



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE
CARBONATACIÓN Y PENETRACIÓN DE CLORUROS
MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN EMPLEANDO PROCESOS DE
DIFUSIÓN TÉRMICA EN VARIOS DISEÑOS DE HORMIGÓN ”**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por

STALYN HUMBERTO MORENO BRIONES

Guayaquil - Ecuador

2010

AGRADECIMIENTO

A LA ESCUELA SUPERIOR
POLITÉCNICA DEL LITORAL.

AI ING. JULIAN PEÑA E.
POR SU ACERTADA
DIRECCIÓN EN ESTE
PROYECTO.

A TODOS QUIENES CON
SU AYUDA, HICIERON
POSIBLE EL DESARROLLO
Y CULMINACIÓN DE ESTE
PROYECTO.

DEDICATORIA

A DIOS

A MI FAMILIA.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

ING. FRANCISCO ANDRADE
DECANO - FIMCP

ING. JULIAN PEÑA E.
DIRECTOR DEL PROYECTO

DRA. CECILIA PAREDES V.
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación, me corresponde exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”.

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

Stalyn Moreno Briones

RESUMEN

El presente proyecto consistió en determinar el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón que generalmente se encuentra inmerso en ambientes marinos y la constante de penetración del dióxido de carbono para así conocer el comportamiento del hormigón en ambientes corrosivos que existen en nuestro medio.

Se construyeron sistemas que simularon la exposición del hormigón en las condiciones más agresivas de los ambientes corrosivos tratados en este proyecto.

Para la carbonatación se construyó una cámara en la cual fueron expuestas las probetas a un ambiente controlado de 99% de dióxido de carbono y garantizando una humedad relativa (HR) de entre 50 y 70% para garantizar la penetración del dióxido de carbono en las probetas.

Después del tiempo de exposición se cortaron longitudinalmente las probetas cilíndricas construidas para el efecto y se procedió a medir la profundidad de penetración de dióxido de carbono, esto mediante el cambio del valor del PH del concreto que se evidencia con un cambio de color en la zona no carbonatada al rociar la probeta con fenolftaleína.

Para simular la exposición del hormigón en ambiente marino, se sumergieron parcialmente las probetas a una solución de agua con 3.5% de cloruro de sodio y así lograr la difusión de cloruros.

Se calculó el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón siguiendo la norma ASTM C1152, mediante la teoría de la difusión establecida en la segunda ley de Fick, junto con la ayuda de un programa informático desarrollado bajo entorno MATHCAD se logró resolver el modelo matemático introduciendo los valores de concentración de cloruros a diferentes profundidades de cada probeta.

Finalmente se confrontaron los resultados de las pruebas experimentales para hormigón tipo portland y puzolánico. Obteniendo así las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	10

CAPÍTULO 1.

1. EL PROBLEMA DEL HORMIGÓN EXPUESTO A

ATMÓSFERAS CORROSIVAS EN EL ECUADOR.....	12
1.1 Características de los ambientes corrosivos en el Ecuador.....	13
1.2 Deterioro del hormigón en ambiente corrosivos.....	19
1.3 El dióxido de carbono como agente degradante en el concreto.....	24
1.4 Iones cloruro como agente degradante en el concreto.....	29
1.5 Efecto en estructuras de acero embebidas en hormigón.....	35

CAPÍTULO 2.

2. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS Y PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN EL HORMIGÓN.....	39
2.1 Construcción de probetas de hormigón	
tipo Puzolánico y Pórtland	40
2.2 Ensayos de rotura por compresión.....	44
2.3 Exposición de las probetas en varios ambientes.....	50
2.3.1 Difusión de iones cloruro en solución de cloruro de sodio.....	51
2.3.2 Atmósfera al 99% de dióxido de carbono.....	62
2.3.3 Ambiente local en Guayaquil.....	70
2.4 Determinación del coeficiente de difusión de iones cloruro.....	71
2.5 Determinación de la constante de penetración de dióxido de carbono respecto al tiempo.....	73

CAPÍTULO 3.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	76
3.1 Coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón.....	77
3.2 Constante de penetración de dióxido de	

carbono en el hormigón.....80

CAPÍTULO 4.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....84

APÉNDICES.....86

BIBLIOGRAFÍA.....103

ABREVIATURAS

PH	Potencial de hidrógeno.
HR	Humedad relativa.
°C	Grados Centígrados.
ec.	Ecuación.
CO₂	Dióxido de carbono.
NaCl	Cloruro de sodio.
mm	Milímetros.
cm	Centímetros
µm	Micrometros.
seg	Segundos.
ASTM	Asociación Americana para Pruebas de Materiales.

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 2.1 Correcto llenado de mezcla en molde.....	39
Fig. 2.2 Mezcla de concreto en moldes cilíndricos.....	40
Fig. 2.3 Probetas retiradas del molde.....	40
Fig. 2.4 Esquema de ensayo de rotura por compresión.....	45
Fig. 2.5 Resistencia vs. Tiempo hormigón puzolánico.....	47
Fig. 2.6 Resistencia vs. Tiempo hormigón Portland.....	48
Fig. 2.7 Codificación de probetas para ensayos.....	50
Fig. 2.8 Esquema básico del sistema empleado para difusión de cloruros.....	52
Fig. 2.9 Esquema de penetración de cloruros.....	53
Fig. 2.10 Codificaciones de las rebanadas de hormigón puzolánico.....	54
Fig. 2.11 Codificaciones de las rebanadas de hormigón Portland.....	55
Fig. 2.12 Rebanada de hormigón.....	55
Fig. 2.13 Rebanada de probeta limpia y lista para trituración.....	56
Fig. 2.14 Trituradora de mandíbulas.....	57
Fig. 2.15 Probeta triturada en molino de mandíbulas.....	57
Fig. 2.16 Trituradora de rodillos.....	58
Fig. 2.17 Probeta triturada en rodillos.....	58
Fig. 2.18 Trituradora de Discos.....	59
Fig. 2.19 Probeta triturada en discos.....	59
Fig. 2.20 Polvo obtenido.....	60
Fig. 2.21 Diseño inicial de cámaras de carbonatación.....	63

Fig. 2.22 Diseño Final de cámaras de carbonatación.....	65
Fig. 2.23 Probetas retiradas de cámara de carbonatación.....	66
Fig. 2.24 Corte longitudinal de las probetas carbonatadas.....	67
Fig. 2.25 Elementos utilizados para instrumentación de carbonatación.....	68
Fig. 2.26 Lectura de la medida del frente carbonatado.....	68
Fig. 2.27 Probetas expuestas al ambiente natural.....	69
Fig. 3.1 Perfil de concentración experimental y modelado para difusión de cloruros en hormigón Puzolánico.....	77
Fig. 3.2 Perfil de concentración experimental y modelado para difusión de cloruros en hormigón Portland.....	77
Fig. 3.3 Perfil de Avance de Carbonatación en hormigón Puzolánico.....	80
Fig.3.4 Perfil de Avance de Carbonatación en hormigón Portland.....	81

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla. 1.1 Componentes principales y secundarios del cemento Portland.....	20
Tabla. 2.1 Composición puzolánico patrón.....	41
Tabla. 2.2 Composición puzolánico + inhibidor.....	41
Tabla. 2.3 Composición portland.....	42
Tabla. 2.4 Composición portland + inhibidor.....	42
Tabla. 2.5 Resistencia vs. Tiempo hormigón puzolánico.....	47
Tabla. 2.6 Resistencia vs. Tiempo hormigón Portland.....	48
Tabla. 2.7 Datos de difusión de cloruros.....	70
Tabla. 2.8 Coeficientes de difusión de cloruros.....	72
Tabla. 2.9 Datos de carbonatación.....	73
Tabla. 2.10 Coeficientes de constante de penetración de CO ₂	74

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un proceso espontáneo que busca el equilibrio químico y térmico entre todos los materiales y su entorno. Este proceso es inevitable y dependiendo del medio, afecta generalmente a todas las estructuras construidas por el hombre, generando su deterioro y disminuyendo el tiempo de vida útil de las mismas. Esto genera que la ingeniería desarrolle técnicas que mitiguen en gran parte el problema de la corrosión, haciendo que sea lo más lento posible.

En nuestro medio los ambientes juegan un papel muy importante respecto al tema de la corrosión, pues por la ubicación geográfica, la presencia de salinidad en las zonas costeras y la presencia de agentes químicos dañinos en el ambiente, se hace propicio que el equilibrio entre el material y el medio se de con facilidad.

Sin lugar a dudas los metales son los primeros afectados, debido a sus propiedades físicas y químicas. Pensemos entonces, en aquellos que se encuentran embebidos en el concreto y que generan refuerzo al hormigón de pequeñas y grandes estructuras en nuestro país. El comportamiento del hormigón ante el medio será clave en el tiempo de vida útil de la estructura, por lo que se hace necesario un estudio a fondo de este fenómeno.

La necesidad de evaluar el comportamiento cualitativa y cuantitativamente de los hormigones ante los ambiente extremos dañinos, conlleva al desarrollo de un análisis experimental complejo y que se constituyó en el objetivo principal de este trabajo.

Se realizaron pruebas con los hormigones que comúnmente son utilizados en nuestro medio, el hormigón de cemento de tipo puzolánico y el de cemento de tipo portland; exponiéndolos en dos ambientes considerados como agresivos en el país, siendo estos el ambiente marino y el ambiente con presencia de dióxido de carbono que se acentúa en las zonas industriales.

En el presente trabajo se presenta una forma sistemática y ordenada de los procedimientos relevantes que se siguieron para determinar el comportamiento de los hormigones.

CAPÍTULO 1

1. EL PROBLEMA DEL HORMIGÓN EXPUESTO A ATMÓSFERAS CORROSIVAS EN EL ECUADOR

La corrosión no es más que un proceso en el cual la naturaleza misma procura buscar un equilibrio químico en todo lo que está sobre ella. Esto ocurre en el tiempo y constituye el deterioro o el regreso de todos los elementos ya sean orgánicos o inorgánicos a su estado natural una vez que el hombre los ha procesado o modificado. Esto aplica entonces a todo objeto sobre el planeta.

Algo muy influyente en esto es el medio que rodea a un objeto en cuestión, pues el entorno buscará incansablemente dicho equilibrio a

través del tiempo. No podemos evitar esto, pero gracias a nuestro ingenio si podemos retardar el efecto que tiene el medio sobre el objeto.

Pensemos entonces como está afectada una de las grandes genialidades logradas por el hombre a lo largo de su historia, “el hormigón”. Símbolo de grandeza e inteligencia que perdura por años, pero que tampoco está exento de ese ansiado equilibrio que busca la madre naturaleza.

En este primer capítulo veremos de modo general como está afectado el hormigón y las estructuras embebidas en él, ante los implacables ambientes que nos presenta la naturaleza en nuestro país.

1.1 Características de los ambientes corrosivos en el Ecuador.

El territorio del Ecuador está dividido en tres regiones naturales claramente definidas entre sí, ya sea por su topografía, clima, vegetación y población. Estas tres regiones son: Costa, Sierra y Oriente.

Debido a su posición geográfica y a la diversidad de alturas impuestas por la cordillera de los Andes, el Ecuador presenta una

gran variedad de climas y cambios considerables a cortas distancias, por esta razón, ciertas áreas del país reciben la influencia de masas de aire con diferentes características de temperatura y humedad.

Las características de los ambientes en el Ecuador y de cualquier parte del mundo responden a una diversidad de factores que modifican su condición natural, tales como.

- . Latitud geográfica.
- . Altitud del suelo.
- . Dirección de las cadenas montañosas.
- . Vegetación.
- . Acercamiento y alejamiento del Océano.
- . Corrientes marinas y los vientos.

No obstante existen otros factores que alteran aún mas las condiciones ambientales en nuestro país, convirtiéndolos en agentes agresivos para muchos elementos, metales, estructuras e incluso para los habitantes de una población determinada.

Un ambiente corrosivo puede consistir de varios elementos corrosivos. No todos los contaminantes corrosivos se concentran en

un solo ambiente corrosivo, como también casi nunca se consigue un ambiente corrosivo con un solo contaminante en su atmósfera. Por lo tanto la selección de un método de prevención de corrosión ideal se hace mas difícil en la medida que el ambiente es mas corrosivamente agresivo.

En muchas regiones costaneras el incremento de la población es bastante alto, lo cual aumenta la demanda de energía como también aumenta la corrosión atmosférica promovida por los contaminantes provenientes de los automóviles, gases, fertilizantes, fluidos de insectos y animales y otro contaminantes corrosivos. Concreto, acero, casi la mayoría de las aleaciones, todos los diferentes tipos de estructuras y equipos tanto residenciales, industriales son vulnerables a la corrosión proveniente de la abundancia de contaminantes encontrados en la atmósfera. Inclusive a distancias no tan cerca del océano las estructuras y equipos son susceptibles a la contaminación proveniente la costa.

De acuerdo al nivel de afectación y su incidencia podemos separar o clasificar a los ambientes corrosivos en nuestro país como se detalla a continuación.

Marino / Industrial: (Severo)

Esta combinación de contaminantes corrosivos generalmente se consigue en perforaciones petroleras, Industrias localizadas en zona de costa.

