LA SALINIDAD EN ESTRUCTURAS
DE HORMIGÓN MADO

4.1. Antecedentes.

4.1.1. Hormigón.

El hormigón es un material de construcción sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a sollicitaciones de tracción.

El hormigón es considerado como rey universal de los materiales de construcción, esto se debe a sus indiscutibles ventajas.

1. Es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma, debido al carácter plástico que posee en estado fresco.
2. Posee elevada resistencia mecánica a la compresión y, aunque posee menor resistencia a la tracción, permite aumentarla embebiendo acero en su interior.
3. Proporciona piezas de gran monolitismo, prescindiendo de juntas o uniones, que suelen ser zonas débiles. Desde el punto de vista es mejor que las construcciones pétreas, de ladrillo o de acero laminado.
4. Está formado por materiales abundantes.

Pero no todo son ventajas en el hormigón, pues este material puede tener serios inconvenientes.

1. Es un material pesado con una relación peso/resistencia elevada.

2. Presenta anisotropía (por ejemplo, en su resistencia mecánica).
3. Es sensible a determinados agentes agresivos, tanto de tipo físico como químico.

4.1.1.1. Composición del Hormigón.

El hormigón es un material de construcción que se obtiene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava. De la distinta mezcla de estas materias primas se obtienen también otros materiales de construcción afines:

- **Pasta de cemento:** proviene de la mezcla de agua y cemento.
- **Mortero:** Proviene de la mezcla de agua, cemento y arena.
- **Hormigón:** Proviene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava.

A estos materiales, en el momento de su amasado, se les puede añadir otros productos para mejorar algunas características determinadas.

Para aprovechar sus fortalezas y superar sus limitaciones, en estructuras se utiliza el hormigón combinado con barras de acero resistente a la tracción, lo que se conoce como hormigón armado.

4.1.1.1.1. Agua.

El **agua**, considerada como materia prima para el **amasado y curado** del hormigón debe cumplir con determinadas normas de calidad. Las normas para la calidad del agua son variables de país a país, y también pueden tener alguna variación según el tipo de cemento que se quiera mezclar. Las normas que se detallan a continuación son

por lo tanto generales. Esta deberá ser limpia y no deberá contener residuos de aceites, ácidos, sulfatos de magnesio, sodio y calcio (llamados álcalis blandos) sales, limo, materias orgánicas u otras sustancias dañinas y estará asimismo exenta de arcilla, lodo y algas. Por lo que deberán ser rechazarse las que no cumplan una o varias de las siguientes condiciones:

Sustancias y pH		Valores Limites
Ph	≥	5
Sustancias disueltas	≤	15000 mg/l
Sulfatos	≤	1000 mg/l
Ion Cloro Cl ⁻	≤	6000 mg/l
Hidratos de Carbono	=	0
Sustancias Orgánicas disueltas en éter	≤	15000 mg/l

*Cuadro 4.1: Limites de sustancias disueltas en el agua para el H^o
Fuente: CBH-87.*

4.1.1.1.2. Cemento.

Se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado hormigón o concreto.

4.1.1.1.2.1. Composición del cemento portland.

El cemento portland está formado básicamente por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción, hasta sinterización, de una mezcla de caliza y arcilla, que recibe el nombre de clinker y de un material empleado como regulador de fraguado que, generalmente, es yeso dihidratado (CaSO₄*2H₂O). La fabricación del cemento Portland se esquematiza en la figura 4.1. El clinker, componente básico del cemento, está formado por una mezcla de silicatos, aluminato y ferrito aluminato de cal, esto hace que la composición de las materias primas que van a formar el crudo, es decir, el

material que se cruce en el horno, han de estar los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en proporciones muy concretas. Acompañando a los óxidos aparecen en las materias primas otros que no son tan deseables a pesar de estar en menores proporciones. Son los de magnesio, sodio, potasio y otros. Estos óxidos suelen designarse y representarse de forma abreviada de acuerdo a las indicaciones de la figura 4.1

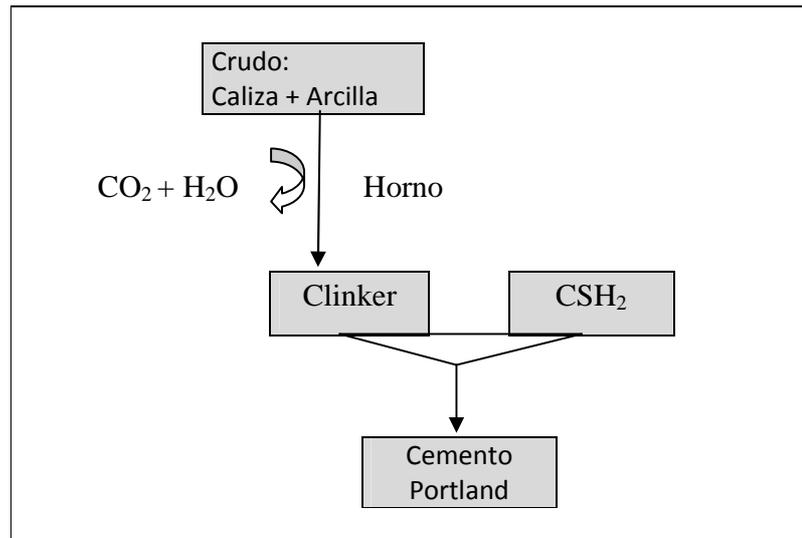


Figura 4.1. Fabricación del cemento Portland.

Fuente: *Biblioteca virtual Miguel de Cervantes*.

Los límites aproximados entre los que oscila la composición en óxidos de un cemento Portland son los que figuran en la Cuadro 1.2. Los cuatro primeros óxidos dan lugar a los componentes activos o principales del cemento Portland mientras que los restantes se consideran como componentes secundarios o no deseables.

Nombre	óxidos	P.M. (g/mol)	Abreviatura
Cal	CaO	56	C
Sílice	SiO ₂	60	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	102	A
Oxido férrico	Fe ₂ O ₃	160	F
Agua	H ₂ O	18	H
Trióxido de azufre*	SO ₃	80	S
Dióxido de carbono**	CO ₂	44	C
Magnesia	MgO	40	M
Oxido de sodio	Na ₂ O	62	N
Oxido de potasio	K ₂ O	94	K

Cuadro 4.2: Nomenclatura abreviada de los óxidos que componen el cemento Portland.

Fuente: *Biblioteca virtual Miguel de Cervantes*.

* Nunca se encuentra como tal, sino combinado como por ejemplo en el yeso añadido como regulador de fraguado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \overline{\text{CSH}_2}$

**Nunca se encuentra como tal, sino combinado como por ejemplo en el carbonato cálcico formado tras la carbonatación del cemento $\text{CaCO}_3 = \overline{\text{CC}}$

4.1.1.1.2.2. Componentes del Clinker Portland.

Los componentes minerales principales o activos del clinker son los que aparecen representados en la tabla 1.3. Estos están formados por la composición de dos o más óxidos principales y forman cristales mixtos en los que entran compuestos de otras fases en cantidades reducidas. Los componentes principales se encuentran en el clinker en estado cristalino aunque no en su totalidad pues de un 2 a un 12% de ellos se encuentra en fase amorfa.

De los cuatro componentes principales del clinker, los silicatos suman del 60 al 80% de ellos y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento. Estos componentes son:

- **Silicato tricálcico (C₃S) o alita:** Este componente se puede considerar como el principal o decisivo del clinker, confiriendo altas resistencias iniciales al hormigón.
- **Silicato bicalcico (C₂S) o belita:** Este componente, metaestable, da pocas resistencias en los primeros días pero luego las va desarrollando progresivamente hasta alcanzar al silicato tricálcico.

Óxidos	Contenido (% en peso)
C	60-67
S	17-25
A	3-8
F	0.5-6
M	0.1-4
N+K	0.4-1.3
S	0.1-2.5
TiO ₂	0-0.5
Mn ₂ O ₃	0-0.3

Cuadro 4.3: Composición en óxidos del cemento Portland.

Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

Nombre	Composición	P.M. (g/mol)	Calor de hidratación (cal/g)	Formula abreviada	Nombre del mineral
Silicato tricálcico	3CaO*SiO ₂	228	120	C ₃ S	Alita
Silicato bicálcico	2CaO*SiO ₂	172	60	C ₂ S	Belita
Aluminato tricálcico	3CaO*Al ₂ O ₃	270	207	C ₃ A	Felita
Ferrito aluminato tetracálcico	4CaO Al ₂ O ₃ *Fe ₂ O ₃	486	100	C ₄ AF	Celita

Cuadro 4.4: Principales componentes minerales del cemento Portland.

Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

- **Aluminato tricálcico (C₃A) o felita:** Este componente por sí solo contribuye muy poco a la resistencia del cemento pero, en presencia de los silicatos, desarrolla unas resistencias iniciales buenas. Su hidratación es rapidísima al tomar contacto con el agua. Para retrasar su actividad se utiliza el yeso que actúa como regulador del fraguado. Hay que tener también presente que los clinkerres que poseen un contenido alto de aluminato tricálcico dan lugar a pastas, morteros

y hormigones muy sensibles al ataque por sulfatos y otros agresivos. No obstante, este componente tiene la capacidad de fijar al cloruro, reduciendo el riesgo de corrosión de las armaduras.

- **Ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) o celita:** Apenas tiene importancia en la resistencia del cemento. El óxido de hierro tiene la finalidad de actuar como fundente durante la cocción del crudo.

La composición en componentes principales de un cemento se puede estimar a partir de su composición en óxidos. Es lo que se conoce como composición potencial de Bogue.

Los otros componentes que forman parte del clinker se consideran como secundarios. Aunque entran en reducidas proporciones en la composición del clinker no por eso dejan de tener importancia debido a los efectos negativos a que pueden dar lugar. Estos componentes secundarios son fundamentalmente:

- **Cal libre (CaO) y óxido de magnesio (MgO):** Su hidratación es expansiva pudiendo dar lugar a fisuras superficiales en el hormigón e incluso al debilitamiento y destrucción del mismo.
- **Álcalis (K_2O y Na_2O):** Pueden presentar varios problemas. Destacamos la reacción expansiva que pueden tener con determinados áridos silíceos (reacción árido – álcali).

4.1.1.1.2.3. Hidratación del Cemento Portland,

Cuando se mezcla el cemento Portland con agua, los silicatos y aluminatos se hidratan dando lugar a una masa rígida y dura conocida con el nombre de cemento endurecido, a este proceso se le conoce con el nombre de fraguado.

Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de sus componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. La hidratación continúa produciéndose después del fraguado. De ahí la importancia de mantener un ambiente de elevada humedad, después del fraguado. A este tratamiento se le llama curado. Durante el curado va aumentando progresivamente la resistencia mecánica del hormigón al ir precipitando sus componentes hidratados.

4.1.1.1.2.4. Tipos de Cementos

Además del cemento Portland existen otros tipos de cementos. Todos ellos, excepto el cemento de aluminato de calcio, consisten en modificaciones del cemento Portland para proporcionarle determinadas características. Estos cementos son:

- **Cementos puzolánicos:** Proviene de la mezcla de clinker de cemento Portland y puzolanas, que son materias de naturaleza silíceas o aluminosas, naturales o artificiales, que mejoran la resistencia química frente a determinados agresivos.
- **Cementos siderúrgicos:** Proviene de la mezcla de clinker de cemento Portland y escorias de alto horno. Tiene características especiales que los hacen adecuados en determinadas aplicaciones.
- **Cemento blanco:** Consiste en cemento Portland con bajo contenido de óxido férrico. Este es el responsable de la coloración del cemento, por lo que su ausencia se consigue cementos de color blanco. La preparación de estos cementos requiere mayor temperatura durante la acción, ya que el óxido férrico actúa como fundente. La utilidad de estos cementos es de tipo estético, pudiéndose colorear con distintos aditivos,
- **Cementos de bajo calor de hidratación:** Son cementos Portland con bajos contenidos en C₃S y C₃A. A esto les confiere un menor calor de hidratación

(véase la tabla 1.3). La utilización de estos cementos es importante cuando se trabaja con grandes cantidades de hormigón (construcción de presas, etc.).