Por su salinidad el ambiente marino es considerado un ambiente muy agresivo para los metales la acción de los iones cloruro presentes en el agua de mar inducen rápidamente una corrosión en los metales y materiales expuestos, debilitando y disminuyendo drásticamente la vida útil de muchas estructuras o elementos de máquinas, tanto así que se hace necesario introducir un factor de corrosión en las etapas de diseño o considerar costear la implementación de un método adicional para la prevención de la corrosión.

Industrial: (Pesado a severo).

Aquí tenemos varios contaminantes atmosféricos como: oxido de sulfuro, nitrógeno, óxidos, la humedad, la lluvia ácida o rocío de bajo PH proveniente de corrosivos sueltos en la atmósfera.

El aire contaminado es altamente corrosivo, pues permite con facilidad el deterioro de muchas estructuras. Esto se puede evidenciar muchas veces en el alto nivel de corrosión encontrado en edificaciones que están en contacto o que se encuentran en las cercanías de las industrias que emanan gases contaminantes.

Urbano: (Medio - Pesado).

Encontramos emisión de automóviles que ha tenido una gran alza en los últimos años en la ciudad de Guayaquil, desechos de combustión y emisiones en los edificios elevan el nivel de dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno ambos extremadamente corrosivos.

Suburbano / Rural: (Medio a Pesado).

Generalmente estos tipos de ambientes incluyen emisión de automóviles, diferentes niveles de amoníaco, nitrógeno, fertilizantes, gases diesel y fluidos provenientes de pájaros, insectos y desechos, siendo todos estos corrosivos.

Generalmente el litoral ecuatoriano es el más susceptible a los efectos contaminantes que conllevan a la formación de ambientes

corrosivos, ya que al combinarse con la humedad del ambiente y la salinidad por estar en las cercanías del mar se generan agentes corrosivos de mayor agresividad y por ende son mas peligrosos que los ambientes corrosivos que se podrían formar en la sierra ecuatoriana por la ausencia de la salinidad.

Las altas temperaturas también juegan un papel muy importante en la generación de ambientes corrosivos. Un aumento sustancial de la temperatura tiende a estimular a los ataques corrosivos por el aumento de la velocidad de las reacciones electroquímicas y de procesos de difusión en los materiales. Para un nivel de humedad relativa constante, un aumento de temperatura llevaría a una mayor tasa de corrosión.

La humedad presente en nuestro entorno local también tiene su efecto y que corresponde a la cantidad porcentual de vapor de agua presente en el aire. Se constituye en uno de los principales puentes de intercambio de electrones al ser un electrolito que permite la rápida interacción entre los metales o materiales expuestos a un ambiente que tenga componentes considerados como corrosivos o dañinos.

La humedad relativa en la ciudad de Guayaquil promedia entre el 75 y 80 %, un valor elevado que da lugar a que se propicien las condiciones ideales para dar inicio a procesos de corrosión. En este trabajo nos centramos específicamente a este efecto en los hormigones.

1.2 Deterioro del hormigón en ambientes corrosivos.

El hormigón es el material más ampliamente producido en la tierra. El uso de cemento, un ingrediente clave de hormigón, que fue empezado a utilizar por los egipcios, se remonta a más de 3500 años. En la construcción de las pirámides, una forma temprana de la de cemento fue utilizado como un agente aglutinante estructural. El Coliseo Romano es un ejemplo más de un hito histórico como la utilización de mortero de cemento de un material de construcción. El consumo mundial de cemento está cerca de mil millones de toneladas y se espera que aumente aún más.

Contrariamente a la creencia común, el concreto en sí es un material compuesto muy complejo. Tiene baja resistencia cuando está cargado a tensión, y por lo tanto es común la práctica de reforzarlo con acero, para mejorar la tracción y propiedades mecánicas.

Estructuras de hormigón, tales como puentes, edificios, carreteras elevadas, túneles, estacionamientos, plataformas petrolíferas en alta mar, muelles y diques contienen el acero de refuerzo (varillas generalmente corrugadas). El principal agente destructor de las estructuras de hormigón armado es la corrosión que daña finalmente al acero incrustado en el concreto.

Ahora bien, si entendemos que el daño de una estructura de hormigón armado ocurre en la armadura de acero, pues el hormigón debe jugar un papel muy importante en este proceso y es precisamente este comportamiento el que se analizó a lo largo de este proyecto.

En nuestro medio el cemento tipo Portland es el más utilizado en las mezclas de concreto, es un producto fabricado, hecho por calcinación a altas temperaturas de piedra caliza y arcillas en un horno rotatorio, las temperaturas de calcinación típicamente alcanzan los 1450° C. Reacciones continuas se dan en estado sólido, el producto resultante es el clinker, que finalmente es enfriado al medio ambiente. La microestructura química del clinker está presentada en la siguiente tabla de óxidos.

COMPONENTES PRINCIPALES

Nombre	nomenclatura	%
óxido de calcio	CaO	60-67
óxido de silicio	SiO ₂	17-25
óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	3.0-8.0
óxido férrico	Fe ₂ O ₃	0.5-6
óxido de magnesio	MgO	0.2-2
Álcalis	Na ₂ O y K ₂ O	0.2-1.3
Anhídrido sulfúrico	SO ₃	1.0-3.0

COMPONENTES SECUNDARIOS

bióxido de titanio	TiO ₂
óxido de cromo	Cr ₂ O ₃
anhídrido fosfórico	P ₂ O ₅
cal libre	CaO

Tabla 1.1 Componentes principales y secundarios del cemento Portland

Los óxidos principales forman silicatos diminutos y ferroaluminatos de calcio en forma de minerales de estructura cristalina, parte de ellos pasan a ser de forma vítrea.

Otro cemento que se utiliza comúnmente en los hormigones en nuestro medio es el cemento puzolánico, que es un tipo muy similar al cemento Portland, pero que es mezclado con puzolanas naturales o artificiales en una proporción de 15 a 45 %. Esto brinda una mayor resistencia a los agentes químicos, se caracteriza por desarrollar menos calor al fraguar por lo que este proceso es más lento, menor

dilatación y más impermeabilidad que el Portland. Por esta razón puede ser considerado como un cemento para aplicaciones de albañilería.

El empleo del hormigón en masa y armado supera actualmente a todos los otros materiales de construcción considerados conjuntamente, lo que confiere una enorme repercusión en todos los aspectos: científico, técnico, económico y social a las investigaciones capaces de aportar soluciones a la amplia problemática que plantea la durabilidad de las estructuras, ya existentes o futuras, de hormigón armado.

En grandes áreas geográficas, la ausencia de agua dulce y la escasez de vías de comunicación obligan a utilizar agua y/o arena de mar en la fabricación del hormigón, dando lugar a que se inicie el daño en el hormigón y el posterior daño en la estructura desde el nacimiento del concreto.

La exposición de los hormigones al medio ambiente permite que estos interactúen en equilibrio con la naturaleza produciendo reacciones químicas que también serán importantes en el

comportamiento de los hormigones a lo largo del tiempo y determinarán su vida útil.

Estos ambientes principalmente son de extrema agresividad y contienen agentes que se introducen o difunden a través de hormigón hasta llegar a afectar internamente a las estructuras de acero, también son notorias estos efectos en el hormigón cuando podemos observar que este presenta agrietamientos o tiene una gran porosidad.

Se han identificado claramente dos ambientes extremadamente perjudiciales para las estructuras de hormigón armado y se detallan a continuación:

- Ambientes marinos. El contacto del hormigón en el agua de mar, permite la distribución localizada de iones cloruro en la capa pasiva del concreto. Considerando además los iones cloruros que pudieron estar presentes al momento de introducir el agua a la mezcla.
- Dióxido de carbono (CO₂). La presencia de este elemento en la atmósfera da lugar a la carbonatación del concreto,

disminuyendo el valor del PH, dando lugar a una avería general en la pasividad.

1.3 El Dióxido de carbono como agente degradante en el concreto.

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. La podemos definir como un proceso superficial ligado a las concentraciones de dióxido de carbono presentes en el aire, a la presencia de humedad y a la temperatura ambiente.

El contenido de dióxido de carbono en aire oscila entre el 0.03%, alcanzando valores superiores al 0.10% en atmósferas agresivas.

Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros (propios del ambiente marino), no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos.

La presencia de dióxido de carbono en la atmósfera permite que éste se difunda entre las pequeñas porosidades que contenga el hormigón y avanzar hacia el interior de la estructura, reduciendo significativamente el PH del hormigón al reaccionar directamente con el hidróxido de calcio (u otros hidróxidos presentes) para producir carbonato de calcio en el hormigón de la siguiente manera (ec.1.1).



La carbonatación se manifiesta como una reducción del PH del hormigón que inicia a través de los poros y a menudo aparece como un frente en paralelo a la superficie externa. Este frente puede hacerse visible mediante la aplicación de un indicador de fenolftaleína a las superficies expuestas de hormigón fresco.

Detrás del frente carbonatado, donde todo el hidróxido de calcio se ha agotado, el PH es de alrededor de 8, mientras que por delante del frente carbonatado, el PH se mantiene por encima de 12.5. La capacidad de pasivación en los poros disminuye con la disminución del PH. Entonces la corrosión inducida por la carbonatación tiende a proceder de manera más uniforme sobre la superficie de las barras de acero.

La tasa de penetración de los daños producidos por la carbonatación en el concreto disminuye con el tiempo. Obviamente, el dióxido de carbono habrá de penetrar a mayores distancias en el hormigón respecto al tiempo. La precipitación de carbonato de calcio y posiblemente la adicional hidratación del cemento también se cree que contribuyan a la velocidad de ingreso.

Varias variables afectan la velocidad de carbonatación. En general el hormigón de baja permeabilidad es más resistente. La carbonatación tiende a proceder más rápidamente en los niveles de humedad relativa entre 50 y 70 %. Al reducir los niveles, el dióxido de carbono puede penetrar en el concreto relativamente rápido, pero habrá poco hidróxido de calcio disponible en la disolución como para acelerar el proceso de carbonatación. Tener los niveles más altos de humedad permite que se disuelva libremente el hidróxido de calcio, evita en gran medida el ingreso del dióxido de carbono. Así se explica por qué diferentes lados de la fachada de un edificio de concreto, por ejemplo, pueden variar grandemente en la profundidad de sus frentes de carbonatación. Una fachada expuesta al mar puede tener poca carbonatación debido a su contenido constantemente alto de humedad, mientras que la carbonatación puede haber avanzado a niveles más profundos en los otros lados del edificio.

El concreto permeable se carbonatará rápidamente. Muchos años de protección contra la carbonatación pueden sumarse al concreto reforzado si los constructores simplemente siguen las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él.

Entonces claramente los ciclos ambientales alternantes de condiciones secas y mojadas, en conjunto con alguna de las propiedades y características del hormigón, serán asociados con un rápido deterioro por carbonatación.

Dado que el ingreso del dióxido de carbono es un proceso de tipo difusivo, puede estimarse que el espesor de la capa carbonatada es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Dicha proporcionalidad puede expresarse como una ecuación (ec.1.2) si se conoce el valor de una constante K o constante de carbonatación, que varía dependiendo del tipo de material y que es la que se calculará a lo largo del este trabajo.

$$X = K \cdot (t)^{1/2} \quad (\text{ec.1.2})$$

Donde:

X: Espesor de la capa carbonatada.

K: Constante de avance de carbonatación.

t: tiempo de exposición al medio.

La constante K depende básicamente de cuatro parámetros:

- La concentración de dióxido de carbono en el aire.
- La permeabilidad del hormigón de recubrimiento.
- La humedad relativa del hormigón de recubrimiento (que depende de la humedad relativa ambiente y en parte, de la calidad del material).
- El contenido de óxido de calcio en la pasta de cemento hidratada del recubrimiento (que depende del contenido de cemento en el hormigón, de su grado de hidratación y del tipo de cemento).

Para hormigones expuestos a la intemperie (mojado y secado frecuente), la velocidad de carbonatación suele ser sensiblemente menor a la indicada por la ecuación.

Mejorando la calidad del hormigón se puede reducir el valor de la constante y retrasar el avance del frente de carbonatación, lo que equivale a aumentar el período de incubación y, por lo tanto, la vida útil de la estructura.

En el presente trabajo se mostrará experimentalmente el comportamiento de los hormigones utilizados en nuestro medio respecto al tiempo en su exposición frente a una atmósfera saturada de dióxido de carbono y comparados con una atmósfera en condiciones naturales.

1.4 Iones cloruro como agente degradante en el concreto.

El PH fuertemente básico del hormigón (aproximadamente 12,5) conduce a la formación de un "film protector" sobre las armaduras y, en estas condiciones, se dice que el acero está "pasivado"; esto es, aun en presencia de oxígeno y humedad, no se oxida. Los iones cloruro son capaces de "romper" este film pasivante y dejar al acero sin protección, dado que forman un compuesto soluble, el cloruro ferroso (FeCl) con los óxidos de hierro que constituyen el film.

Una vez que se ha perdido la pasivación, el acero es susceptible de corroerse si están presentes todos los elementos necesarios: oxígeno, humedad y un medio (el hormigón) de baja resistividad eléctrica.

Formas de ingreso de los iones cloruro al hormigón

La presencia de iones cloruro en el hormigón puede deberse a dos situaciones diferentes: a) ingresaron en el momento de preparación de la mezcla, y b) ingresaron durante la vida en servicio del hormigón.

El primer caso es lógicamente más severo que el segundo, aunque es el más fácil de evitar con un adecuado control de los componentes de la mezcla. Las situaciones más comunes son que los iones cloruro integren el agua de amasado (aguas salobres), constituyan una contaminación del agregado fino (arena) o formen parte de los aditivos (particularmente, aditivos aceleradores).