- **Cementos Resistentes a los sulfatos y al agua de mar:** Son cementos Portland con bajos contenidos en C3A y C4AF, para evitar los efectos perniciosos de los sulfatos.
- **Cemento de aluminato de calcio:** Este tipo de cemento forma un conglomerante totalmente diferente al Portland, no solo por la naturaleza de sus materias primas y el proceso de fabricación, sino, también, por sus características entre las que cabe destacar sus altas resistencias iniciales, su carácter refractario y el ser más expansivo que los cementos Portland. Se obtiene la cocción de bauxita y caliza.
- **Cementos sin retracción:** Son aquellos que, una vez mezclados con el agua, forman una pasta que después de fraguar aumenta de volumen de tal forma que compensa la retracción e incluso, llega a crear una expansión que genera compresiones en el hormigón. Estos cementos están basados en la formación controlada de ettringita.

4.1.1.1.3. Agregados.

4.1.1.1.3.1 Agregado Fino.

La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre **0,063 y 2 mm**. Una partícula individual dentro de este rango es llamada *grano de arena*. Una roca consolidada y compuesta por estas partículas se denomina arenisca.



Figura 4.2: Arena.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.1.3.2. Agregado Grueso.

En geología y en construcción se denomina **grava** a las rocas de tamaño comprendido entre **2 y 64 mm**, aunque no existe homogeneidad de criterio para el límite superior. Pueden ser producidas por el hombre, en cuyo caso suele denominarse «piedra partida» o «chancada», y naturales. En este caso, además, suele suceder que el desgaste natural producido por el movimiento en los lechos de ríos ha generado formas redondeadas, pasando a conocerse como canto rodado. Existen también casos de gravas naturales que no son cantos rodados.

Estos áridos son partículas granulares de material pétreo, es decir, piedras, de tamaño variable. Este material se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. En este último caso actúan los procesos de chancado o triturado utilizados en las respectivas plantas de áridos. El material que es procesado corresponde principalmente a minerales de caliza, granito, dolomita, basalto, arenisca, cuarzo y cuarcita



Figura 4.3: Grava (canto rodado).
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Acero Estructural.

Se conoce como acero estructural al resultado de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros elementos como silicio, fósforo, azufre y oxígeno, que le tributan características específicas. El acero laminado en caliente, fabricado con fines estructurales, se denomina como acero estructural al carbono, con límite de fluencia de doscientos cincuenta (250) mega pázcales (2.549 Kg. /cm²).

4.1.2.1 Clasificación del Acero Estructural. Por su forma se clasifican en:

Perfiles estructurales: son Piezas de acero laminado cuya sección transversal puede ser en forma de H, T, I, etc.

- **Barras:** estas son Piezas de acero laminado, en donde su sección transversal en todos los tamaños puede ser hexagonal, cuadrada o circular.
- **Planchas:** es un producto plano de acero laminado en caliente con espesores determinados.

4.1.2.2 Propiedades del Acero Estructural.

- **Oxidación:** este se oxida por la acción de oxígeno del aire.
- **Ductilidad:** es la capacidad de convertirse en hilos, por esfuerzo de tracción.
- **Tenacidad:** es la resistencia a la rotura por tracción.
- **Elasticidad:** es cuando el acero al dejar de aplicársele alguna fuerza, se recupera a su forma original.
- **Flexibilidad:** es la capacidad de doblarse y recuperarse al aplicarle un momento flector.
- **Plasticidad:** es la propiedad que tiene los aceros de fluir, al dejar de aplicársele cargas no se recupera.
- **Resistencia:** capacidad de formular energía al deformarse.
- **Fundibilidad:** aquí llega a estado líquido.
- **Resistencia:** viene siendo el esfuerzo máximo que resiste un material antes de romperse.

El acero estructural comúnmente utilizado para la fabricación del Hormigón Armado, se tiene las **Barra con resaltes**, esta barra presenta nervios longitudinales (a lo largo) y con resaltes perpendiculares o inclinados con respecto a su eje, los cuales tienen como propósito aumentar la adherencia del acero con el hormigón, debido a la mayor superficie de contacto desarrollada, tal cual se muestra en la siguiente figura 4.4.

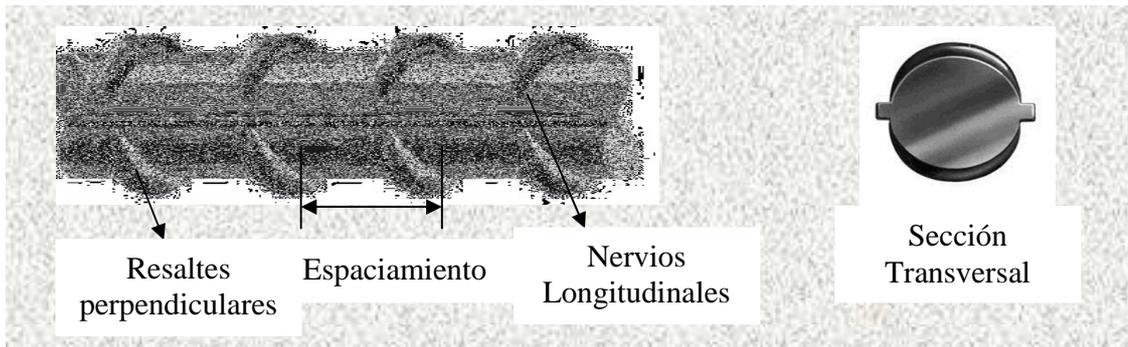
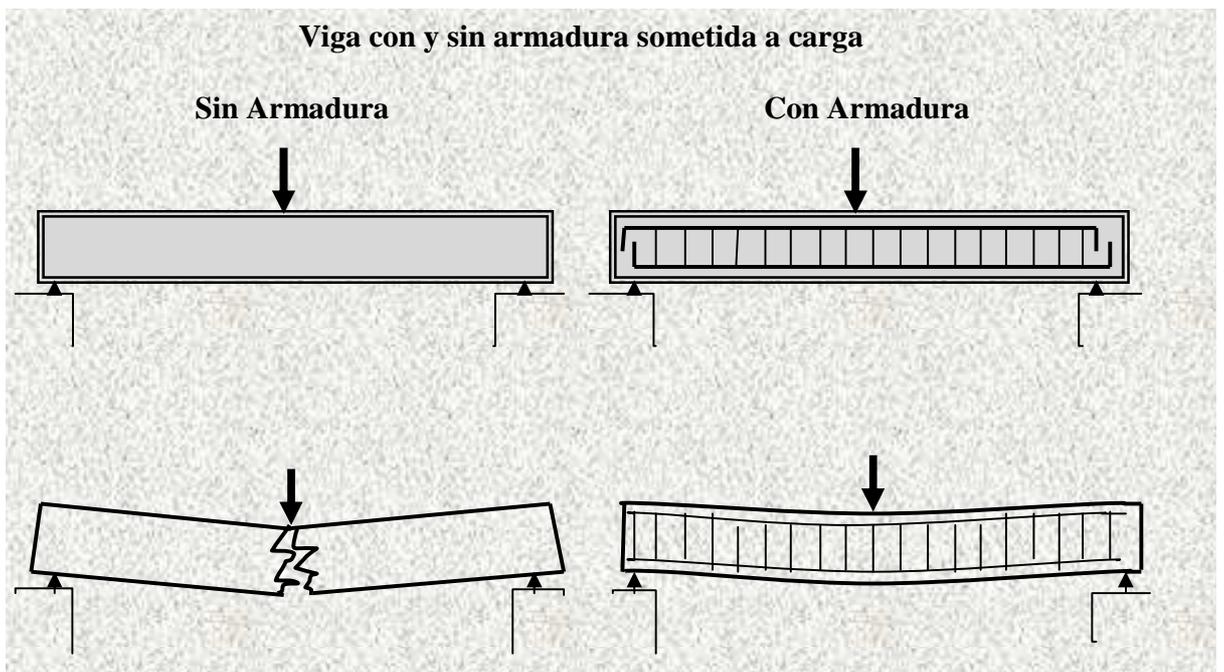


Figura 4.4: Barra de Refuerzo para Hormigón.
Fuente: Manual de Armaduras de Refuerzo GERDAU AZA.

4.1.3. Hormigón Armado.

Se define como hormigón armado, al material resultante de la unión del hormigón o concreto (mezcla proporcional de cemento Pórtland, o cualquier otro cemento hidráulico, con arena, grava y agua limpia, con o sin aditivos, que al fraguar y endurecer adquiere resistencia) y las armaduras o barras de acero de refuerzo, combinados de tal forma que constituyan un elemento sólido, monolítico y único desde el punto de vista de sus características físicas, para aprovechar así las cualidades individuales que presentan ambos materiales.



*Figura 4.5: Vigas cargadas con y sin armadura de refuerzo.
Fuente: Manual de Armaduras de Refuerzo GERDAU AZA.*

El hormigón por sí solo, asegura una gran resistencia a las sollicitaciones de compresión, pero muy escasa o frágil a los esfuerzos de flexión y tracción, por lo que no es conveniente su uso para estructuras sometidas a estas exigencias. Sin embargo, si son debidamente instaladas barras de acero de refuerzo en las zonas apropiadas, se habrá cumplido con tal requerimiento, obteniéndose un elemento capaz de resistir esfuerzos o tensiones combinadas. En consecuencia, podemos decir que, en general, *las compresiones son resistidas por el hormigón, y las tracciones y flexiones por el acero.*

El gran desarrollo de la construcción en los últimos 50 años se ha basado principalmente en la utilización del hormigón armado y pretensado, el cual debido a sus propiedades de durabilidad y rentabilidad se ha convertido en el principal protagonista del sector, siendo utilizado tanto para edificaciones como para obra pública. La combinación del hormigón y acero ofrece magníficas prestaciones en cuanto a resistencia mecánica.

Hasta hace algunos años se consideraba que un hormigón armado bien ejecutado tenía una duración prácticamente ilimitada. Ahora bien, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes agresiones de tipo físico, químico o mecánico causan el deterioro del mismo y dan lugar a que aparezca todo tipo de patologías asociadas.

4.2. Efectos de la Salinidad en el Hormigón.

Cuando el hormigón armado empezó a ser utilizado en la fabricación de estructuras se pensó que su durabilidad era ilimitada debido a que su apariencia es la de un pétreo, y la doble protección que reciben las armaduras embebidas en él: por un lado la barrera física que aporta el recubrimiento, y por otro la protección química proporcionada por la alcalinidad del cemento.

Aunque el hormigón tiene la apariencia de ser un material denso y pétreo, es un material poroso que permite la entrada de los químicos y los gases procedentes del exterior, y su transporte por la red interna de poros.

La porosidad adquirida por el hormigón es debida al exceso de agua necesario en el armado para hacer trabajable la mezcla y para conseguir una buena hidratación del cemento. Cuando se produce el fraguado, el agua sobrante que contiene el hormigón puede quedar en el interior del mismo o bien evaporarse, dejando una red de canalículos variados en tamaño. Esta red de poros supone un camino por el cual los agentes externos pueden llegar a dañar tanto al hormigón como a la armadura. Además de forma aproximada, podemos decir que la resistencia del hormigón es inversamente proporcional a su porosidad. El volumen total de poros depende, fundamentalmente, de la relación agua cemento a/c. Cualquier reducción de dicha relación mediante el uso de mezclas y granulometrías adecuadas, o agentes fluidificantes va a repercutir directamente en un aumento de las resistencias mecánicas y de la impermeabilidad.

Por otra parte, el hecho de que el cemento aporte un alto grado de alcalinidad, supone que el hormigón sea un material predispuesto a reaccionar con todos los agentes con carácter ácido que provengan del exterior.

La interacción entre el hormigón y el medio ambiente es el principal factor de estas estructuras. El desconocimiento del comportamiento de la estructura frente al grado de agresividad del medio donde está ubicada y de los mecanismos de ataque de los agentes agresivos eran las principales causas de que no se tomaran las medidas adecuadas de protección. Actualmente la preocupación por la durabilidad de las estructuras es mayor, y los estudios que se realizan al respecto se han incrementado en gran número.