El caso b) corresponde a situaciones típicas de hormigones en ambiente marino, en las que el agua salada ingresa lentamente desde el exterior y cuando alcanza las barras, se inicia el deterioro

propriadamente dicho o la fase de propagación. El ingreso del ión cloruro al hormigón estará vinculado al transporte de fluidos en un medio poroso, por lo que se centrará la atención en comprender los distintos mecanismos que intervienen.

Mecanismos de transporte de fluidos.

Es útil señalar que existen básicamente cuatro mecanismos de transporte de fluidos en un hormigón: succión capilar, difusión, permeabilidad y una combinación de succión y permeabilidad conocida como efecto "mecha".

La succión capilar se produce cuando el hormigón seco se pone en contacto con un líquido, en nuestro caso, agua con iones cloruro disueltos. El efecto de la tensión capilar provoca un ingreso rápido del agua en el hormigón, tanto mayor en cuanto peor sea la calidad del hormigón del recubrimiento. Obviamente, para un hormigón saturado su capacidad de absorción capilar es nula.

El transporte de un fluido está controlado por la permeabilidad del hormigón cuando existe una diferencia de presión hidráulica entre dos secciones adyacentes que "provoca" o induce el movimiento del

fluido. Es claro también que un hormigón más denso, menos poroso (más resistente) y bien curado, es menos permeable. Es condición necesaria que ambas caras del hormigón estén en contacto con el fluido (agua) para poder considerar que el mecanismo de transporte es la permeabilidad. Afortunadamente, los hormigones de buena calidad son muy poco permeables.

El transporte de una solución puede producirse por diferencias de concentración entre dos zonas adyacentes, es decir, en una zona del hormigón la concentración es mayor que en otra; esto genera un movimiento desde la zona más concentrada hacia la zona menos concentrada, intentando establecer un equilibrio. Este tipo de proceso se conoce como "difusivo" y es bastante lento. Un ejemplo típico es el ingreso de dióxido de carbono desde la atmósfera, provocando la carbonatación del hormigón estudiado en la sección anterior.

La cuarta forma de transporte combina dos fenómenos. Por una cara "húmeda", ingresa el fluido, controlado por la permeabilidad del material. Por la cara opuesta, en contacto con el aire, se evapora agua y existe una zona intermedia, en el interior del material, donde se producen meniscos que aceleran el proceso de transporte. La

evaporación en la superficie "seca" acelera el ingreso de fluido desde la parte "húmeda" y, por analogía, se lo denomina "efecto mecha". Este proceso es más rápido que el transporte por difusión y que el controlado por la permeabilidad, aunque es más lento que la succión capilar.

Dependiendo de las condiciones de exposición del hormigón y su contenido de humedad, prevalecerá un mecanismo u otro, cambiando la velocidad de ingreso del fluido (agua con iones cloruro en este caso) en el material y alterando la duración del período de "incubación" del deterioro.

Los ciclos de humedecimiento y secado de los ambientes marinos y el agua de mar, propios de nuestro ambiente promueven a la acumulación de iones cloruro en las superficies de hormigón. Por lo tanto en la superficie real las concentraciones de cloruros pueden ser muy superiores a las de la mayor parte del entorno.

Es posible medir la concentración de iones de cloruro en un hormigón, en un tiempo determinado. Basándonos en el modelo matemático de la segunda ley de Fick (ec. 1.3), que establece en forma de ecuación diferencial diversos casos de difusión e materia o

energía en el que inicialmente no existe un equilibrio químico o térmico. La forma básica de esta ley de difusión se representa en la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = D\left(\frac{d^2C}{d^2x}\right) \quad (\text{ec. 1.3})$$

Donde:

C: Concentración de la sustancia (para nuestro caso iones de cloruro).

D: Coeficiente de difusión de iones de cloruro en el hormigón.

t: tiempo.

X: Profundidad de penetración a la que se hace el análisis.

Con la experimentación en hormigones podremos medir las concentraciones de iones de cloruro presentes a varias profundidades de penetración y mediante la solución del modelo matemático planteado para procesos de difusión.

En el siguiente capítulo se mostrará en detalle todo el proceso considerado para el cálculo del coeficiente de difusión, gracias a esto podremos ver y evaluar el comportamiento de los hormigones

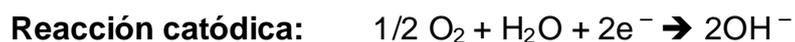
normalmente utilizados en nuestro medio en exposición a ambientes marinos considerados como agresivos.

1.5 Efecto en estructuras de acero embebidas en hormigón.

Los efectos que se producen en el acero reforzado, pueden ser perjudiciales y afectar drásticamente la durabilidad de toda la estructura.

Los daños por corrosión en el acero reforzado constituyen un proceso electroquímico anódico y catódico que ocurre en las moléculas.

En ausencia de iones cloruro, la reacción de la disolución anódica de hierro, está equilibrada por la reacción catódica de reducción del oxígeno (ec.1.4).



El oxígeno se difunde a la superficie de acero de refuerzo a través de zona porosa del hormigón y por las grietas que actúan como vías de difusión rápida, especialmente si no están llenas de agua. Los iones Fe^{2+} producidos en los ánodos se intercambian con los iones OH^- de la reacción catódica para finalmente producir una película pasiva estable.

La solución de iones cloruro con la misma carga de iones OH^- , la combinación con los cationes Fe^{2+} forma complejos cloruros de hierro inestables. Por lo tanto se lleva a cabo la acumulación de productos de corrosión voluminosos.

Los iones cloruros también tienden a ser liberados de los complejos cloruros inestables de hierro, haciendo que estos iones sean nocivos para el acero de refuerzo. En última instancia, el hierro se precipita en forma de óxido de hierro o hidróxido de productos de corrosión, se puede entonces argumentar que el consumo de iones de hidróxido conduce a la reducción sustancial del PH localizado y por lo tanto una mayor disolución del metal.

La corrosión inducida en las varillas de acero tiende a ser un proceso de corrosión localizada, en la superficie original pasiva que se destruye a nivel local bajo la influencia de los iones de cloruro. Aparte

de las tensiones internas creadas por la formación de productos de corrosión y grietas que conducen al desprendimiento de la cubierta de cemento, el cloruro de ataque en última instancia reduce la sección transversal de las varillas de la estructura y compromete significativamente la resistencia de carga del hormigón reforzado con acero.

Una cubierta densa de concreto proporciona una buena barrera física que protege al acero de la corrosión debida a cloruros. También limita el proceso de difusión del oxígeno. La concentración de oxígeno en la interfaz acero/concreto podría ser muy baja y, como resultado, el potencial de corrosión podría cambiar a un valor más negativo, lo que no indica una probabilidad alta de corrosión del acero.

En el caso de la carbonatación, el acero se vuelve vulnerable en el momento que la penetración de dióxido de carbono al disminuir el valor del PH que como se lo mencionó antes debilita la capa pasiva de las armaduras y, si las condiciones del medio son favorables para la corrosión (humedad, oxígeno, temperatura), el acero se oxida, provocando un aumento localizado de volumen, fisuras y hasta descascaramiento del hormigón que lo recubre. Paralelamente, se va

reduciendo la sección resistente de las armaduras, pudiendo llegarse a situaciones de riesgo y hasta colapso.

CAPÍTULO 2

2. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS Y PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN EL HORMIGÓN.

Para obtener datos cualitativos y cuantitativos sobre el comportamiento del hormigón en diversos ambientes, se hace necesaria la experimentación controlada, desde la preparación de las probetas hasta la obtención de los últimos datos siguiendo normas ya establecidas para estos procesos experimentales.

En este capítulo se detallan completamente los procedimientos adoptados para la fase experimental. Se muestra el comportamiento de los procesos empleados respecto al tiempo, los métodos de cálculo y finalmente se presentan los resultados obtenidos para su posterior análisis.

2.1 Construcción de probetas de hormigón tipo puzolánico y portland.

Para esta fase del proyecto se construyeron probetas de hormigón cilíndricas, con dimensiones de 10cm de diámetro y 20cm de longitud; estas medidas son previamente establecidas para este tipo de experimentos.

Cada una de las probetas fue meticulosamente preparada en moldes metálicos normalizados, cuidando la correcta proporción de los componentes de la mezcla del concreto y fundamentalmente procurando que la mezcla sea lo más uniforme posible; después de dejar secar 24 horas las mezclas en los moldes, se procedió a retirarlos y codificarlos de acuerdo al tipo de hormigón al que pertenecían y al ambiente en que serían expuestas.

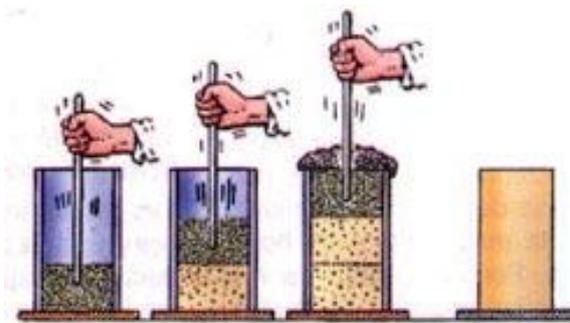


Fig. 2.1 Correcto llenado de mezcla en molde



Fig. 2.2 Mezcla de concreto en moldes cilíndricos



Fig. 2.3 Probetas retiradas del molde

Composiciones de mezclas para ensayo de rotura

Hormigón tipo Puzolánico

Diseño de Hormigón con Cemento Tipo IP (patrón) Código 19772

Fecha de moldeo	13/05/2009
Dosificación por m3	
Cemento IP	500 Kg.
P 12,5mm	533 Kg.
Arena triturada	291 Kg.
Arena de río	791 Kg.
Agua	210 Kg.
SikamentNR	1% del cont. de cemento

Tabla 2.1 composición puzolánico patrón

Diseño de Hormigón con Cemento Tipo IP (con Inhibidor) Código 19773

Fecha de moldeo	15/05/2009
Dosificación por m3	
Cemento IP	500 Kg.
P 12,5mm	533 Kg.
Arena triturada	291 Kg.
Arena de río	791 Kg.
Agua	210 Kg.
SikamentNR	1% del cont. de cemento
Inhibidor MCI 2006 NS	0,6 Kg.

Tabla 2.2 composición puzolánico + inhibidor

Hormigón tipo Portland

Diseño de Hormigón con Cemento Tipo II (patrón) Código 19787

Fecha de moldeo	25/05/2009
Dosificación por m3	
Cemento II	500 Kg.
P 12,5mm	533 Kg.
Arena triturada	291 Kg.
Arena de río	791 Kg.
Agua	210 Kg.
SikamentNR	1% del cont. De cemento

Tabla 2.3 composición portland

Diseño de Hormigón con Cemento Tipo II (con Inhibidor) Código 19821

Fecha de moldeo	27/05/2009
Dosificación por m3	
Cemento II	450 Kg.
P 12,5mm	531 Kg.
Arena triturada	291 Kg.
Arena de río	791 Kg.
Agua	189 Kg.
SikamentNR	1% del cont. de cemento
Inhibidor MCI 2006 NS	0,6 Kg.

Tabla 2.4 composición portland + inhibidor

Es importante recalcar que para los ensayos de difusión se emplearon únicamente las mezclas patrón, ya que el objetivo del presente trabajo fue realizar estas mediciones en hormigones en estado normal.

2.2 Ensayos de rotura por compresión.

Una práctica común en el hormigón es hacer pruebas de su resistencia a la compresión, debido a que por lo general las estructuras de hormigón armado están siempre sometidas a este tipo de esfuerzos, esto como valor agregado al proyecto, nos permite tener una mejor idea de la calidad y resistencia de los hormigones que normalmente se utilizan en nuestro medio.

Para llevar a cabo este proceso se destinaron seis probetas cilíndricas de cada tipo de hormigón y poder realizar las pruebas con dos probetas respectivamente a los 7, 14 y 28 días, tiempo en que el hormigón normalmente alcanza su máxima resistencia a la compresión. Esto bajo la norma ASTM C39M, que establece un método estándar para medir la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón.

Después de 24 horas de fundir las mezclas, las probetas se desmoldan y transportan al laboratorio para su curado. Durante el transporte y manipuleo, las probetas deben ir acondicionadas para evitarles golpes y pérdida de humedad, así como variaciones grandes de temperatura.

Llegadas al laboratorio, las probetas se almacenan a temperaturas de 23°C en una piscina con agua saturada con cal que las cubra totalmente hasta el momento del ensayo.

A los 7 días de curado se retiraron dos probetas de la piscina y se las coloca en un banco de pruebas diseñado para el efecto. El cual somete a la probeta a un ensayo destructivo generando progresivamente una carga de compresión hasta producir la rotura.

El valor de la resistencia corresponde a la lectura que mostró el equipo al momento de la rotura con dos probetas de iguales características y se tomó como referencia la media entre los dos valores obtenidos. En este equipo previo al ensayo deben configurarse valores puntuales referentes a la probeta de ensayo tales como dimensiones y peso.

De igual forma se procedió para las probetas que se retiraron de la piscina a los 14 y 28 días de curado.

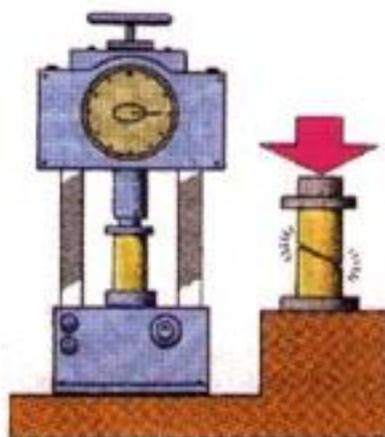


Fig. 2.4 Esquema de ensayo de rotura por compresión.

Es muy importante recalcar la importancia de la calidad de las probetas utilizadas para las pruebas de rotura por compresión. Es difícil probar cuándo se han producido deficiencias en la preparación de las probetas cilíndricas. Sin embargo, hay unos pocos detalles que pueden ayudar al operador que ha fabricado a conciencia un hormigón de buena calidad, a reivindicar la misma.

Si una probeta cilíndrica da un bajo resultado de resistencia a rotura, y muestra una distribución irregular de agregados desde la parte superior a la inferior, o exceso de finos o de agregado grueso, puede ser ello indicativo que ha habido un muestreo deficiente. Un ensayo

de resistencia debe ser representativo de la masa entera de hormigón. Por ello, antes de moldear las probetas, la muestra de hormigón debe ser totalmente remezclada a mano, en un recipiente de paredes no absorbentes.

La aparición de un exceso de agregado grueso en el fondo de la probeta, puede indicar también que se usó para la compactación una barra con extremo plano en lugar de redondeado; también ese fenómeno aparece cuando se ha producido un exceso en la compactación, en cuyo caso se observa que se ha acumulado una considerable cantidad de finos en la parte superior de la probeta. Lo mismo sucede en el caso de probetas compactadas por vibración, cuando se excede el tiempo de la misma.

Huecos sobre la superficie de las probetas cilíndricas, indican corrientemente que las mismas no fueron llenadas en tres capas de un tercio de la altura de la probeta, ni compactadas con 25 golpes por capa. Los huecos, al reducir la sección transversal de la probeta, producen pérdidas importantes de resistencia.

Resultados

Hormigón tipo Puzolánico

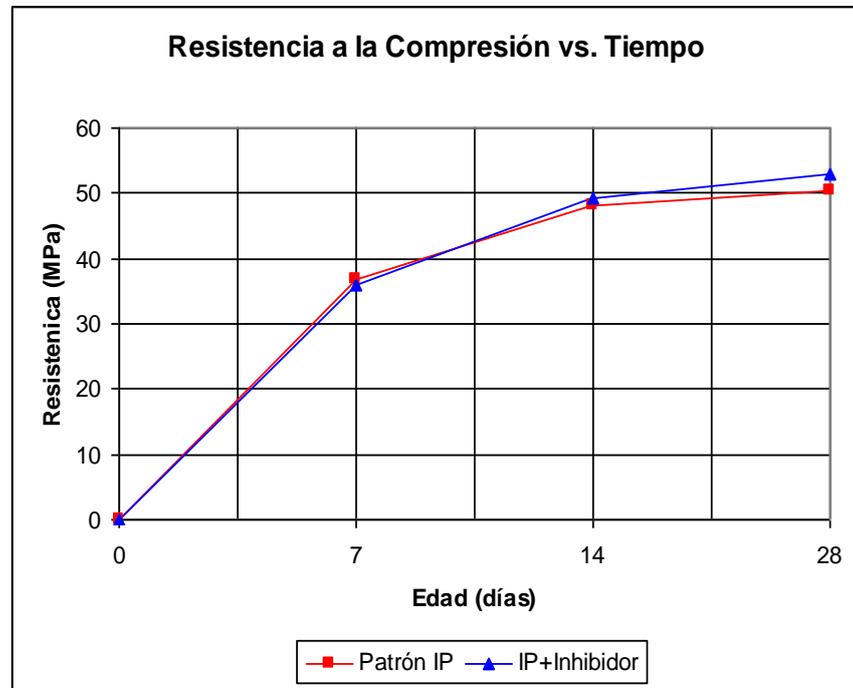


Fig. 2.5 Resistencia vs. Tiempo hormigón puzolánico

Resistencia a la Compresión

<i>Edad</i> <i>Días</i>	<i>Patrón IP</i> <i>MPa</i>	<i>IP+ Inhibidor</i> <i>MPa</i>
7	36,92	35,81
14	48,00	49,30
28	50,26	52,89

Tabla. 2.5 Resistencia vs. Tiempo hormigón puzolánico.

Hormigón tipo Portland

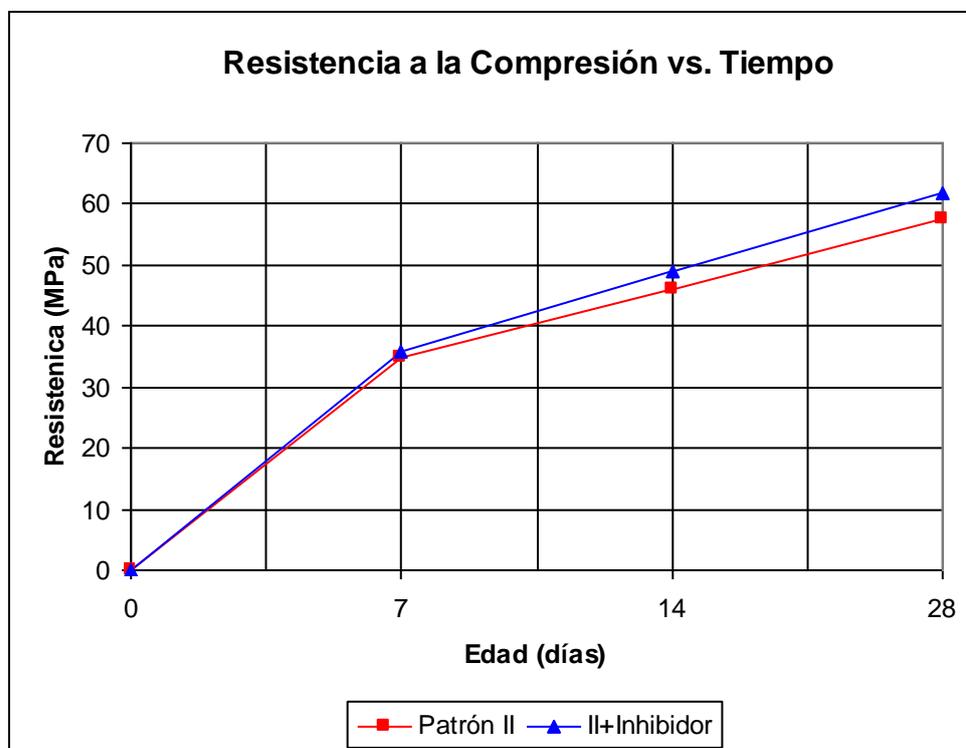


Fig. 2.6 Resistencia vs. Tiempo hormigón Portland

Resistencia a la Compresión

<i>Edad</i>	<i>Patrón IP</i>	<i>IP+ Inhibidor</i>
<i>Días</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>
7	34,83	35,87
14	45,89	49,09
28	57,48	61,89

Tabla 2.6 Resistencia vs. Tiempo hormigón Portland

Como podemos observar en los resultados obtenidos, nos permitimos tener una idea en el comportamiento de los hormigones utilizados en el proyecto en cuanto a su resistencia, se aprecia que el hormigón tipo portland fue el que presentó una mayor resistencia al final de los 28 días, aún siendo no muy marcada la diferencia respecto al hormigón puzolánico.

2.3 Exposición de las probetas en varios ambientes.

Una vez que se realizaron las pruebas de resistencia de los hormigones, se establecieron las metodologías a seguir para la siguiente fase del presente proyecto, la cual consistía en una etapa netamente experimental durante un tiempo establecido, esto implicó la adecuación de los sistemas controlados que simularían ambientes de extrema agresividad a los que expusieron las probetas de hormigón y también considerando el comportamiento de los hormigones en el ambiente natural en Guayaquil.

Codificación de las probetas:

Es necesaria la correcta identificación para nuestra experimentación.

A continuación se muestra en detalle la codificación.

TIPO	ENSAYO	MEDIO	#
PX (Puzolánico sin inhibidor)	D (Difusión)	C (carbonatación)	Número de espécimen
ZX (Portland sin inhibidor)	R (Resistividad)	S (salino)	
	S (Acelerada)	N (natural)	

Fig. 2.7 Codificación de probetas para ensayos

Ejemplo:

PX – D – C – 1 0

Esta codificación corresponde a una probeta de hormigón tipo puzolánico sin inhibidor, para prueba de difusión, expuesto a carbonatación y es el espécimen número uno.

Con esta codificación se reconocerán a todas las probetas que se trataron en el proyecto.

2.3.1 Difusión de iones cloruro en solución de cloruro de sodio.

En esta fase de la experimentación una vez destinadas y codificadas las probetas para el ensayo de difusión de iones de cloruro, fue necesaria la adecuación de un sistema aunque sencillo, nos permita lograr nuestro objetivo.

La idea fue de inducir la difusión de los iones de cloruro presentes en el agua de mar en las probetas de hormigón en sentido vertical hacia abajo. De modo que se distribuyan axialmente a lo largo de la probeta durante el tiempo de exposición que fue de 5 meses.

Adecuación del sistema.

- Se codificaron las probetas de acuerdo al medio y a su composición.

La codificación empleada fue la siguiente:

- PX – D – S – 1
 - PX – D – S – 2
 - 2X – D – S – 1
 - 2X – D – S – 2
- Para lograr que los iones se difundan en la parte central de la probeta, se procedió a pintar con pintura de caucho el área lateral de la probeta y una especie de anillo en la parte superior y evitar en lo posible una difusión lateral.
 - Se cortaron secciones de 15cm de tubo de PVC de 10cm de diámetro para incrustarlos parcialmente en las probetas

cilíndricas. Se sellaron con silicón los espacios que quedaban para evitar fugas del agua salada.



Fig. 2.8 Esquema básico del sistema empleado para difusión de cloruros

- Dentro del tubo de PVC se colocó agua destilada con un contenido de 3.5% de cloruro de sodio (sal pura) hasta un nivel de 3cm, el cual era controlado y completado a medida que se difundía en el hormigón con el paso de los días. Esto durante un periodo de 5 meses.

A medida que pasó el tiempo se lograba que se difundan cada vez más los cloruros y que por ende exista un gradiente de concentración a lo largo del eje axial de la probeta. Lógicamente es de suponer que en los niveles superiores de la probeta, el nivel de concentración sería mayor y que disminuiría

progresivamente a medida que avanzaba verticalmente hacia abajo en la probeta.

Esta fue la razón por la que se debió cortar las probetas en rebanadas una vez que sean extraídas del medio de exposición.

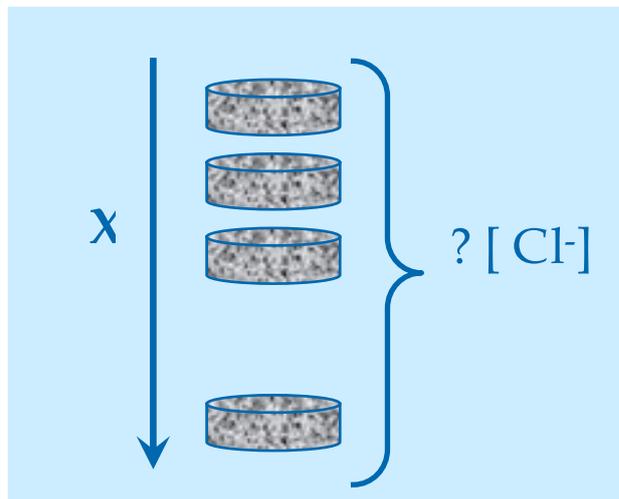


Fig. 2.9 Esquema de penetración de cloruros

Luego de los cinco meses de exposición de las probetas a estas condiciones, estas fueron retiradas y preparadas para el análisis químico que nos dieron como resultado el valor de las concentraciones de cloruros a diferentes profundidades.

El proceso de detalla a continuación:

- Para cada tipo de hormigón se seleccionaron 2 probetas de igual condición, es decir el mismo hormigón y las mismas propiedades el resultado al final, será la media de los resultados obtenidos.
- Se cortaron 4 rebanadas por cada probeta; cada rebanada fue cuidadosamente codificada como se gráficamente (Fig. 2.10 y 2.11).