El principal agente agresivo para el hormigón es el agua, ya que es el vehículo de transporte de todos los agentes agresivos al interior del hormigón. Dichos agentes pueden ser clasificados en tres categorías: agentes químicos, físicos y biológicos. Los deterioros que pueden ocasionar en el hormigón en función del tipo de agente agresivo son:

Químicos	Deslavado/Lixiviación Ácidos Sulfatos Agua de mar Reacción Árido-Álcali Sales Amoniacales y Magnésicas
Físicos	Fisuración Hielo-Deshielo Recristalización de Sales Erosión Cambios de temperatura
Biológicos	Bacterias

*Cuadro 4.5: Deterioro en el hormigón en función del tipo de agente agresivo.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.*

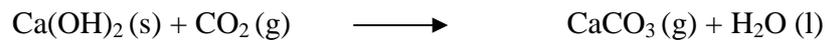
4.2.1. Ataque por agentes químicos.

- **Deslavado/Lixiviación**

Cosiste en la descalificación de las fases del cemento por efecto de un lavado continuo con aguas puras o carbónicas. Esta descalificación lleva a la disgregación de la pasta, al desmoronamiento del conjunto y a la formación de eflorescencias superficiales.

- **Ácidos:**

Al ser el hormigón un material de naturaleza alcalina, los ácidos reaccionan con los hidróxidos (calcio, sódico y potásico) para formar sales y agua. Cabe destacar la acción de los gases de carácter ácido presentes en ambientes urbanos e industriales como el CO₂ y los dióxidos de azufre y nitrógeno. En el caso del CO₂ se pueden dar fenómenos de disolución y precipitación dada la solubilidad de los bicarbonatos



No obstante en las condiciones de exposición naturales, la única reacción que se da en el hormigón es la primera, conocida como reacción de carbonatación, y que tiene como consecuencia una disminución de la basicidad del hormigón, detectable mediante el ensayo de la fenolftaleína, y que puede despasivar las armaduras de acero embebidas.

- **Carbonatación del hormigón**

Se produce cuando disminuye la alcalinidad del hormigón, por tanto el descenso del pH del hormigón provoca un ascenso en la velocidad de la corrosión de las armaduras.

El NaOH, KOH y Ca(OH)₂ disueltos en la solución acuosa de la red de poros del hormigón así como posiblemente los álcalis solubles de los agregados, provocan un pH de la disolución presente en los poros entre 12.5 y 13.5 (Schiessl, 1984).

El hormigón es un material muy poroso que permite la penetración en su interior del CO₂ del aire a través de los poros. Cuando esto sucede produce la reacción del CO₂ con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido de calcio del hormigón y de los

compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida, formándose carbonato cálcico (Verveck, 1958).

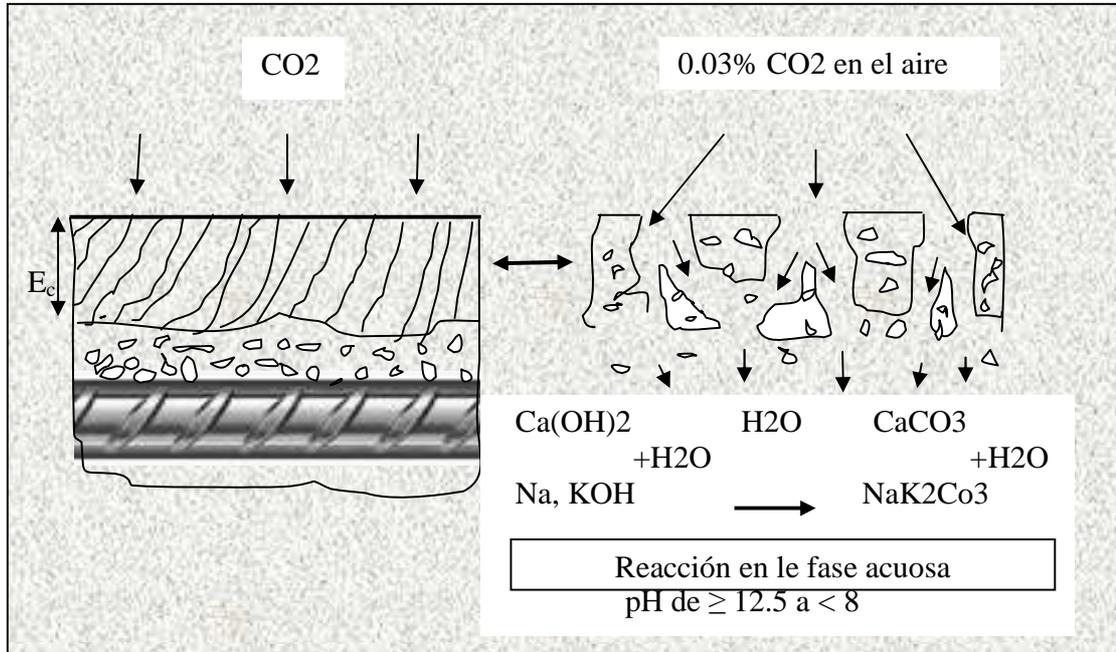


Figura 4.6: Carbonatación del recubrimiento de hormigón que debe proteger el acero.
Fuente: Manual de Armaduras de Refuerzo GERDAU AZA.

Cuando todo el Ca(OH)_2 , KOH y NaOH presentes en los poros ha sido carbonatado, el pH empieza a decrecer. Al mismo tiempo los silicatos de calcio también reaccionan con el CO_2 del aire. Tan pronto como el cemento endurecido ha sido completamente carbonatado, se mide un pH menor de 9.

Una de las características de este proceso es la existencia de un frente de avance que separa el hormigón en dos zonas con valores de pH muy diferentes, una de $\text{pH} > 12$ y otra de $\text{pH} < 9$. El frente de carbonatación se puede comprobar aplicando sobre el hormigón.

Un indicador que se conoce como fenolftaleína, si la superficie permanece alcalina, toma un color rojo-purpura, y si la zona está carbonatada la fenolftaleína se vuelve incolora.

El avance de la carbonatación es un proceso lento, cuya velocidad se atenúa con el tiempo, ajustándose a una ley parabólica del tipo:

$$X_c = K_c \cdot \sqrt{t}$$

Siendo:

X_c : profundidad de la capa carbonatada en mm.

K_c : constante de carbonatación en $\text{mm/año}^{0.5}$

T: Tiempo (edad del hormigón)

El desarrollo de carbonatación depende de diversos factores, entre los que se pueden enumerar los siguientes: contenido de CO₂ en la atmosfera, permeabilidad del hormigón, cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento) y humedad relativa del ambiente.

El aumento de la relación agua cemento a/c favorece el proceso de carbonatación, al proporcionar hormigones mas permeables. En cuanto a la humedad en hormigones secos o completamente saturados no es posible que se produzca carbonatación. Produciéndose la penetración máxima de CO₂ atmosférico en el hormigón a humedades comprendidas entre el 50% y el 70%.

Se llama “periodo de iniciación” de la carbonatación al tiempo que tarda en llegar al frente carbonatado hasta la armadura. Una vez a llegado dicho frente al acero, la capa pasivante de este se destruye, puesto que al estar el hormigón carbonatado el pH se sitúa al rededor de 7. Al destruirse la capa pasivante el acero se corroe de forma generalizada, tal y como si estuviera simplemente expuesto a la atmosfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del hormigón y por tanto en contacto con la armadura mucho mas tiempo que si ésta estuviera libremente expuesta al aire ya que el hormigón absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio.

- **Sulfatos:**

La reacción básica consiste en la formación de atrringita ($C_3AH_3\overline{3CS}$) a partir de la reacción de los iones sulfato con los aluminatos del cemento. Este compuesto es muy expansivo por lo que se produce la disgregación de toda la masa con pérdidas de resistencia muy notable. Una forma de evitar este fenómeno es mediante el uso de cementos con bajo contenido en aluminatos o cementos de adición.

- **Agua de mar:**

Contiene sulfatos, ion magnesio, cloruro sódico y otro componente de menor importancia en lo que al ataque al hormigón se refiere. Los cloruros rebajan la agresividad de los sulfatos y el magnesio precipita como hidróxido, pudiendo colmatar los poros impermeabilizando así al hormigón. Pero a pesar de esto, las acciones que se producen son de elevada importancia, tales como: deslavado, recubrimientos, formación de la sal de Friedel con la expansión que conlleva, etc.

Una manera de paliar estas acciones es mediante el uso de cemento Portland resistente al agua de mar.

- **Reacción árido - álcali:**

Este tipo de ataque consiste en la reacción de los álcalis del cemento (hidróxidos de sodio y potasio) con algunos tipos de áridos que contienen sílice pobremente cristalizado o amorfa, formándose silicatos (geles) expansivos que absorben agua provocando el desmoronamiento del hormigón.

Las medidas preventivas son el uso de cementos con un contenido en óxidos de sodio equivalente al 0.6%, y mediante la acción de puzolanas.

- **Sales amoniacales y magnésicas:**

Las sales magnesio o amoniacales reaccionan con el hidróxido cálcico dando sales cálcicas solubles, produciendo la descalificación del hormigón.

La protección consiste en el uso de recubrimientos impermeabilizante.

4.2.2. Ataque por Agentes Físicos.

- **Fisuración, Cambios de temperatura**

Debidos a cambios de temperatura bruscos durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, si no se ha previsto la existencia de juntas de dilatación, el hormigón puede sufrir elevadas retracciones produciéndose fisuras.

Este efecto puede verse minimizado con la utilización de cementos con calores de hidratación adecuados a la geometría de la pieza y por medio de un buen curado.

- **Hielo – Deshielo:**

Este fenómeno se produce en lugares de climas frios, donde las heladas son abundantes y juegan un papel a tener en cuenta. Este ataque provoca el desmoronamiento superficial del hormigón, disminuyendo de esa forma los recubrimientos dados a los redondos de acero.

Puede evitarse con el uso de inclusores de aire que, con las burbujas aisladas que introducen en el hormigón aíslan la red capilar, haciendo así un hormigón mas impermeable y capaz de resistir las tensiones causadas por la formación de hielo.

- **Erosión:**

La erosión y abrasión sufrida por cada hormigón de penderá del agente abrasivo al que vaya a estar expuesto.

Una disminución de este efecto se puede conseguir con el empleo de áridos adecuados e incluso con recubrimientos protectores.

- **Recristalización de sales:**

Este fenómeno tiene consecuencias similares a las de hielo – deshielo, al producirse un aumento de volumen de los cristales formados respecto a los anteriores. Además da lugar a florescencias superficiales.

4.2.3. Ataque por Agentes Biológicos.

Este tipo de ataque tiene lugar al generarse a partir de bacterias, proteínas, etc., compuesto de azufre o compuestos ácidos que atacarán al hormigón.

Puesto que la porosidad tiene un papel determinante a la hora de ser atacada una estructura por los agentes agresivos, es muy importante que durante la ejecución de la estructura haya un control exhaustivo de los factores que influyan en la porosidad del hormigón y en las fisuras que en el futuro puedan aparecer.

4.3. Efectos de la Salinidad en la Armadura de Refuerzo.

4.3.1. Corrosión de Armaduras.

A pesar de la variedad de procesos nocivos para el hormigón descrito anteriormente, el problema más importante para las estructuras mixtas hormigón-acero es la corrosión de las armaduras de acero embebidas en el hormigón. Esto supone un elevado coste económico. En un estudio realizado sobre los daños ocasionado por la corrosión de armaduras, cabe destacar que más del 40% de los puentes de autopistas de Estados Unidos de America, son deficientes estructuralmente u obsoletos funcionalmente. El coste de las reparaciones y sustituciones se estima en 70.000

millones de dólares \$us., siendo aproximadamente el 20% de los costes debidos a la corrosión de las armaduras, por el empleo de sales de deshielo.

De la encuesta sobre patologías elaborada por el Grupo Español del Hormigón en 1992 se refleja que el 15% de las manifestaciones de daño se deben a problemas de corrosión de armaduras. La mayoría de los casos se han dado en ambientes de humedad media o alta y en ambientes urbanos o marinos. El coste de esta reparación ha sido de un valor medio, comparado con el coste debido a la reparación de otra serie de daños, si bien en el 6% de los casos hubo de proceder a la demolición de la estructura. Finalmente, el 67.6% de los casos se han dado en edificios de más de 10 años. Esto nos hace ver el enorme costo que ocasiona la corrosión en las estructuras.

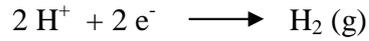
4.3.2. Fundamentos sobre Corrosión de Armaduras.