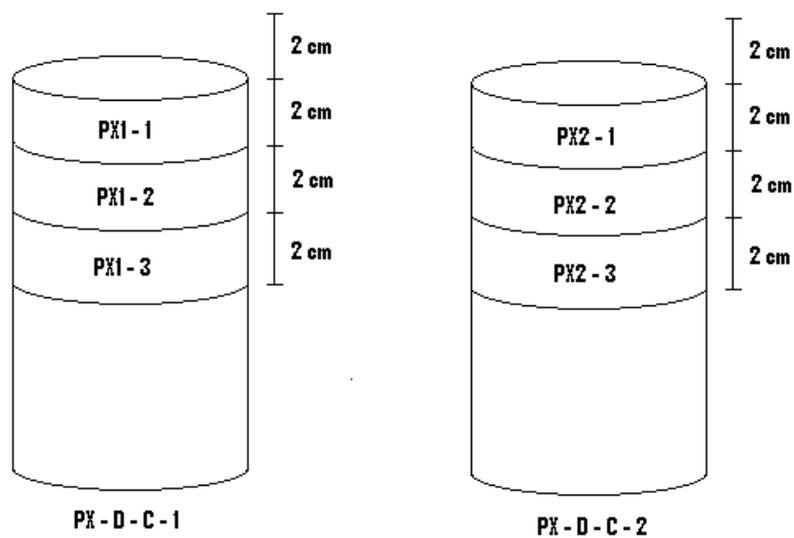
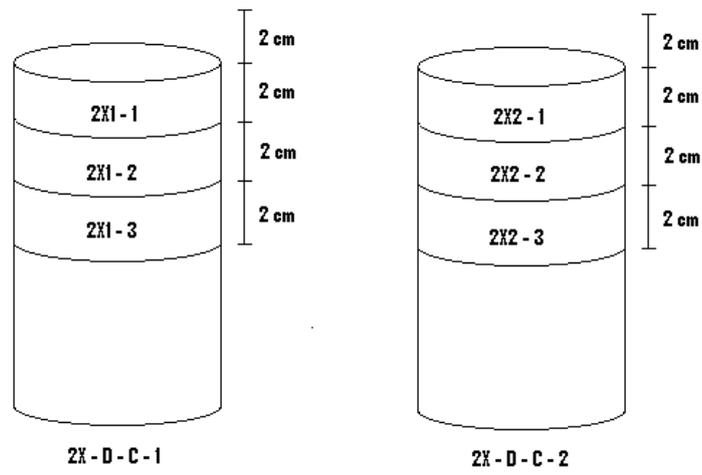


Fig. 2.10 Codificaciones de las rebanadas de hormigón puzolánico



**Fig. 2.11 Codificaciones de las rebanadas de hormigón
Portland**



Fig. 2.12 Rebanada de hormigón

- Una vez codificadas las probetas, tuvieron que ser limpiadas para evitar contaminaciones, presencia de pintura y datos erráticos.



Fig. 2.13 Rebanada de probeta limpia y lista para trituración

Una vez hecho esto era necesario triturar las cada una de las rebanadas hasta lograr un polvo de muy finas partículas de aproximadamente 850 μm según lo establecido en norma ASTM C1152 y proceder a realizar el respectivo análisis químico.

Para lograr este objetivo el método fue el siguiente:

- Triturar inicialmente la rebanada en una trituradora de mandíbulas.



Fig. 2.14 Trituradora de mandíbulas.

Se hicieron 2 pasadas de trituración en cala una de las trituradoras.



Fig. 2.15 Probeta triturada en molino de mandíbulas

- Una vez hecho esto, se procedió a la trituración en un molino de rodillos.



Fig. 2.16 Trituradora de rodillos



Fig. 2.17 Probeta triturada en rodillos

- Finalmente se hicieron dos pasadas en una trituradora de disco.



Fig. 2.18 Trituradora de Discos



Fig. 2.19 Probeta triturada en discos

- Una vez hecho esto se pasaron las muestras por un filtro o malla tamiz 20 (850 μm). Posteriormente se procedió a almacenar y clasificar los polvos que se obtuvieron de cada rebanada.



Fig. 2.20 Polvo obtenido

De cada muestra, se obtuvieron 400g. Estos fueron enviados al instituto de ciencias químicas donde se determinaría mediante un proceso de titulación volumétrica la concentración de cloruros de cada muestra.

2.3.2 Atmósfera al 99% de dióxido de carbono.

Para poder medir la constante de penetración de dióxido de carbono en los hormigones, se hizo necesaria la construcción de una cámara hermética de carbonatación; esta a su vez tenía que garantizarnos las condiciones necesarias para lograr la difusión del dióxido de carbono en el hormigón, es decir asegurar que en el ambiente controlado siempre habría 99 % de dióxido de carbono en estado puro y una humedad relativa de entre 50 y 60%.

Se utilizaron las probetas de los siguientes códigos.

- PX – D – C – 1
- PX – D – C – 2
- PX – D – N – 1
- 2X – D – C – 1
- 2X – D – C – 2
- 2X – D – N – 1

Diseño de la cámara de carbonatación.

En el diseño de la cámara de carbonatación se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones previas:

- No habría carbonatación en el hormigón si las condiciones atmosféricas no eran las adecuadas, pues se debía entonces garantizar que la humedad relativa del sistema esté siempre entre 50 y 60%.

La solución fue básicamente colocar una solución de nitrato de magnesio hexahidratado (anexo hoja de seguridad).

La presencia de esta solución nos asegura que en el ambiente interno de la cámara habrá una humedad relativa propicia para dar paso a la carbonatación.

- El 99% del ambiente debía ser CO_2 en estado puro y ligeramente presurizado para generar la difusión del dióxido de carbono. Por lo cual la cámara debía estar herméticamente sellada. Para este efecto se utilizó silicón.



Fig. 2.21 Diseño inicial de cámaras de carbonatación

Inicialmente la cámara de carbonatación estaba constituida por cuatro tinajas de polipropileno en las que estaban inmersas las probetas. La distribución del dióxido de carbono a las tinajas se la realizó mediante un sistema diseñado para el efecto (figura).

El sistema de carbonatación estaba constituido de la siguiente manera:

- Un tanque de 20kg. Con dióxido de carbono en estado puro, el cual tuvo la función de alimentar constantemente con dióxido de carbono al sistema (anexo hoja de seguridad).

- Un regulador de flujo acoplado a la salida del tanque, que nos permitió ajustar el flujo del gas conforme a nuestras necesidades.
- Un regulador de presión que garantizaba que la presión interna en el ambiente se mantendría constante. La cámara debía estar ligeramente presurizada para ayudar al proceso de difusión.
- Se construyó un pequeño manifold para asegurar una distribución uniforme del fluido en el interior de la cámara. Está constituido por un tubo de distribución principal con cuatro terminales, en las cuales se conectó manguera neumática (10 bares de resistencia) que finalmente con accesorios neumáticos se acoplaban en las tinas.
- Una solución de 500ml de nitrato de magnesio hexahidratado distribuidas en dos vasos e precipitación, para mantener el porcentaje de la humedad relativa.

En el primer diseño de la cámara de carbonatación surgieron inconvenientes en cuanto a la hermeticidad del sistema, esto

implicaba un consumo elevado de dióxido de carbono para alimentar a la cámara. Pues al presurizar la cámara ligeramente se expandían las tinas plásticas, dando lugar a la deformación del sello y consecuentemente fugas en el sistema.

Se optó por cambiar a una sola cámara de un material liviano y que a su vez pueda resistir sin deformarse ante la presión interna de la cámara.

La nueva cámara estuvo constituida básicamente por el mismo sistema de distribución, pero en cambio se utilizó una tina de plumafón, que gracias a su diseño y tamaño permitió un fácil sellado y se disminuyeron las fugas.



Fig. 2.22 Diseño Final de cámaras de carbonatación

Por un periodo de 4 meses se mantuvo el sistema en constante observación para asegurar que las condiciones sean las propicias para lograr una satisfactoria carbonatación en las muestras.

Después de este lapso de tiempo, se retiraron las probetas del medio y se tomó el siguiente procedimiento para medir la penetración del dióxido de carbono en los hormigones e prueba.

- Se retiraron por cada tipo de hormigón 2 muestras expuestas al ambiente de 99% de dióxido de carbono y una muestra de cada tipo de hormigón expuesto al ambiente natural de Guayaquil.



Fig. 2.23 Probetas retiradas de cámara de carbonatación

- Se cortaron longitudinalmente las probetas. De modo que sea posible medir la presencia de dióxido de carbono en dirección radial.



Fig. 2.24 Corte longitudinal de las probetas carbonatadas

- La presencia de dióxido de carbono pudo hacerse visible en las muestras rociando de manera uniforme indicador de fenolftaleína, el cual cambiaba de coloración en las zonas no carbonatadas y se mantenía el color natural del cemento en las zonas donde el valor de PH del hormigón había disminuido.



Fig. 2.25 Elementos utilizados para instrumentación de carbonatación

- Con un calibrador se midió cuidadosamente la zona que no cambió de coloración al rociar en indicador en la muestra.



Fig. 2.26 Lectura de la medida del frente carbonatado

2.3.3 Ambiente local en Guayaquil.

Se colocaron probetas de cada tipo de hormigón en un lugar donde estuvieron expuestas al ambiente en condiciones normales en la ciudad de Guayaquil, esto permitió obtener datos reales del verdadero comportamiento de los hormigones en nuestro medio. Después de 5 meses de exposición las probetas se retiraron y se procedió a medir la penetración de dióxido de carbono, para poder contrastarlos en las probetas que estuvieron expuestas durante el mismo lapso de tiempo en un ambiente de 99% de dióxido de carbono.

Se colocaron 2 probetas con las siguientes codificaciones:

- PX – D – N – 1
- 2X – D – N – 2



Fig. 2.27 Probetas expuestas al ambiente natural

2.4 Determinación del coeficiente de difusión de iones cloruro.

Cuando los polvos que se obtuvieron de las probetas estuvieron listas, se procedió al análisis químico para determinar la concentración de cloruros, en concordancia con la norma ASTM C1152.

Básicamente esta norma establece que, mediante el método de titulación volumétrica y con la reacción del concreto con un reactivo especial, nitrato de plata, a través de un proceso detallado, se puede calcular el porcentaje de cloruros por masa de concreto, con una precisión de 0.001%.

Se experimentó con dos probetas de las mismas características para cada tipo de hormigón y para nuestro análisis tomamos la media de los valores obtenidos. Los resultados se muestran a continuación.

T de exposición [mes]		5
Hormigón Puzolánico	Profundidad [mm]	Conc. Cl -
	20	0,395
	40	0,255
	60	0,19
	Co	0,145
Hormigón Portland	20	0,435
	40	0,175
	60	0,145
	Co	0,13

Tabla 2.7 Datos de difusión de cloruros

Una vez obtenidas las concentraciones de cloruro a varias profundidades en el hormigón, se procedió a calcular el coeficiente de difusión a través de la resolución del modelo matemático de la segunda ley de Fick. Esto fue posible bajo un programa informático desarrollado para el efecto (ver anexo) y que funciona bajo en el entorno del Software “Mathcad”.

Este software también nos muestra el perfil de concentración experimental de cloruros obtenido mediante las pruebas realizadas con las probetas y el perfil de concentraciones modelado con la segunda ley de difusión de Fick.

Desarrollando la ecuación de difusión llegamos a la siguiente expresión (ec 2.1)

$$F(x, D, c_s, \Delta) := \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} \left[c_s - (c_s - c_0) \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \cdot \sqrt{(D \cdot t)}} \right] \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta} dx \quad (\text{ec.2.1})$$

Donde:

X: Profundidad a la que se hace el análisis [cm.]

D: Coeficiente de difusión.

C_s: Concentración superficial de cloruros.

C_o: Concentración inicial de cloruros.

t: Tiempo [seg.]

Δ: Variación de la profundidad en consideración [cm]

Mediante el software se obtuvieron los coeficientes de difusión y se muestran a continuación.

Coeficiente de difusión de cloruros	
	D [cm²/seg]
Hormigón Puzolánico	7,09E-07
Hormigón Portland	5,50E-07

Tabla 2.8 Coeficientes de difusión de cloruros

2.5 Determinación de la constante de penetración de dióxido de carbono respecto al tiempo.

Los datos obtenidos después de la medición de los perfiles carbonatados se muestran en la siguiente tabla:

T de exposición [mes]	4
T de exposición [seg.]	10368000

FECHA INICIO	17/08/2009
FECHA FIN	17/12/2009

Probeta:	Prof. avance CO2 [mm.]	Media
2X - D - C - 1	7,5	7,15
2X - D - C - 2	6,8	
2X - D - N - 1	2,5	2,5

PX - D - C - 1	6,2	5,9
PX - D - C - 2	5,6	
PX - D - N - 1	2	2

Tabla. 2.9 Datos de carbonatación.

Aplicando la formula establecida para el avance de la carbonatación:

$$X = K * (t)^{1/2} \quad (\text{ec. 1.2})$$

Donde:

X: Espesor de la capa carbonatada [mm]

K: Constante de avance de carbonatación. [mm/seg.]

t: tiempo de exposición al medio. [seg.]

Despejando la constante **K** de la fórmula obtenemos una nueva ecuación (ec. 2.2)

$$K = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (\text{ec. 2.2})$$

Los datos de la constante K obtenidos experimentalmente son:

Hormigón/tipo	K	
	[mm/seg]	[mm/año]
Puzolánico (CO₂)	5,49E-14	10,28
Puzolánico (ambiente)	1,86E-14	3,48
Portland (CO₂)	6,65E-14	12,46
Portland (ambiente)	2,33E-14	4,36

Tabla. 2.10 Coeficientes de constante de penetración de CO₂

CAPÍTULO 3.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

Una vez que se han detallado los procesos experimentales y los cálculos aplicados se procedió al análisis e interpretación de los resultados. Que luego nos permitirán sacar las conclusiones pertinentes y recomendaciones o mejoras para los futuros ensayos de este tipo.

3.1 Coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón.

Los resultados obtenidos nos muestran los siguientes perfiles de concentración de cloruros, en las gráficas se muestra el perfil de concentración experimental y el perfil de concentración modelado por el software.

Coeficiente de difusión de cloruros	
	D [cm²/seg]
Hormigón Puzolánico	7,09E-07
Hormigón Portland	5,50E-07

Tabla 2.8 Coeficientes de difusión de cloruros

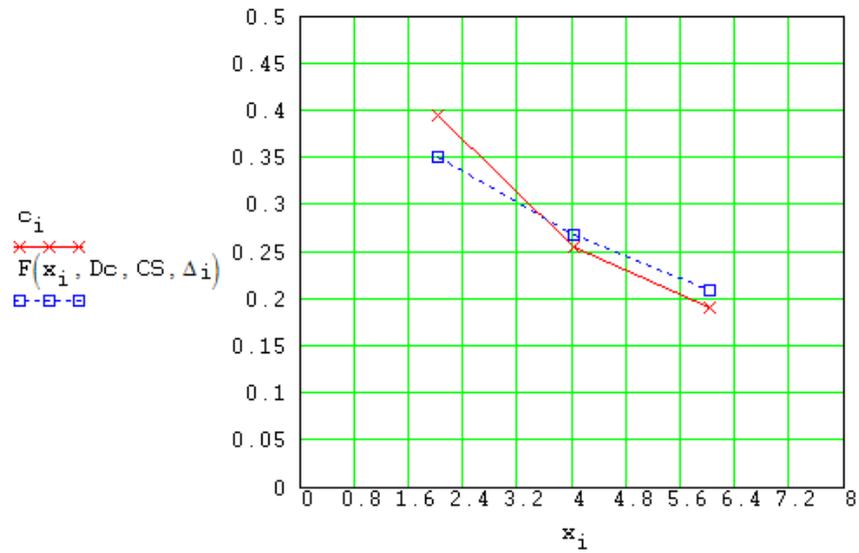


Fig. 3.1 Perfil de concentración experimental y modelado para difusión de cloruros en hormigón Puzolánico.

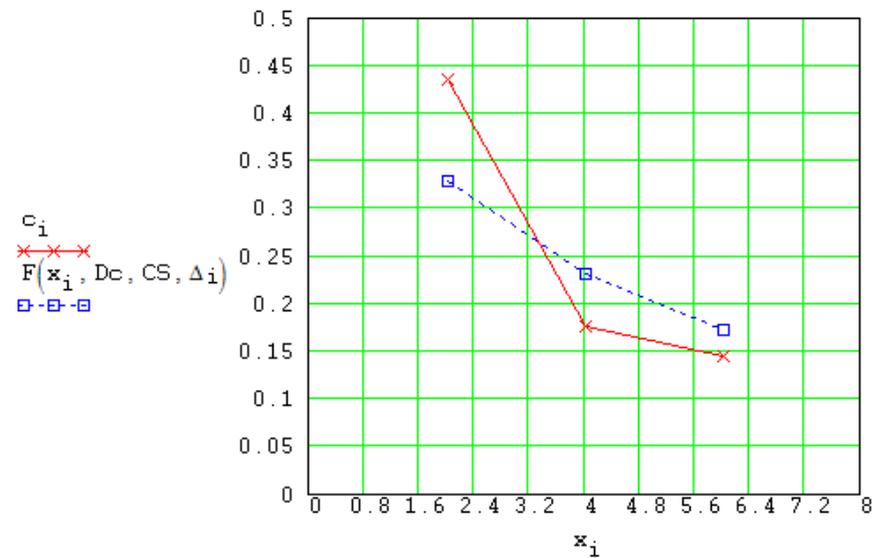


Fig. 3.2 Perfil de concentración experimental y modelado para difusión de cloruros en hormigón Portland.

Gráficamente podemos apreciar que los perfiles de concentración de iones cloruro en las probetas de hormigón difieren experimentalmente. Pero a su vez el perfil establecido por el modelo matemático es muy similar para los dos tipos de hormigones tratados en este proyecto.

Una de las razones, es que el modelo matemático establecido, trata de idealizar los sistemas, lógicamente los resultados experimentales difieren de los teóricos, debido a que siempre intervienen factores externos que pueden alterar al sistema e influir de una u otra manera en los resultados.

Los coeficientes de difusión obtenidos tampoco difieren mucho, lo cual nos da a entender que el comportamiento de los hormigones ante los cloruros es muy similar. Un mayor tiempo de experimentación ayudará a obtener mejores resultados.

3.2 Constante de penetración de dióxido de carbono en el hormigón.

Una vez que se calcularon las constantes de avance de penetración de dióxido de carbono en las muestras de hormigón; pudimos ya observar el comportamiento del sistema a lo largo de los cuatro meses de experimentación con las probetas en el ambiente saturado de dióxido de carbono (99% CO₂) y se compararon con las que se expusieron al ambiente.

Recordemos los valores de la constante k obtenidos:

Hormigón/tipo	K	
	[mm/seg]	[mm/año]
Puzolánico (CO ₂)	5,49E-14	10,28
Puzolánico (ambiente)	1,86E-14	3,48
Portland (CO ₂)	6,65E-14	12,46
Portland (ambiente)	2,33E-14	4,36

Tabla. 2.10 Coeficientes k obtenidos

En las siguientes gráficas, para cada tipo de hormigón se superponen las curvas que representan el perfil de avance de la carbonatación. En cada gráfica se observa el comportamiento de las probetas en el ambiente de extrema carbonatación y las que estuvieron expuestas al ambiente.

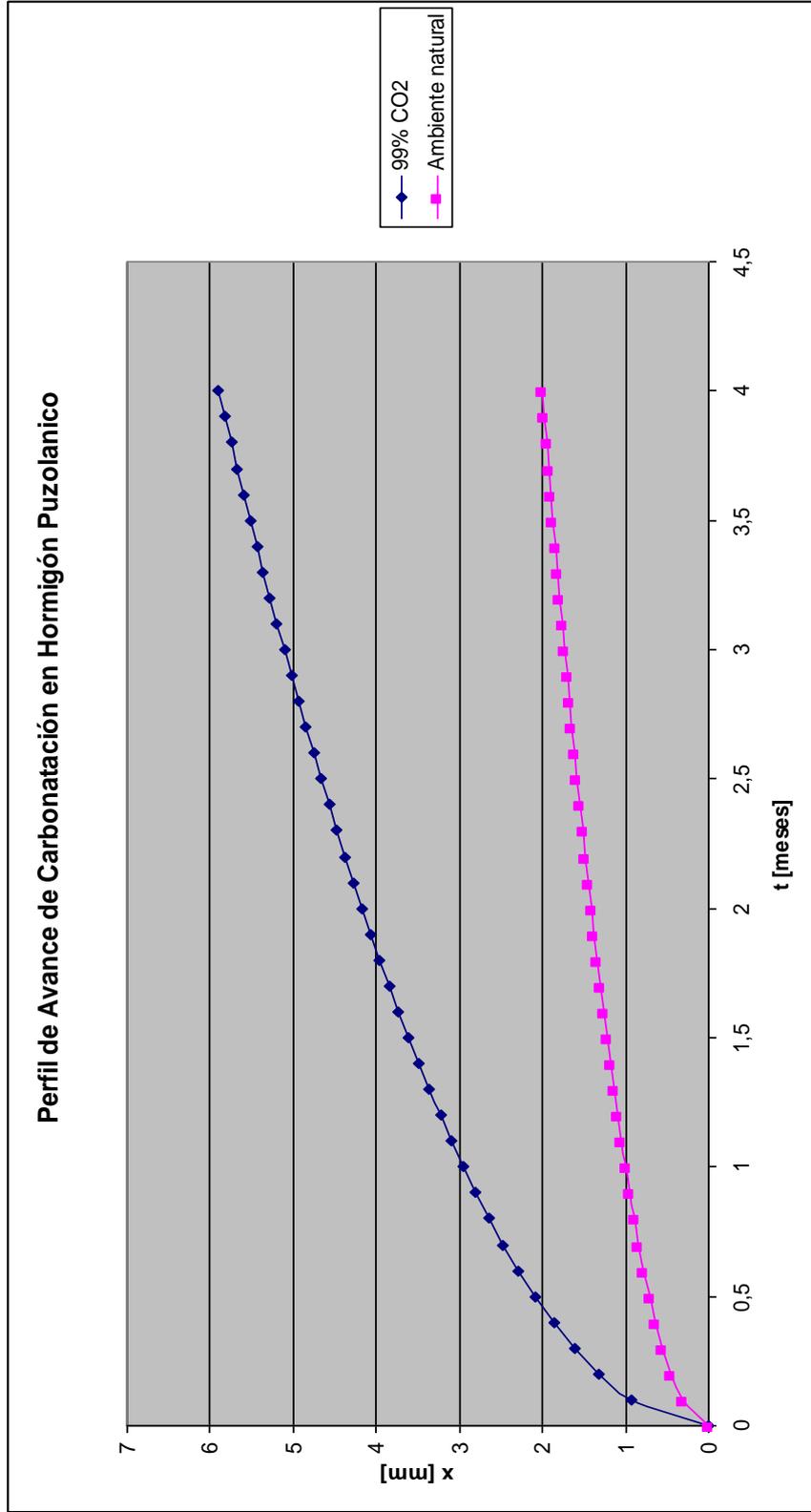


Fig. 3.3 Perfil de Avance de Carbonatación en hormigón Puzolánico

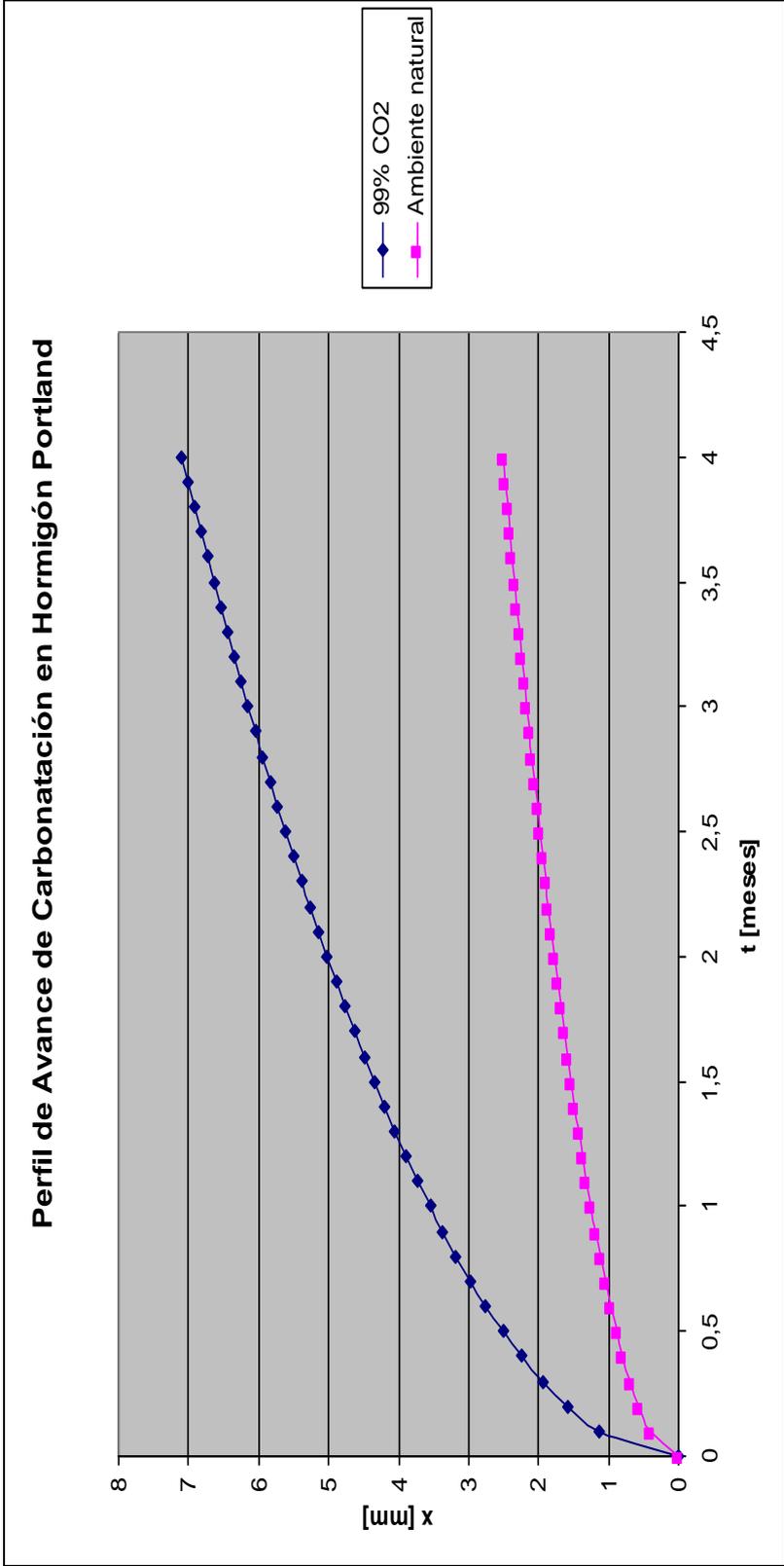


Fig.3.4 Perfil de Avance de Carbonatación en hormigón Portland

Observando los valores de k y las gráficas del perfil de avance podemos constatar que lógicamente es mucho mayor la carbonatación de las muestras en un ambiente totalmente saturado de dióxido de carbono.

También es visible la diferencia entre los valores de los coeficientes que existe entre el hormigón de tipo puzolánico respecto al portland, independientemente del medio al que sea expuesto, los valores obtenidos son menores en el hormigón puzolánico. Esta respuesta es razonable y esperada, pues en el primer capítulo de este trabajo se mencionó la mayor impermeabilidad que tiene el hormigón de cemento puzolánico, lo que genera mayor resistencia a la penetración de fluidos, por lo cual es el recomendado para estructuras que estarán en ambientes marinos de extrema agresividad.