Se entiende por corrosión a la reacción de un metal o aleación con el medio. Por este proceso los metales pasan de un estado elemental, a su estado combinado de origen que presentan en la naturaleza, formando compuestos con otros elementos, como óxidos, sulfuros, etc. El proceso mediante el cual el metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso de su energía de Gibbs, y se produce mediante una reacción espontanea. Este último proceso, que se trata de una oxidación, se conoce como corrosión y representa la destrucción paulatina de metal.

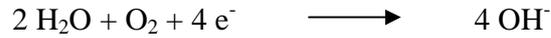
Si la corrosión metálica tiene lugar en un medio acuosos, se trata de un fenómeno de carácter electroquímico, es decir, se produce una reacción de oxidación y otra de reducción y la circulación de iones atreves del electrolito. De esta manera, en la superficie del metal se generan dos zonas, una de ellas actuara de ánodo y ahí tendrá lugar la oxidación del metal.



Liberando electrones, que emigran atreves del metal hacia otro lugar donde reacciona a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito. En medios ácidos, esta sustancia será los iones hidrogeno.



Y en medios alcalinos y neutros se trata del oxígeno disuelto en el agua,



El proceso de corrosión da lugar a la formación de una pila electroquímica, como muestra la figura 1.2. La circulación de cargas electroquímicas a través del metal y del electrolito entre el ánodo y el cátodo funciona como un circuito cerrado, de tal manera, que si el circuito se interrumpe en alguno de sus puntos, la pila deja de funcionar y la corrosión se detiene.

La oxidación de cada metal se produce de forma diferente, ya que hay unos que tienen más tendencia a oxidarse que otros. Hay algunos metales llamados “metales nobles” que pueden conservarse indefinidamente en su forma elemental.

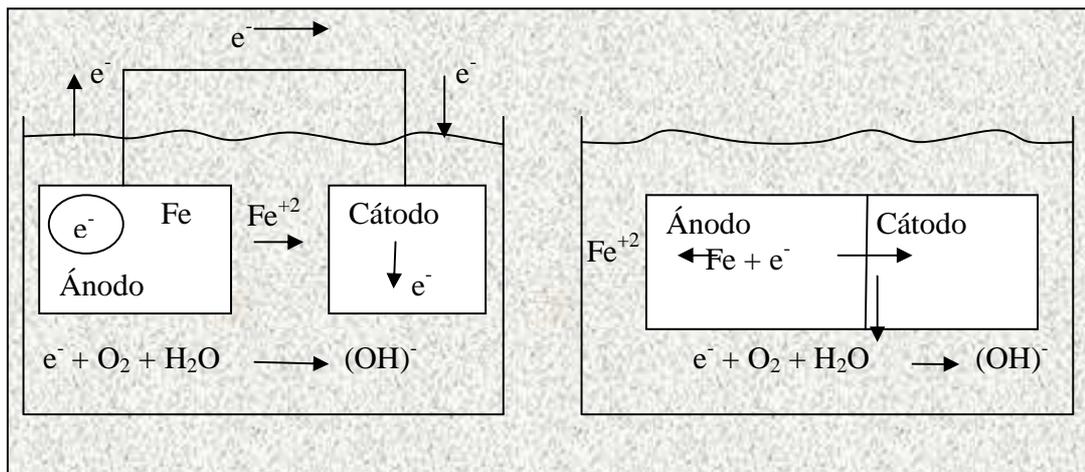


Figura 4.7 Diagrama de Pourbaix.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

Como la corrosión tiene lugar en un medio acuoso, se pueden originar iones en disolución que intervienen en reacciones de equilibrio con otros iones del medio, incluso los de agua. La reacción de corrosión depende de una serie de reacciones en las que intervienen, directa o indirectamente, los iones del agua, por tanto, dependen del pH del medio. Como el potencial del proceso de corrosión depende de estos equilibrios, se puede establecer una relación de términos de pH, los cuales se

representan gráficamente en diagramas de E-pH, conocido como diagramas de Pourbaix (Figura 4.7)

Los diagramas de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune.

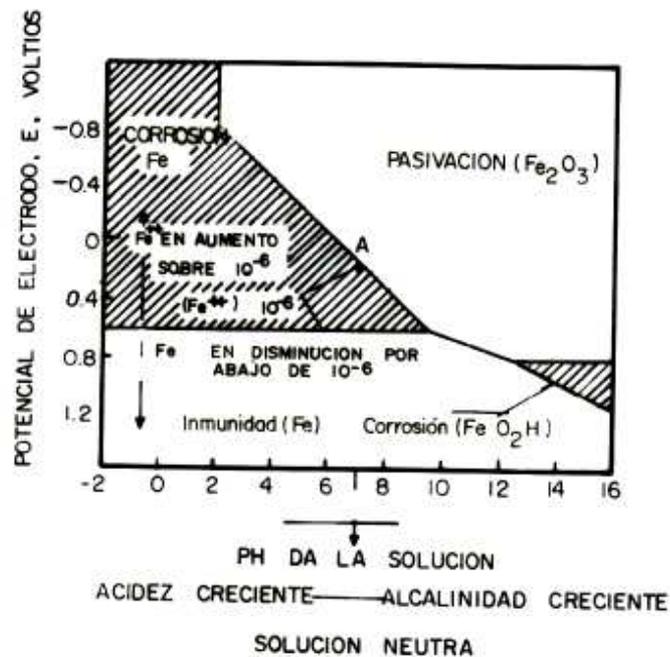


Figura 4.8: Diagrama de Pourbaix el Fe a 25 °C.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

En el estado que se conoce como de “pasividad”, el metal se recubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa como de barrera impidiendo la posterior oxidación. En el estado de “inmunidad”, el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en el que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.

También es conveniente destacar que no solo es necesario considerar si un metal dado se corroe o no, sino también la velocidad a la que lo hace, ya que, la corrosión puede tener lugar tan lentamente que a efectos de vida útil sea despreciable. En la cinética del proceso corrosivo influye fundamentalmente la naturaleza del electrolito, el contenido en oxígeno, la temperatura y la resistividad del medio.

4.3.3. Causas de Corrosión de las Armaduras.

El hormigón armado es un material compuesto por una mezcla de cemento, árido, agua, aditivos y acero. El cemento, en presencia de agua se endurece al producirse la hidratación de sus componentes. Se forma un conglomerado sólido, constituido por las fases hidratadas del cemento y una fase acuosa que proviene del exceso de agua de amasado necesaria para que se produzca una correcta mezcla de todos sus componentes. En estas condiciones, el hormigón es sólido compacto y denso, pero también poroso.

Al producirse el fraguado, parte del agua que no se ha utilizado para la hidratación del cemento se evapora, dando lugar a la formación de una red de poros, que se distribuyen por todo el volumen de hormigón. Esta red de poros hace que el hormigón presente una cierta permeabilidad a los líquidos y gases procedentes del exterior, y que se mueven por toda la red interna de poros, llegando incluso hasta el acero. Por tanto, el volumen de poros dependerá de la relación agua cemento a/c , de tal manera que, cuanto mayor sea ésta, mayor será la porosidad.

A la misma vez que se produce la hidratación del cemento, se forma hidróxido cálcico e hidróxidos alcalinos que son los encargados de situar el pH de la fase acuosa contenida en los poros en el extremo más alcalino de la escala de pH, con valores comprendidos entre 12.5 y 14. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra pasivado, es decir recubierto de una capa de óxidos transparentes, compacta y continua que lo mantiene protegido por periodos indefinidos, aun en presencia de humedades elevada en el hormigón.

Las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero son fundamentalmente dos:

La presencia de iones despasivantes, esencialmente cloruros, que o bien se añaden durante el amasado o bien penetran desde el exterior, superando un determinado umbral denominado crítico, necesario para romper localmente las capas pasivantes.

La carbonatación del hormigón, es decir, la relación del dióxido de carbono de la atmosfera con las sustancias alcalinas de la solución de poros y con los componentes hidratados del hormigón, produciéndose la disminución del pH del hormigón por debajo de un valor crítico, no bien definido, que algunos autores sitúan en 9.5.

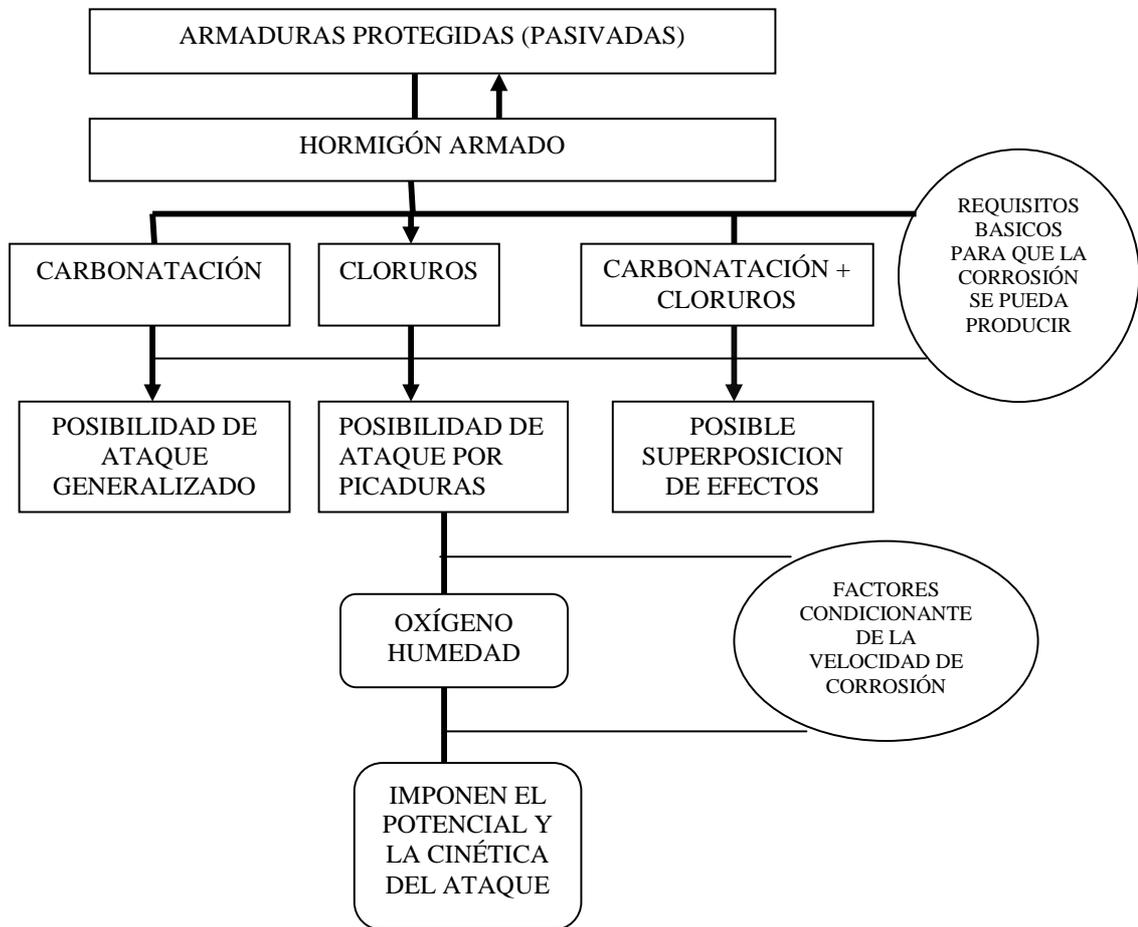


Figura 4.9: Factores desencadenantes y condicionantes de la corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón armado.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

Sin embargo, existen otros factores condicionantes que son los encargados de acelerar la velocidad de corrosión al actuar junto con los factores desencadenantes. Los factores condicionantes principales son la presencia de oxígeno y de humedad. Sin la presencia de oxígeno y humedad resulta imposible la corrosión electroquímica y sin una cantidad mínima, ésta no puede desarrollarse a velocidades apreciables (Figura 4.9).

4.3.4. Tipos de Corrosión.

Atendiendo a las cantidades de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: generalizada y localizada, como se muestra en la figura 4.10.