CAPÍTULO 4.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Una vez de haber obtenido los resultados y haberlos analizado respectivamente, es ya posible establecer las conclusiones y establecer recomendaciones a tener en cuenta para futuras experimentaciones de este tipo.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los resultados obtenidos, el hormigón de cemento tipo puzolánico muestra una ligera mayor resistencia a los procesos de difusión en medios que contienen agentes corrosivos.

2. Respecto a la difusión de dióxido de carbono, durante el tiempo de experimentación podemos establecer un valor de penetración medio de entre 4 y 5mm por año. Esto dependerá lógicamente de la calidad del hormigón.
3. La resistencia ante la presencia de cloruro en los hormigones es muy similar, según los perfiles de difusión modelados, independientemente del tipo de concreto que se analice.
4. Estos Resultados pueden variar ligeramente si se realizan las mismas pruebas por un mayor lapso de tiempo, pues los resultados en pruebas con hormigón requieren un análisis a mayor tiempo.

RECOMENDACIONES

1. Es recomendable realizar las mismas pruebas con los mismos tipos de hormigón en las mismas condiciones pero a un tiempo aún mayor utilizado en este trabajo para tener datos mucho más reales.
2. Tener un estricto control de los factores que influyen en los ambientes controlados es de gran significancia. Pues de ellos depende la validez de las pruebas realizadas.

3. Se recomienda evaluar el comportamiento del acero en el interior del concreto después que hayan difundido los cloruros y el dióxido de carbono, una vez que se hayan tomado datos de mayor tiempo de experimentación. Esto para un estudio posterior.

ANEXOS

ANEXO I: Programacación Mathcad para hormigón puzolánico.

ANEXO II: Programacación Mathcad para hormigón portland.

ANEXO III: Hoja de seguridad de dióxido de carbono.

ANEXO IV: Hoja de seguridad de nitrato de magnesio hexahidratado.

BIBLIOGRAFÍA

- 1. Principles and prevention of Corrosion.**
Deny A. Jones 2nd edition
- 2. Handbook of Corrosion Engineering.**
Roberge Pierre R. Mc.Graw– Hill 1999
- 3. Norma ASTM - C1152. Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.**
ASTM Internacional – 2006
- 4. Norma ASTM - C39M. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.**
ASTM International – 2005

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE EFECTIVO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS A PARTIR DE PERFILES DE CONCENTRACIÓN

Identificación de la muestra: **HORMIGÓN TIPO PUZOLÁNICO**

DATA INPUT:

$c := \begin{pmatrix} 0.395 \\ 0.255 \\ 0.19 \end{pmatrix}$ $x := \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{pmatrix}$ $\Delta := \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$ $c =$ Concentración de cloruros
 $x =$ Coordenada (cm)
 $2\Delta =$ Espesor de la muestra (cm)

$t := 0.42$ **Tiempo de exposición (años)**
 $c0 := 0.145$ **Concentración inicial de cloruros**
 $i := 0..2$ **Número de componentes de los vectores c, x, Δ**

Solución de la ecuación de difusión.

$$F(x, D, cs, \Delta) := \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} \left[cs - (cs - c0) \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \cdot \sqrt{|D| \cdot t}} \right] \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta} dx$$

Criterio de convergencia por cuadrados mínimos

$$s(D, cs) := \sum_i (c_i - F(x_i, D, cs, \Delta_i))^2$$

$D := 1$ **Valor tentativo de coeficiente de difusión**

Bloque de resolución

Given

$s(D, cs) = 0$
 $f(cs) := \operatorname{MinErr}(D)$

Se crea la función $f(cs)$ que arroja valores de D que satisfacen la condición de mínimos cuadrados.

Iteración a partir de valores de concentración superficial (C_s).

$j := 0..10$
 $cs_j := 0.44 + 0.001 \cdot j$

Se debe ajustar el intervalo de variación de cs para que asuma valores acordes al perfil de concentración experimental.

$f_j := f(cs_j)$

Cambio de variables.

$g_j := s(f_j, cs_j)$

Calculando el error mínimo para cada valor de cs .

$m := \min(g)$

Error mínimo.

$k_j := \operatorname{if}(g_j = m, j, 0)$

Vector con componentes = 0 a excepción del mínimo error, cuyo índice es K .

$ix := |k|$

Coefficiente de difusión (Dc) y concentración superficial (Cs) calculados.

DATA OUTPUT:

Dc := f_{ix}

Coefficiente de difusión

CS := cs_{ix}

Concentración superficial

Err := g_{ix}

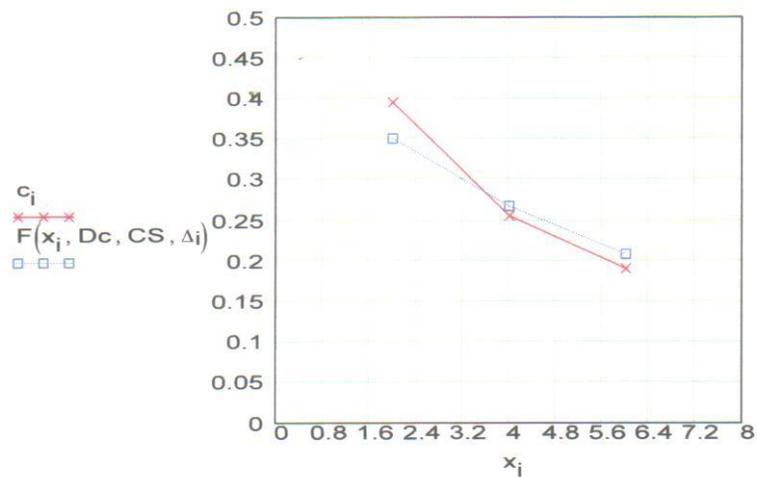
Mínimo error.

a := 3600 · 24 · 365

Def := $\frac{Dc}{a}$

Pasaje de unidades

Perfil de concentración experimental y modelado (Puzolánico)



Valores calculados de Dc y Cs.

Err = 2.446×10^{-3}

ix := 2

Def = 7.996×10^{-7}

CS = 0.45

ATENCIÓN: El índice ix debe ser distinto de 0 o 10. En caso contrario se deberá modificar el intervalo de variación de csj.

Coefficiente efectivo de difusión expresado en cm²/s.

Concentración superficial de cloruros.

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE EFECTIVO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS A PARTIR DE PERFILES DE CONCENTRACIÓN

Identificación de la muestra: HORMIGÓN TIPO PORTLAND

DATA INPUT:

$c := \begin{pmatrix} 0.435 \\ 0.175 \\ 0.145 \end{pmatrix}$ $x := \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{pmatrix}$ $\Delta := \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$ **c = Concentración de cloruros**
x = Coordenada (cm)
2Δ = Espesor de la muestra (cm)

t := 0.42 **Tiempo de exposición (años) (5meses)**
c0 := 0.13 **Concentración inicial de cloruros**
i := 0.. 2 **Número de componentes de los vectores c, x, Δ**

Solución de la ecuación de difusión.

$$F(x, D, cs, \Delta) := \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} \left[cs - (cs - c0) \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \cdot \sqrt{(|D| \cdot t)}} \right] \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta} dx$$

Criterio de convergencia por cuadrados mínimos

$$s(D, cs) := \sum_i (c_i - F(x_i, D, cs, \Delta_i))^2$$

D := 1 **Valor tentativo de coeficiente de difusión**

Bloque de resolución

Given **Se crea la función f(cs) que arroja valores de D que satisfacen la condición de mínimos cuadrados.**
s(D, cs) = 0
f(cs) := MinErr(D)

Iteración a partir de valores de concentración superficial (Cs).

j := 0.. 10 **Se debe ajustar el intervalo de variación de cs para que asuma valores acordes al perfil de concentración experimental.**
cs_j := 0.44 + 0.001 · j
f_j := f(cs_j) **Cambio de variables.**
g_j := s(f_j, cs_j) **Calculando el error mínimo para cada valor de cs.**
m := min(g) **Error mínimo.**
k_j := if(g_j = m, j, 0) **Vector con componentes = 0 a excepción del mínimo error, cuyo índice es K.**

$ix := |k|$

Coefficiente de difusión (Dc) y concentración superficial (Cs) calculados.

DATA OUTPUT:

$Dc := f_{ix}$

$CS := cs_{ix}$

$Err := g_{ix}$

$a := 3600 \cdot 24 \cdot 365$

$Def := \frac{Dc}{a}$

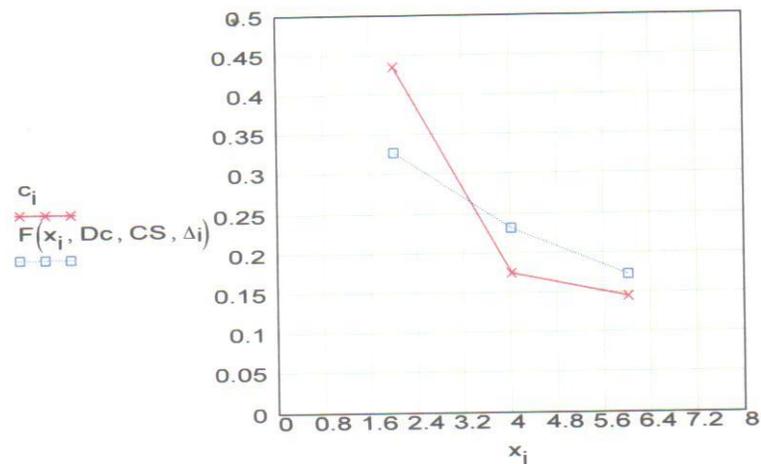
Coefficiente de difusión

Concentración superficial

Mínimo error.

Pasaje de unidades

Perfil de concentración experimental y modelado (portland)



Valores calculados de Dc y Cs.

$Err = 0.016$

$ix := 2$

$Def = 5.505 \times 10^{-7}$

$CS = 0.45$

ATENCIÓN: El índice ix debe ser distinto de 0 o 10. En caso contrario se deberá modificar el intervalo de variación de csj.

Coefficiente efectivo de difusión expresado en cm^2/s .

Concentración superficial de cloruros.

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL (MSDS)

DIÓXIDO DE CARBONO COMPRIMIDO

Nota : Las especificaciones contenidas en esta hoja de seguridad aplican también para el dióxido de carbono anaeróbico y el dióxido de carbono seco.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del producto : Dióxido de carbono

Familia química : Ácido anhídrido

Nombre químico : Dióxido de carbono

Fórmula : CO₂

Sinónimos : Anhídrido carbónico, gas ácido carbónico, carbono anhídrido, bióxido de carbono.

Usos : Como inertizante en la conserva de alimentos; industria de la bebida, como carbonatante; soldadura por proceso MIG como gas protector; extintores de incendio; materia prima para procesos químicos; propelente en aerosoles, como presurizante.

Fabricante :

AGA S.A.

Quito: Av. Pedro Vicente Maldonado 10499

Tel.: 1 800 242 427; 02 2673 011; 04 2101 060 las 24 horas los 365 días del año.

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Dióxido de carbono	99.8-99.996%	124-38-9	TLV : 5000 ppm (ACGIH)

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Resumen de emergencia

Gas ligeramente tóxico, inoloro e incoloro con sabor suavemente ácido. El peligro primordial a la salud asociado con escapes de este gas es asfixia por desplazamiento del oxígeno. Este gas no se quema y no alimenta la llama. El gas carbónico es 1.5 veces más pesado que el aire. Es un gas condensable. Debido a su baja presión de vapor a temperatura ambiente, este es acondicionado en los cilindros de forma líquida en equilibrio con una fase gaseosa.

Efectos potenciales para la salud

Inhalación : Asfixiante y un poderoso vasodilatador cerebral. Si la concentración de dióxido de carbono alcanza el 10% o mas, causa sofocación en minutos. A concentraciones más bajas dióxido de carbono puede causar náusea, mareo, sudor, dolor de cabeza, confusión mental, aumento de la presión sanguínea, respiración agitada, palpitaciones al corazón, respiración dificultosa, disturbios visuales y temblores. Las concentraciones altas resultan en narcosis y muerte.

Carcinogenicidad : El dióxido de carbono no está listado por la NTP, OSHA, o IARC

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Remueva la victima al aire fresco, lo más pronto posible. Solo personal

profesionalmente entrenado debe suministrar ayuda médica como la resucitación cardiopulmonar y/o oxígeno suplemental, si es necesario.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Punto de inflamación : No aplica.

Temperatura de auto ignición : No aplica.

Limites de Inflamabilidad :

Inferior (LEL): No aplica. **Superior (UEL):** No aplica.

Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.

Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: No aplica.

Riesgo general

Gas no inflamable. Cuando los cilindros se exponen a intenso calor o llamas, se pueden romper violentamente.

Medios de extinción

Dióxido de Carbono es comúnmente usado como un agente extinguidor de fuegos clase B y clase C.

Instrucciones para combatir incendios

Evacuar al personal de la zona de peligro. Si es posible y no hay riesgo, remover los cilindros de dióxido de carbono del incendio o enfriarlos con agua. No rociar agua directamente en el orificio del cilindro. Aparatos autónomos de respiración pueden ser requeridos para el personal de rescate.