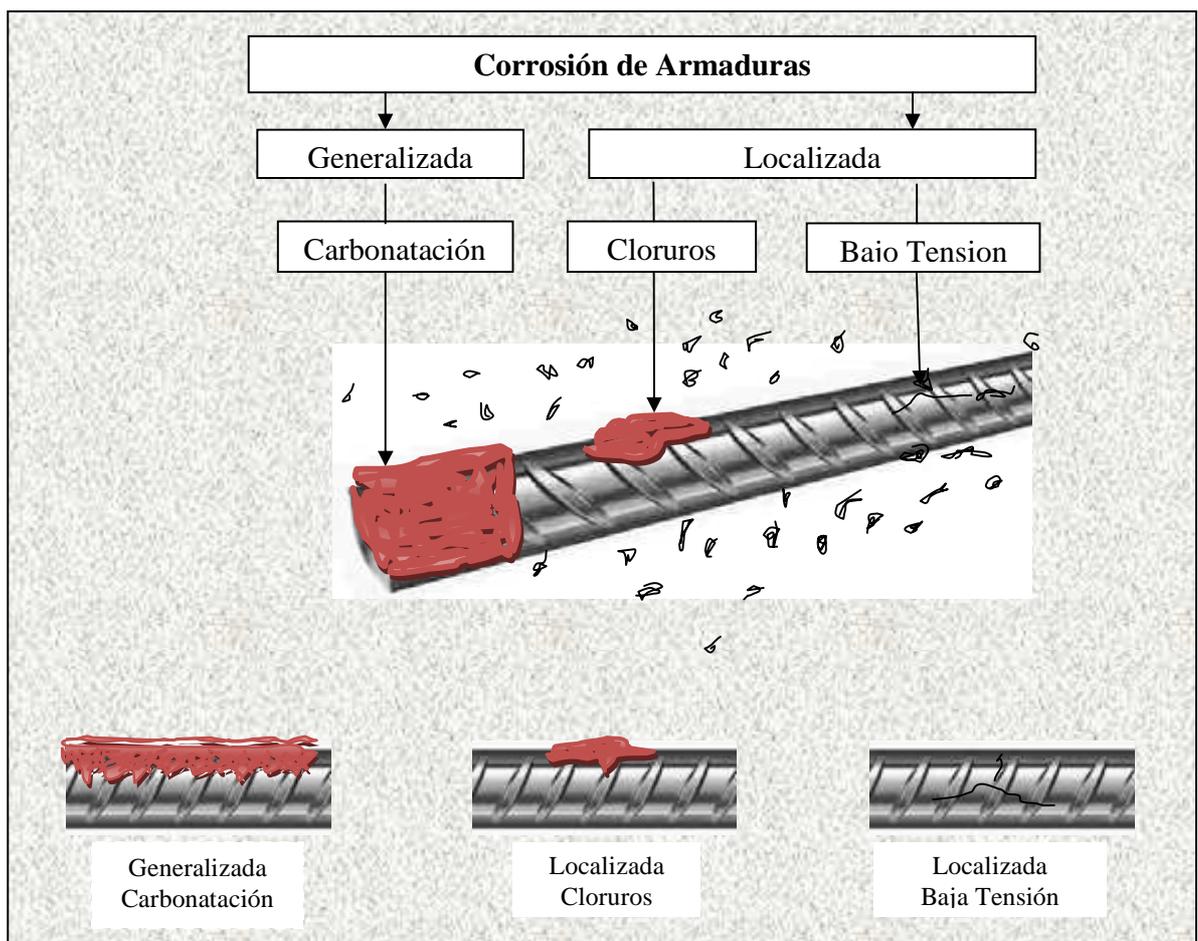


Figura 4.10: Tipos de corrosión en hormigón armado.

Fuente: Manual de Armaduras de Refuerzo GERDAU AZA.

- Corrosión localizada

Se caracteriza por la destrucción local de la capa pasivante debido a la acción de un agente agresivo. La causa más frecuente que induce este tipo de corrosión es la presencia de *iones despasivante*, tales como cloruros, que al superar un determinado valor crítico rompen localmente la capa pasivante. Después de los iones cloruros, que son los responsables del mayor número de casos de corrosión de armaduras, los más peligrosos son los iones sulfatos y sulfuros, pero son mucho menos frecuentes que los anteriores. Todos estos agentes aparecen en la figura 4.11, además de otros de menor importancia.

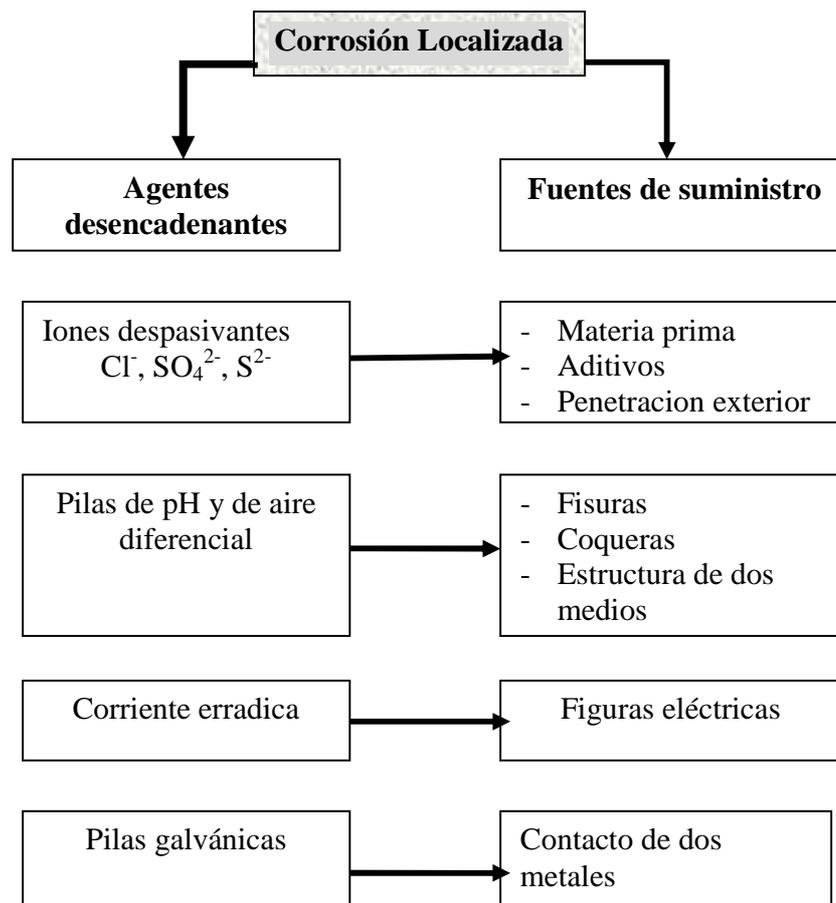


Figura 4.11: Factores que provocan la corrosión localizada.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

Otro tipo de corrosión localizada es la llamada corrosión bajo tensión que solo se aprecian en el hormigón pretensado o postensado.

Para que un fenómeno de corrosión bajo tensión (CBT) pueda tener lugar deben conjugarse simultáneamente varios factores: metal o aleación susceptible de sufrirlo, nivel de tensiones mecánicas superior a un determinado límite y medio agresivo específico.

- **Corrosión generalizada: (por carbonatación del hormigón)**

Se caracteriza por un ataque uniforme en toda la superficie del acero debido a un descenso de la alcalinidad en el hormigón que rompe la capa pasiva al llegar hasta el acero. Puede ser debido a un “deslavado” por circulación de aguas puras o ligeramente ácidas o por la reacción de compuestos de carácter básico presentes en el hormigón con componentes ácidos presentes en la atmosfera, siendo la carbonatación el fenómeno mas frecuente. El dióxido de carbono que hay en la atmosfera reacciona con las sustancias alcalinas de la solución porosa y con los componentes hidratados del hormigón, dando lugar a un descenso del pH del hormigón por debajo de un determinado valor crítico y produciendo la disolución completa de la capa pasivante.

Figura 4.12.

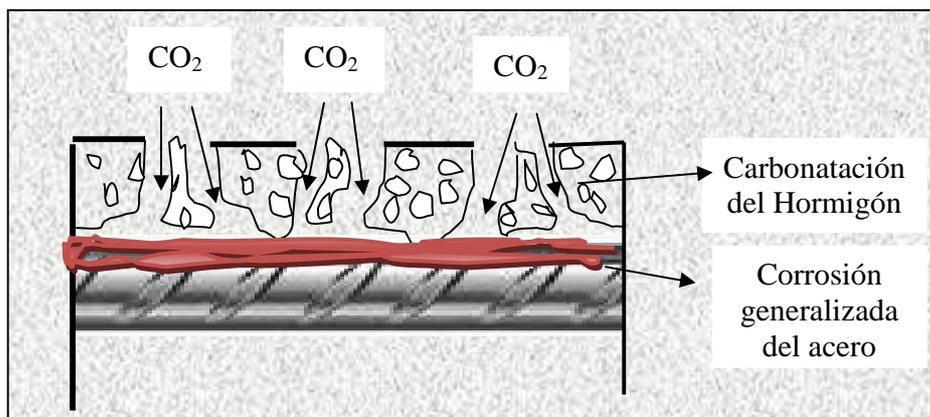


Figura 4.12: Corrosión generalizada de la armadura refuerzo.
Fuente: Manual de Armaduras de Refuerzo GERDAU AZA.

4.3.5. Factores Desencadenantes de la Corrosión de Armaduras en Contacto con Hormigón.

4.3.5.1. Corrosión Inducida por Cloruros.

Los iones cloruro llegan al hormigón o bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua) durante el amasado, o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta situación es que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales para el deshielo de carreteras o puentes, en climas fríos.

De esta manera, se forma una celda de corrosión con una zona catódica en la cual se da el proceso de reducción y un área anódica pequeña, la picadura, donde se disuelve el acero.

El ion cloruro Cl^- penetra en el hormigón a través de la red de poros. Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otro mecanismo de transporte. Sin embargo, los iones cloruro disueltos en los poros pueden interactuar con las fases sólidas del hormigón quedando inmovilizados, por tanto, el cloruro dentro del hormigón puede encontrarse en varios estados.

- Cloruro libre, es el que permanece disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del hormigón mediante difusión u otro mecanismo.
- Cloruro líquido, es el que permanece unido a las fases sólidas del hormigón. Este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse hacia el interior del hormigón.
- Cloruro total, es la cantidad total de cloruro que contiene el hormigón, sin hacer distinción entre cloruro libre y líquido. La concentración de cloruro total en un hormigón es igual a la suma de concentraciones de cloruro libre y líquido.

Los procesos mediante los cuales se unen los cloruros a las fases solidas, son tanto de tipo químico como de físico. El principal responsable de la unión química de los cloruros es el aluminato tricalcico. Este compuesto del cemento reacciona con los cloruros de los poros, para formar el monocloroaluminato hidratado o “sal de Friedel” $C_3AH_{10} \cdot CaCl_2$ y el tricloroaluminato $C_3AH_3 \cdot 3CaCl_2$ según las reacciones:



La unión física de los cloruros a las fases solidas del hormigón se produce mediante el fenómeno conocido como adsorción. Los cloruros disueltos en el agua de los poros se unen a la superficie de las partículas solidas del hormigón. El principal solido responsable de la adsorción es el gel CSH, que durante la hidratación del hormigón precipita en forma coloidal presentando un área superficial muy elevada. Sobre esta gran superficie se absorben los cloruros.

El cloruro libre es el más peligroso ya que al quedar disuelto en el agua de los poros, es capaz de despacivar la armadura e iniciar su corrosión, localizándose en determinados puntos del acero. Es muy importante conocer la capacidad de ligar cloruros de cada hormigón. Los que son capaces de ligar muchos cloruros, son menos susceptibles de sufrir la corrosión de sus armaduras. También debe tenerse en cuenta, que aunque el cloruro ligado no puede inducir la corrosión de las armaduras, si que puede ser liberado en determinadas circunstancias. Por ejemplo, la carbonatación del hormigón produce la liberación del cloruro ligado, pasando éste a ser cloruro libre e incremento, por tanto, el riesgo de corrosión. En cualquier caso, las normativas siempre se refieren al límite de cloruros totales.

Además un mecanismo de difusión que es relativamente lento, los cloruros y en general todas las sales, pueden penetrar mucho más rápidamente por un mecanismo

de succión capilar, muy propio de ambientes de niebla salina existente en climas cálidos marinos, en los que los cloruros están suspendidos en las gotitas de humedad del aire. En este fenómeno incide mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

Todas las normativas limitan el contenido de cloruros en el hormigón fresco, pero estos límites varían de un país a otro. Ello es debido a la dificultad de establecer un límite seguro, por debajo del cual no exista riesgo de despasivación del acero, ya que este límite depende de numerosas variables, algunas de las cuales son: tipos de cemento (finura, contenido de yeso, contenido en aluminato tricalcico, etc.), proporción de cemento, relación agua cemento a/c, contenido de humedad, etc. En España para el hormigón armado el límite lo fija la EHE en un 0.4% respecto a la masa del cemento.

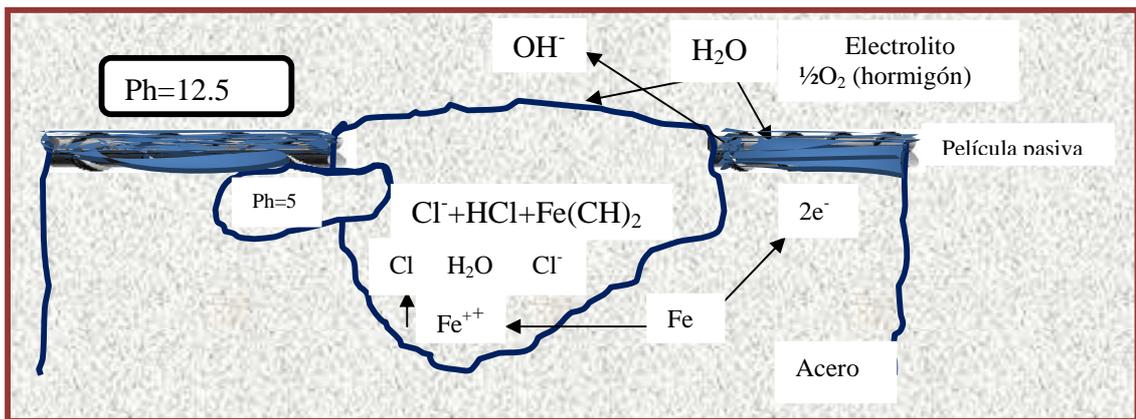


Figura 4.13: Esquema simplificado del proceso de corrosión del acero en presencia de cloruros, propuesto por CEB – FIP (Comité European du Beton (CEB), 1990). Fuente: *Biblioteca virtual Miguel de Cervantes*.

4.3.5.2. Influencia de las Fisuras.

Las grietas que aparecen en el hormigón son un rápido camino para la penetración de los agentes agresivos hasta la armadura. Cuando estos agentes agresivos entrando por la fisura alcanza a la armadura, se empieza a corroer la zona no recubierta de hormigón que actúa como ánodo frente a las adyacentes que se comportan como cátodo (figura 4.14).

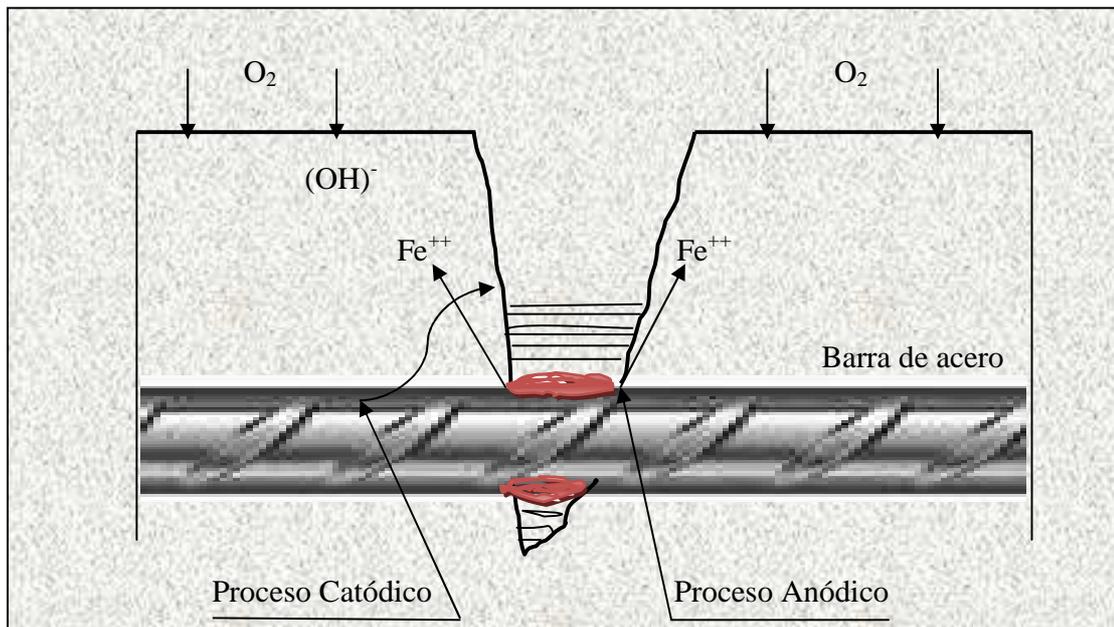


Figura 4.14: Corrosión por fisuras transversales.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

Las fisuras pueden ser transversales y longitudinales, siendo éstas últimas mucho más perjudiciales porque abarcan mayor superficie de acción.

Las normativas establecen un ancho máximo admisible de las fisuras en la superficie de hormigón y que se sitúa entre 0.3 y 0.4 mm. Para ambientes no agresivos y en tan solo 0.1mm para ambientes agresivos. Pero también se ha demostrado que no existen diferencias muy importantes en el comportamiento de las fisuras siempre que estas tengan anchos inferiores a 0.4 mm puesto que las fisuras se obstruyen con los propios productos de la corrosión. Sin embargo, factores como relación recubrimiento/diámetro en la armadura y calidad del recubrimiento, han resultado más decisivos en algunos trabajos.

4.4.6. Factores Acelerastes de la Corrosión.

Los factores desencadenantes anteriormente citados no actúan solos, se ayudan de otros factores que son los encargados de acelerar el proceso de corrosión y que son los siguientes:

a) Contenido de Humedad.

El hormigón absorbe fácilmente la humedad ambiente, pero tarda mucho tiempo en secarse. Esto da lugar a que la humedad del interior del hormigón sea superior a la humedad ambiente.

Si la humedad exterior permanece constante, se establece un equilibrio entre el contenido de humedad en el interior y la humedad ambiental (HR, humedad relativa). Pero si por el contrario, la humedad ambiental oscila, el interior del hormigón no puede seguir los cambios a la misma velocidad, por tanto, solo la capa exterior del hormigón es la que mantiene el equilibrio con la humedad relativa exterior.

El contenido de humedad es el factor que mas influye en la velocidad de corrosión. Si los poros contienen poca humedad (Figura 4.15: a), la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión se encuentra muy dificultado. En estas condiciones, la velocidad de corrosión será baja a pesar de tratarse de un hormigón carbonatado o contaminado por cloruros.

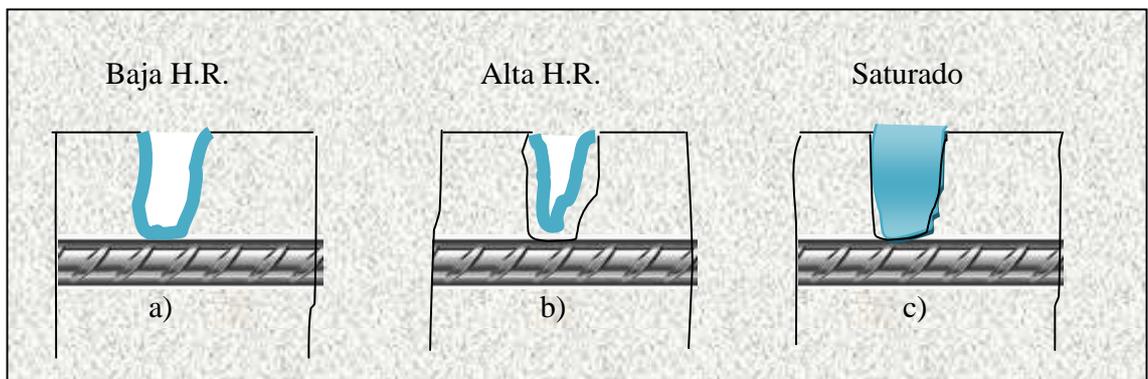


Figura 4.15: Contenido de humedad en los poros dependiendo de la humedad ambiental.
Fuente: *Biblioteca virtual Miguel de Cervantes*.

Si la humedad relativa es alta, pero no llega a saturar los poros, la velocidad de corrosión es elevada porque el oxígeno llega hasta la armadura y la resistividad es tan baja que da lugar a velocidades de corrosión máximas (Figuras 4.15: b)

La corrosión no se puede producir cuando el hormigón está totalmente seco porque no se puede desarrollar el proceso electroquímico. Tampoco si los poros están saturados de humedad (Figura 4.15: c). En este caso la resistividad será la menor posible y la pila de corrosión se verá favorecida, pero sin embargo el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua y difundir a su través para poder alcanzar la armadura dando lugar a velocidades de corrosión moderadas e incluso bajas.

b) Proporción de cloruros.

Otro factor que puede acelerar la corrosión es la proporción de cloruros o la relación Cl^-/OH^- . Como hemos dicho anteriormente la presencia de ión cloruro induce la despasivación de la armadura, pero además, cuanto mayor es esta proporción mayor puede ser la velocidad de corrosión. Esto es debido a que por un lado una mayor cantidad de cloruros aumenta el porcentaje de área atacada, y por otro, permite un mayor grado de acidificación local en las áreas corroídas.

c) Temperatura.

La temperatura desempeña un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, un incremento de temperatura da lugar a un aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones. Y por otro lado, una disminución de la misma origina condensaciones, que a su vez puede producir incrementos locales de contenido en humedad.

Es importante destacar que la humedad, el oxígeno y la temperatura pueden tener efectos contrapuestos (Andrade 2002), ya que una mayor humedad facilita la corrosión pero impide el acceso de oxígeno, o bien un incremento de temperatura, acelera el movimiento de los iones, pero disminuye la condensación.

d) Macropares galvánicos.

Se trata de pilas de corrosión generadas entre dos áreas distanciadas tan sólo unos decímetros. Una de ellas está corroída y actúa como ánodo, y la otra que actúa como cátodo permanece pasiva.

La macropila se forma a través de los estribos, y la corrosión empieza en las armaduras superiores, mientras que las inferiores permanecerán pasivas más tiempo.

4.4. Efectos de la Salinidad en el Hormigón Armado.

Como se ha descrito anteriormente, los efectos de la salinidad en las estructuras de hormigón armado, son diversos, ya generalmente algunos compuestos químicos afectan directamente al hormigón de recubrimiento y a la armadura de refuerzo.

El principal problema del hormigón armado es la corrosión de las armaduras embebidas en el, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones y siendo causa de costosas reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las estructuras.

Las armaduras embebidas en hormigón están protegidas por una capa protectora de óxidos que las recubre permanentemente, manteniéndolas inalteradas por tiempo indefinido. La corrosión se inicia cuando penetran en el hormigón agentes contaminantes que rompen esta capa protectora. El desencadenamiento de la corrosión puede ser bien la carbonatación del hormigón o bien la penetración de cloruros procedentes de las sales de deshielo o de rocío marino que tienden a destruir la capa pasivante.

Para que se produzca la despasivación del acero es preciso que las concentraciones de cloruros en las inmediaciones de las barras de acero superen unos valores mínimos. Por ello para poder evaluar la duración del periodo de iniciación de la corrosión por cloruros es preciso conocer los mecanismos y la velocidad de ingreso de Cl^- que penetran en la estructura del hormigón expuesto a medios salinos. Por otra parte se sabe que una parte de los Cl^- que penetran en la estructura del hormigón son fijados por los compuestos sólidos hidratados del mismo. Por ejemplo, el aluminato tricálcico puede formar el monocloroaluminato cálcico hidratado o “sal de Friedel” ($\text{C}_3\text{AH}_6 \cdot \text{CaCl}_2$), entre otros compuestos. Por ello solamente los cloruros libres en la

red de poros del hormigón (no combinados) son relevantes desde el punto de vista de la corrosión de armaduras.

La corrosión se podría evitar dejando un gran recubrimiento del acero o utilizando hormigones con una relación agua cemento baja, así la profundidad de penetración de cloruro sería también baja. Sin embargo, la corrosión ocurre con frecuencia puesto que este recubrimiento suele ser insuficiente y la mayoría de veces se utilizan hormigones muy porosos.

4.3.1. Efectos Derivados de la Corrosión.

Podemos considerar tres efectos derivados de la corrosión:

- a) Sobre el hormigón, cuando éste se fisura y se desprende
- b) Sobre el acero, al producirse una disminución de su capacidad mecánica por pérdida de sección transversal.
- c) Sobre el sistema acero/hormigón, al producirse una pérdida de adherencia de las armaduras embebidas en el hormigón.

Como consecuencia de la corrosión se produce un incremento del volumen de las armaduras provocando la aparición de elevadas tensiones que dan lugar a la fisuración del hormigón. Este deterioro del hormigón hace que al continuar el fenómeno de la corrosión los agentes agresivos penetren en el interior del mismo con mayor facilidad.

Pero no siempre se produce fisuración cuando las armaduras se corroen, si el hormigón está muy húmedo, los óxidos se generan a una velocidad constante y pueden emigrar a través de la red de poros y aparecen en la superficie en forma de manchas. Estas manchas pueden o no coincidir con la situación de las armaduras, ya que si hay circulación de agua aparecen donde emerge la humedad.



Figura 4.16: Efectos de la corrosión en el H^ºA.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

4.3.2. Predicción de la Vida Útil de una Estructura de Hormigón Armado.

La vida útil de una estructura se puede definir como el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente.

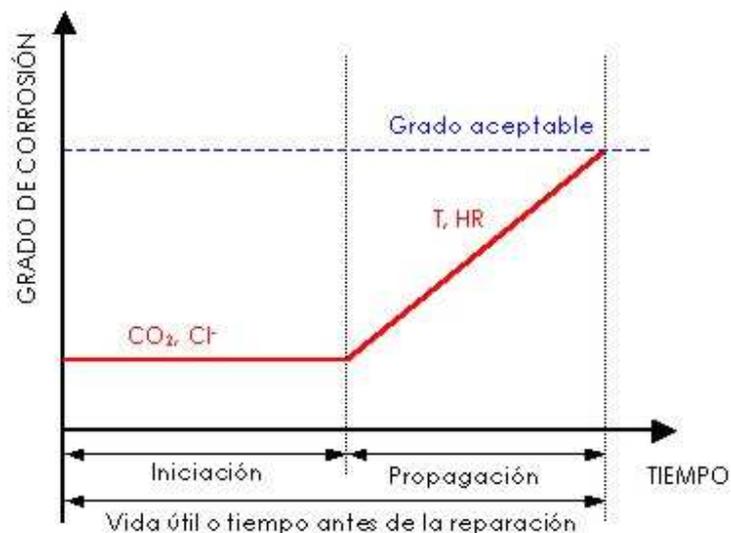


Figura 4.17. Modelo de vida útil de Tuutti.
Fuente: Biblioteca virtual Miguel de Cervantes.

El modelo más extendido para predecir la vida útil de una estructura de hormigón armado es el que propuso Tuutti, y que se muestra en la figura 4.17, en él se representa en abscisas el tiempo y en ordenadas el grado de deterioro.

Se define como “periodo de iniciación” al tiempo que tarda el agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación. y “periodo de propagación” es el tiempo que comprende una acumulación progresiva del deterioro, hasta que se alcanza un nivel inaceptable del mismo.

La presencia de cloruros y la disminución de la alcalinidad son los factores que actúan durante el periodo de iniciación (factores desencadenantes). Una vez han alcanzado la armadura, los factores que inciden en que el periodo de propagación sea más o menos rápido son el contenido de humedad y de oxígeno (factores acelerantes) del hormigón que rodea a la armadura.

De acuerdo a los datos en laboratorio, sobre el contenido de agentes químicos que se encuentran disueltos en el agua y suelo de la Quebrada El Saladillo, indicados en acápite anteriores, se tiene que:

4.3.3. Evaluación y Resultados.

Para realizar la evaluación de los efectos de la salinidad en las estructuras de hormigón armado existentes en la Cuenca El Saladillo, se ha determinado la Cantidad de sustancias disueltas contaminantes del agua y suelo, a través de levantamiento de once (11) muestra de agua y dos (2) muestras de suelo del lecho de la Quebrada y los valores límites permitidos de concentración de sustancias en el agua para el amasado y curado del hormigón, CBH-87, Cuadro 4.1.

Con los datos obtenidos en laboratorio sobre la concentración de sustancias en el agua y suelo de la Cuenca El Saladillo y los valores límites, se realiza una comparación de

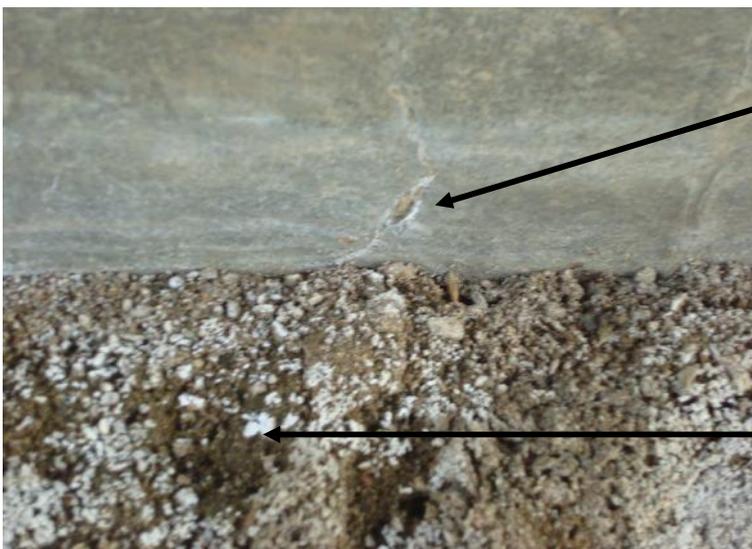
los valores para poder determinar la afectación o no de los compuestos químicos en el Hormigón Armado existentes en la zona.

De acuerdo a la inspección realizada a la zona y a las fotos tomadas a las estructura de hormigón armado, se apreciar que en las dos estructura existes de hormigón armado, existe riesgos considerables de corrosión de las mismas. Las siguientes figuras, gráficamente muestran estos riesgos, debido a las fisuraciones presentadas y a la presencia de agentes corrosivos en el medio que se encuentran presentes.



Puente de hormigón pretensado ubicado en la Quebrada El Saladillo. En el estribo derecho presenta fisuraciones con

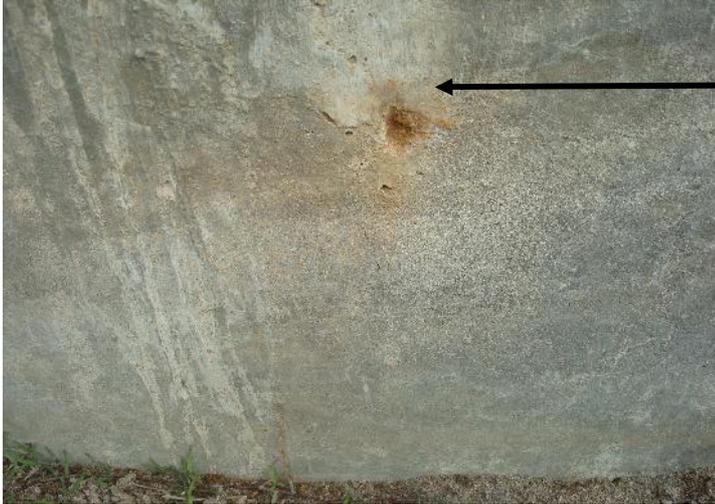
*Figura 4.18: Puente pretensado ubicado en la Cuenca El Saladillo.
Fuente: Elaboración propia.*



Fisuración en el estribo derecho del puente con riesgo de que se produzca corrosión por estar en contacto sustancias

Sustancia blanca corrosiva, producida por la evaporación de aguas contaminadas

Figura 4.19: Fisuración del estribo del Puente Saladillo.
Fuente: Elaboración propia



Carbonatación del hormigón en el estribo del puente, por el color que se observa, es posible que haya llegado

Figura 4.20: Carbonatación del Hormigón.
Fuente: Elaboración propia.

Canal de Riego, construido para transportar agua que es captada del Río Camacho para regar la margen izquierda de la Cuenca El Saladillo. La altura en la que se encuentra con respecto al lecho de la quebrada, hace que corra mucho riesgo de colapso debido a las crecidas del caudal en época de lluvia y al arrastre de sedimentos que impacta directamente con la estructura.



Canal de riego en periodo de colapso, posiblemente debido a efectos de la corrosión de su armadura de refuerzo y a la acción abrasiva de

Figura 4.21: Canal de riego.
Fuente: Elaboración propia.



Armadura de refuerzo del puente canal totalmente corroída

Figura 4.22: Tapa de cana colapsada.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores máximos y mínimos de las cantidades de sustancias y pH encontradas en las aguas provenientes de la Cuenca El Saladillo, obtenidas a través de estudios de laboratorio (Cuadro 2.1), son los siguientes:

Sustancias y pH	Valor Mínimo	Valor Máximo
- pH	6,90	8,80
- Sustancias disueltas	493,75 mg/l	496,71 mg/l
- Sulfatos	125,10 mg/l	300,40 mg/l
- Ion Cloro Cl ⁻	160,00 mg/l	186,90 mg/l

Cuadro 4.6: Valores Máximos de sustancias disueltas en el agua de la Cuenca El Saladillo.
Fuente: Elaboración propia

Tomando los valores límites de sustancias disueltas en el agua para el amasado y curado de hormigones (Cuadro 4.1: Límites de sustancias disueltas en el agua para el hormigón – Norma Bolivia CBH-87) y los valores máximos y mínimos de sustancias disueltas en el agua de la Cuenca El Saladillo (Cuadro 4.6: Valores Máximos obtenidos en laboratorio), se tiene las siguientes conclusiones:

- Todos los valores del **pH** obtenido en el laboratorio para el agua de la Cuenca El Saladillo están por encima del valor mínimo permitido de 5, por tanto el agua es aceptable.
- Todos los valores de las **Sustancias Disueltas** en el agua de la Cuenca del Saladillo, obtenidos en el laboratorio, están por debajo del valor máximo permitido de 15.000,00 mg/l, por tanto el agua es aceptable.
- Todos los valores de los **Sulfatos** presentes en el agua de la Cuenca del Saladillo, obtenidos en el laboratorio, están por debajo del valor máximo permitido de 1.000,00 mg/l, por tanto el agua es aceptable.
- Todos los valores del **Ion Cloro Cl⁻** presentes en el agua de la Cuenca del Saladillo, obtenidos en el laboratorio, están por debajo del valor máximo permitido de 6.000,00 mg/l, por tanto el agua es aceptable.

De lo anteriormente indicado, se determina que las aguas de la Cuenca del Saladillo pueden ser utilizadas para el amasado y curado del hormigón, en consecuencia, las estructuras de hormigón armado expuestas a estas aguas no sufren ninguna alteración que perjudique su duración, siempre y cuando éstas no se encuentren fisuradas o carbonatadas, ya que esto facilitaría la penetración de las sustancias disueltas en el agua hasta llegar a la armadura de refuerzo, ocasionando su corrosión y disminución de su diámetro, en consecuencia debilitando la estructura.

Sin embargo, los valores de las sustancias encontradas en el agua de la Cuenca del Saladillo obtenidas en laboratorio, comparándolos con normas de otros países, ejemplo **Normativa aplicable en el Perú (Norma NTP 339-088)**, que considera apta para el amasado y curado de concretos, el agua cuyas propiedades y contenido de sustancias disueltas estén comprendidas dentro de los límites siguientes:

Sustancias y pH		Valores Límites
pH		$5 \leq \text{pH} \leq 8$
Sólidos en suspensión	\leq	5000 mg/l
Sulfatos	\leq	600 mg/l
Ion Cloro Cl^-	\leq	1000 mg/l
Alcalinidad	\leq	1000 mg/l
Materia Orgánica	\leq	3 mg/l

Cuadro 4.1: Límites de sustancias disueltas en el agua para el H°

Fuente: Norma peruana NTP 339-088

Considerando los valores límites de sustancias disueltas en el agua para el amasado y curado de hormigones del anterior cuadro y los valores máximos y mínimos de sustancias disueltas en el agua de la Cuenca El Saladillo obtenidas en laboratorio (Cuadro 2.1), se tiene lo siguiente:

- Existe un valor del **pH** = 8.8, obtenido en el laboratorio para el agua de la Cuenca El Saladillo que está fuera del rango aceptado de $5 \leq \text{pH} < \leq 8$, Por tanto, según la Norma NTP 339-088 aplicable en el Perú, el agua no es aceptable para el amasado y curado de hormigones.
- Con excepción del pH, todos los valores de las sustancias encontradas en el agua de la Cuenca del Saladillo, se encuentran por debajo del límite máximo establecido en la Norma NTP 339-088 aplicable en el Perú.

Por tanto, de acuerdo a la normativa aplicable en el Perú que indica que ningún valor debe exceder a los valores indicados en el cuadro 4.1 Norma NTP 339-088 aplicable en el Perú, el agua de la cuenca del Saladillo no es apta para ser utilizada en el amasado y curado de concretos en el Perú.

Los valores posibles de pH en el agua pueden variar entre 0 y 14. Un valor de pH = 0 indica el mayor grado de acidez a que puede llegar una sustancia; por su parte, un

valor de $\text{pH} = 14$ indica el máximo grado de alcalinidad que se puede obtener en un medio cualquiera. Alcalino y básico pueden ser entendidos como sinónimos a los efectos prácticos. Entre ambos extremos, un $\text{pH} = 7$, indica valores neutros.

Según la norma boliviana pone un límite inferior de $\text{pH} = 5$ y no indica un límite superior del valor de pH para el agua de amasado y curado del hormigón, a diferencia de la norma peruana que establece un valor mínimo de $\text{pH} = 5$ y un valor máximo de $\text{pH} = 8$. Por lo que la norma boliviana tiene una cierta flexibilidad con el grado de alcalinidad del agua a ser utilizada en el amasado y curado del hormigón. Sin embargo la alcalinidad puede ser controlada de alguna manera obteniendo el contenido de sulfatos en el agua y verificando que no sobre pase el límite establecido en la norma boliviana.

Por otra parte, se puede apreciar que la norma peruana define valores límites de la sustancias en el agua para el amasado y curado del hormigón inferiores a la norma boliviana, en tal sentido la normativa peruana es mas exigente en cuanto a la calidad del agua para el fin indicado.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al análisis realizado sobre la Salinidad en la Cuenca del Saladillo y su efecto en el Hormigón Armado, se llega a las siguientes conclusiones:

1. Según la tabla valorativa para calificación de la salinidad del Comité de Consultores de la Universidad de California, el agua de la Cuenca del Saladillo tiene una **SALINIDAD MEDIA** y el suelo tiene una **SALINIDAD BAJA**.
2. Todas las sustancias y el pH encontrado en el agua de la Cuenca del Saladillo, tienen valores que se encuentran dentro de lo permisible para el amasado, curado y de exposición con las estructuras de hormigón armado según la normativa boliviana (CBH-87).
3. Por la ubicación de las fisuras en la estructura de hormigón armado (estribos del puente), las mismas que tienen una orientación vertical, desde la cota más alta del estribo hasta la cota del lecho de la quebrada y al estar expuesta al suelo y al agua de la Cuenca del Saladillo, la armadura de refuerzo corre con el riesgo de corroerse en los puntos donde las armaduras entra en contacto con las sustancia corrosivas presentes en el agua. Para evitar esto es preciso que se realice un mantenimiento continuo de las obras existentes.
4. Con respecto al canal de riego, donde parte de tapa ha colapsado, el hormigón que protege las armaduras de refuerzo ha sido totalmente destruido en algunos lugares, por lo que la armadura de refuerzo al estar a la intemperie y en contacto constante con las sustancias corrosivas encontradas en el agua, ocasionara que siga penetrando la corrosión hacia el interior del mismo a través de la unión entre la armadura y el hormigón, ocasionando un área mayor de destrucción de la tapa del canal. Para evitar esto, es necesario

evaluar en su integridad el estado y su ubicación del canal para poder definir su reconstrucción total o simplemente reconstruir las partes colapsadas y evitar el aumento de la corrosión y total destrucción del canal.

5. Sin embargo, que los valores de las sustancias del agua de la Cuenca del Saladillo tengan valores que se encuentren dentro de los parámetros determinados por la normativa Bolivia, por tener un pH superior a 8 (agua ligeramente alcalina/básica) es recomendable que por lo menos el agua de amasado para el hormigón sea utilizado del Río Camacho, que tiene un pH menor a 8.
6. Por seguridad y debido a que las estructuras de hormigón armado de la zona están expuestas al agua de la quebrada del Saladillo, aguas contaminadas con agentes oxidantes, es recomendable que para el amasado del hormigón se utilice una relación agua cemento (a/c) lo más baja posible, sin exceder el valor máximo de 0.50) y un vibrado adecuado al momento del vaciado, de esa manera disminuir la porosidad del hormigón por donde puedan penetrar agentes oxidantes.
7. El control en obra del proceso de fabricación de los hormigones constituye un aspecto fundamental. Debe prestarse especial atención a los siguientes puntos:
 - Respetar las proporciones obtenidas en laboratorio de los componentes del hormigón.
 - Controlar la humedad de los agregados, particularmente apilándolos en lugares protegidos contra la lluvia.
 - No utilizar agregados que contengan sales o materiales orgánicos.
 - No utilizar cemento que denote inicios de un proceso de fraguado. El cemento debe estar adecuadamente almacenado protegido de la humedad.
 - Controlar constantemente que el asentamiento del cono de Abrams se encuentre dentro de límites aceptables.

- Si se usan aditivos, deben hacerse previamente mezclas de prueba para asegurarse de su buen comportamiento.
- Se deberá tener especial cuidado con el transporte del hormigón para no producir segregación.
- Se deberá tomar un número suficiente de muestras cilíndricas para poder realizar ensayos representativos a los 7, 14 y 28 días.

COMENTARIO

Aunque el efecto de la salinidad en los gaviones no es el tema de estudio, sin embargo, es importante hacer notar que una de las obras civiles que mayormente son atacadas por agentes oxidantes presentes en el medio, es el gavión, ya que éste presenta una armadura de alambre expuesta a la intemperie y a las aguas contaminadas por todo tipo de agentes oxidantes que acortan la vida útil de la estructura.

En el recorrido realizado por toda la Cuenca del Saladillo, se ha podido observar que a lo largo de la quebrada se encuentran construidos una serie de gaviones, los que presentan signos de deterioro por la corrosión del alambre debido a la exposición de éste con el agua del lugar, tal hecho se muestra en una serie de fotos que a continuación se muestran:



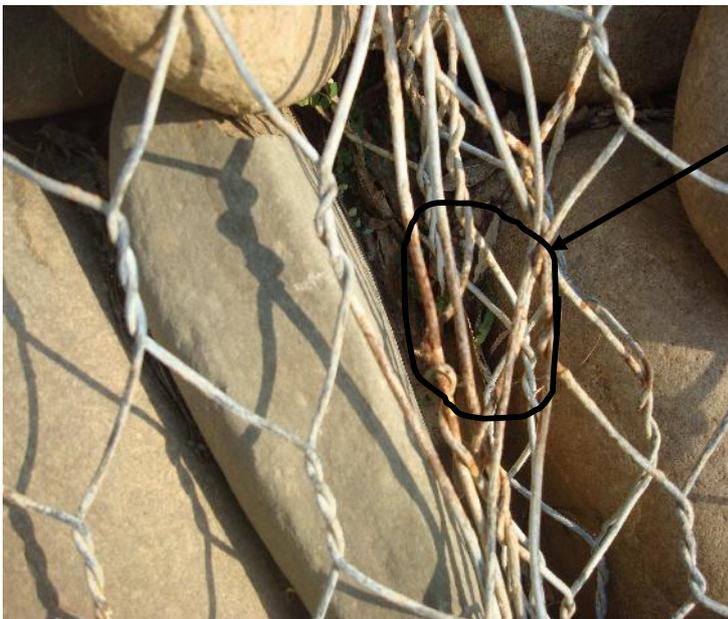
*Figura 5.1: Gavión construido en la quebrada del Saladillo.
Fuente: Elaboración propia.*



Sustancia blanca proveniente de la evaporación de las aguas contaminadas con agentes oxidante que provoca el inicio de la corrosión del

Figura 5.2: Inicio de corrosión del alambre de la malla del gavión debido a la presencia de sustancias corrosivas.

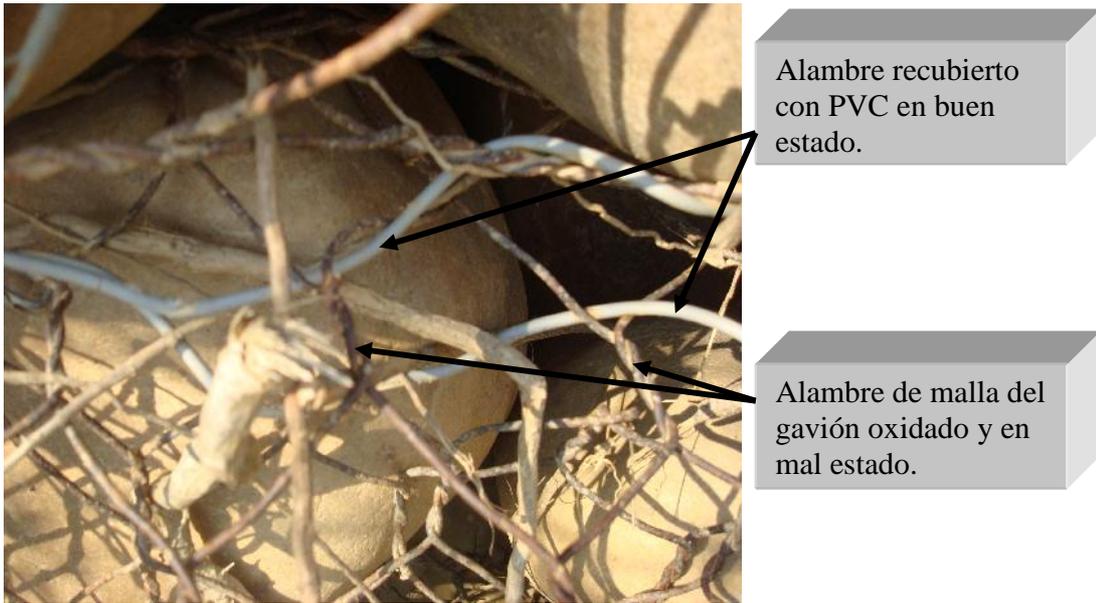
Fuente: Elaboración propia.



Alambre del gavión corroído.

Figura 5.3: alambre que corroído, afectado por estar expuesto a agentes oxidantes presentes en la zona.

Fuente: Elaboración propia.



Alambre recubierto con PVC en buen estado.

Alambre de malla del gavión oxidado y en mal estado.

Figura 5.4: Alambre de gavión oxidado y alambre recubierto con PVC utilizado para la unión de los gaviones.

Fuente: Elaboración propia.

Las fotos anteriores nos muestran que evidentemente las estructuras metálicas expuestas a las aguas de la Cuenca del Saladillo presentan una serie de afectaciones por la corrosión, sin embargo en algunos gaviones se puede apreciar que la utilización de alambres recubiertos con PVC, protegidos contra la exposición en aguas contaminadas con agentes corrosivos, se encuentran en buen estado.

Por lo indicado anteriormente, en primera instancia se recomendaría la utilización de mallas de gavión fabricadas con alambre recubierto con PVC, sin embargo, previo a la construcción de cualquier obra de gaviones, es recomendable analizar, los efectos de la salinidad en la malla del gavión fabricado con alambre galvanizado, el periodo de duración que tendría la estructura, versus el costo que implicaría la utilización de malla de alambre recubierto con PVC.