Si un camión que transporta cilindros está involucrado en un incendio, AISLE un área de 800 metros (1/2 milla) a la redonda.

Equipo contra incendios

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo con un aparato de respiración autosuficiente y protección personal completa, a prueba de fuego.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL

En caso de escape evacuar a todo el personal de la zona afectada (hacia un lugar contrario a la dirección del viento). Aísle un área de 25 a 50 metros a la redonda. Localizar y sellar la fuente de escape del gas. Dejar que el gas se disipe. Monitorear el área para determinar los niveles de oxígeno. La atmósfera debe tener un mínimo de 19.5% de oxígeno antes de permitir el acceso de personal y si esta por debajo del limite de exposición ingresar al área con aparatos de respiración autosuficiente. Eliminar posibles fuentes de ignición. Ventilar el área o mover el cilindro con fuga a un área ventilada. Escapes sin control deben ser respondidos por personal profesionalmente entrenado usando un procedimiento establecido previamente.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes de uso: Mueva los cilindros utilizando carro portacilindros o montacargas. No los haga rodar, ni los arrastre en posición horizontal. Evite que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro, o contra otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados, como por ejemplo el baúl de un carro, camioneta o van. Para descargarlos del camión use rodillo de caucho.

Durante su uso: No use adaptadores, herramientas que generen chispas, ni caliente el cilindro para aumentar el grado de descarga del producto. Use válvula de contención o de retroceso de llama para prevenir contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión, al

conectar el cilindro a tuberías o sistemas de presión baja (<200 bar - 3000 psig). Jamás descargue el contenido del cilindro hacia ninguna persona, equipo, fuente de ignición, material incompatible, o a la atmósfera. No use aceites o grasas en los ajustadores o en el equipo de manejo de gas. Inspeccione el sistema para escapes usando agua y jabón. No intente encajar objetos como alicates, destornilladores, palancas, etc, en la válvula, ya que puede dañarla, causando un escape. Si el usuario experimenta alguna dificultad en el funcionamiento de la válvula del cilindro discontinuar el uso y llamar al fabricante. No ponga el cilindro como parte de un circuito eléctrico.

Después de uso: Cierre la válvula principal del cilindro. Cierre firmemente las válvulas. Marque los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula. No deben ser reutilizados cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego. En estos casos notifique al proveedor, para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de los cilindros

Almacene los cilindros en posición vertical . Separe los cilindros vacíos de los llenos. Para esto use el sistema de inventario que "el primero en llegar, primero en salir", para prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo periodo. Use solo envases y equipo (tubería, válvulas, conectores, etc.) diseñado para almacenar dióxido de carbono. Los cilindros pueden ser almacenados al descubierto, pero en tal caso, deben ser protegidos contra la intemperie y humedad para prevenir moho.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada, con el fin de evitar el paso de personal no autorizado, que puedan manipular de forma incorrecta el producto. Almacene lejos de áreas con mucho tráfico; de salidas de emergencia; áreas de procesamiento y producción; alejado de ascensores, salidas de edificio, cuartos, y de pasillos principales que lleven a salidas. El área debe ser protegida, con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos, como corte o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permita que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54 °C (130 °F), ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalice el área con letreros que indiquen "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO" , "NO FUMAR". y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Proporcionar ventilación natural o mecánica, para asegurarse de prevenir atmósferas deficientes en oxígeno abajo del 19.5%. Los niveles de dióxido de carbono deben ser monitoreados para asegurarse que el nivel se mantenga por debajo del TLV.

Protección respiratoria

Usar equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire, de presión directa si el nivel de oxígeno está por debajo del 19.5%. Los purificadores de aire no proveen

suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que estos estén libres de aceite y grasa; gafas ajustables de seguridad y botas con puntera de acero.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad de gas a 21.1°C (70°F), 1 atm: 1.833 kg/m³ (0.1144 lbs/ pies³)
Punto de congelación / fusión a 1 atm: (Temperatura de sublimación) -78.5°C (-109.3°F)
pH: 3.7 a 1atm (forma ácido carbónico)
Peso específico (aire = 1) a 21.1°C (70°F): 1.522
Peso molecular: 44.01
Solubilidad en agua vol/vol a 20°C (68°F) y 1 atm: 0.90
Grado de expansión: No aplica.
Olor umbral: No aplica.
Volumen específico del gas (ft³/lb) : 8.76
Presión de vapor a 21.1°C (70°F): 838 psig (5778 kPa)
Coefficiente de distribución agua / aceite: No aplica.
Apariencia y color: Dióxido de Carbono es un gas incoloro que no tiene olor. Como este gas es ligeramente ácido, algunos individuos pueden notar un leve olor y sabor punzante.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El dióxido de carbono es un gas estable.

Incompatibilidad

Dióxido de carbono arde y explota cuando se calienta con aluminio en polvo, berilio, mezclas de cerio, cromo, mezclas de magnesio-aluminio, manganeso, torio, titanio y zirconio. En la presencia de humedad, dióxido de carbono se enciende con cesio óxido. Acetiluros metálicos también arden y explotan en contacto con dióxido de carbono. Dióxido de carbono reacciona con materiales alcalinos para formar carbonatos y bicarbonatos.

Condiciones a evitar

Evite exponer cilindros a temperaturas altas o llamas directas porque pueden romperse o estallar.

Reactividad

- a) Productos de descomposición : El dióxido de carbono producirá monóxido de carbono y oxígeno cuando se expone a temperaturas más altas de 1648°C (3000°F).
- b) Polimerización peligrosa : Ninguna

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Datos de toxicidad:

El dióxido de carbono es un gas asfixiante, el cual tiene efectos fisiológicos en humanos a concentraciones altas. También puede causar narcosis. Los siguientes datos toxicológicos están disponibles para dióxido de carbono.

LCLo (inhalación, humano) = 9 pph/5 minutos
 LCLo (inhalación, mamífero) = 90000 ppm/5 minutos
 TCLo (inhalación, rata) = 6 pph/24 horas; efectos reproductivos y teratogenicos.

En humanos se presentan los siguientes síntomas :

Concentración	Síntomas de exposición
1% Dióxido de carbono:	Aumenta ligeramente la respiración.
2% Dióxido de carbono:	El ritmo respiratorio aumenta el 50%. Exposición por largo

	tiempo puede causar dolor de cabeza, cansancio.
3% Dióxido de carbono:	La respiración se aumenta dos veces más del ritmo normal y se vuelve trabajosa. Leves efectos narcóticos. Deteriora el oído, dolor de cabeza, aumenta la presión sanguínea y el ritmo del pulso.
4 - 5% Dióxido de carbono:	La respiración se aumenta cuatro veces más del ritmo normal, se presentan evidentes síntomas de intoxicación y se puede sentir una ligera sensación de ahogo.
5-10% Dióxido de carbono:	Notable y fuerte olor característico, respiración muy trabajosa, dolor de cabeza, disturbio visual y zumbido en los oídos. Afecta el sentido común, seguido en pocos minutos con la pérdida del conocimiento.
50-100% Dióxido de carbono:	Arriba del nivel de 10%, pérdida del conocimiento ocurre rápidamente. Exposición a altas concentraciones por largo tiempo, resultará en muerte por asfixia.
Capacidad irritante del material: Producto no irritante	
Sensitización a materiales: El producto no causa sensitización en humanos	
Efectos al sistema reproductivo	
Habilidad mutable: No aplicable	
Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para dióxido de carbono.	
Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para dióxido de carbono.	
Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para dióxido de carbono en Estudios clínicos en animales pruebas expuestos a concentraciones altas de dióxido de carbono indican efectos teratogénico.	
Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para dióxido de carbono en humanos. Estudios clínicos en animales pruebas expuesto a altas concentraciones de dióxido de carbono indican efectos reproductivos.	

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas incoloro de olor penetrante y sabor ácido. Es un componente minoritario de la atmósfera (aproximadamente 3 partes por 10.000). Proviene de la combustión de hidrocarburos, de la fermentación y de la respiración animal.

El dióxido de carbono no puede considerarse como contaminante en sentido estricto, ya que no es tóxico, y se halla en atmósferas puras de modo natural y es imprescindible para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que posibilita la existencia de la fotosíntesis de las plantas y el clima actual. No obstante, se incluye dentro de las sustancias contaminantes ya que, impide que una parte de la energía radiante que recibe la Tierra vuelva al espacio, produciendo el llamado efecto invernadero. En la actualidad su concentración ha llegado a 359 ppmv (partes por millón volumen), producto de quema de combustibles fósiles, cambios en uso de suelos (principalmente deforestación), quema de biomasa, manufactura de cemento. El aumento de dióxido de carbono en la atmósfera es el responsable del calentamiento global en la baja atmósfera. Este calentamiento produce aridez en la tierra afectando a las actividades agropecuarias y según los investigadores en un futuro no muy lejano se fundirán las enormes masas de hielo de los polos, provocando una elevación de los niveles del mar, peligrando seriamente la posibilidad de vida en las costas.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Regrese los cilindros vacíos al fabricante, para que este se encargue de su disposición final de

acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Número de Naciones Unidas : UN 1013

Clase de peligro D.O.T : 2.2

Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS NO INFLAMABLE NO TOXICO

Contaminante marino : El producto no está identificado como un contaminante marino por el D.O.T



Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura, en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y deben ser descartados.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos se deben tener en cuenta los requerimientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2-266:2000.

La identificación de cilindros que contienen gases industriales, se encuentra reseñada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 0441:84.

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos :

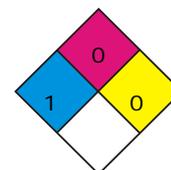
Código NFPA

Salud : 1 "Ligeramente peligroso"

Inflamabilidad : 0 "No arde"

Reactividad : 0 "Estable"

Salida de válvula : CGA 320



Recomendaciones de material : Se puede usar la mayoría de los materiales más comunes.

Esta hoja de seguridad es propiedad exclusiva de AGA S.A.
Prohibida su reproducción total o parcial, con fines comerciales
por parte de personas ajenas a esta compañía.

MAGNESIO NITRATO 6-HIDRATO**DESCRIPCIÓN**

Sinónimos	:	Magnesio Nitrato Hexahidratado - Nitrato de Magnesio Hexahidratado - Magnesio II Nitrato Hexahidratado - Acido Nítrico, Sal de Magnesio Hexahidratado - Magnesio Dinitrato Hexahidratado - Nitromagnesita.
Formula Química	:	Mg(NO ₃) ₂ x 6H ₂ O
Concentración	:	98.0 - 102.0%
Peso molecular	:	256.41
Grupo Químico	:	Compuesto Inorgánico de Magnesio - Sal de Magnesio Inorgánica.
Número CAS	:	13446-18-9 (Magnesio Nitrato 6-Hidrato). 10377-60-3 (Magnesio Nitrato Anhidro).
Número NU	:	1474 (Magnesio Nitrato).
Código Winkler	:	MA-0965

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Estado Físico	:	Sólido.
Apariencia	:	Cristales blancos.
Olor	:	Sin olor.
pH	:	5.0 - 7.0 (solución acuosa al 5% a 25°C).
Temperatura de Ebullición	:	129°C (se descompone).
Temperatura de Fusión	:	95°C
Densidad (Agua1)	:	1.464 kg/L a 20°C
Presión de Vapor	:	No reportado.
Densidad de Vapor (Aire1)	:	6.0
Solubilidad	:	Muy buena solubilidad en Agua (120 g por 100 ml de Agua a 20°C).

IDENTIFICACION DE RIESGOS

Riesgo Principal	:	Oxidante
-------------------------	---	----------

Riesgos Secundarios	:	Irritante y Nocivo					
Código Winkler	:						Clasificación de riesgos 0 = No especial 1 = Ligero 2 = Moderado 3 = Severo 4 = Extremo
Rótulo de Transporte:	:						
Clase	:	5					Norma NFPA
Grupo	:	III					
Division	:	5.1					2 - 0 - 1 - OXI

RIESGOS PARA LA SALUD

EFFECTOS DE SOBREEXPOSICION	
Inhalación	: Irritaciones, inflamaciones y posibles quemaduras en el tracto respiratorio. Tos y dificultad respiratoria. Edema a la laringe y bronquitis. Cianosis. Edema pulmonar.
Contacto con La Piel	: Irritaciones y posibles quemaduras.
Contacto con los Ojos	: Irritaciones y posibles quemaduras a la cornea. Posible daño permanente a los ojos.
Ingestión	: Nocivo. Dolor abdominal, vómitos y vértigo. Debilidad. Cianosis. Posibles convulsiones y colapso. DL50 (oral - rata): 5440 mg/kg.
Otros Efectos	
Cancerígeno	: No hay evidencias.
Mutageno	: No hay evidencias.
Teratogeno	: No hay evidencias.
Otros Efectos	: Depresión y dolores de cabeza.

RIESGO DE INCENDIO

Condición de Inflamabilidad	:	No combustible.
Temperatura de Inflamación	:	No aplicable.
Temperatura de Autoignición	:	No aplicable.
Limites de Inflamabilidad	:	No aplicable.
Productos de Combustión	:	Oxidos de Nitrógeno y Oxido de Magnesio.

Medios de Extinción	:	En general, uso de agentes de extinción de Espuma Química, Dióxido de Carbono y/o Polvo Químico Seco, de acuerdo a características del fuego circundante. Aplicación de Agua en forma de neblina.
----------------------------	---	--

RIESGO DE REACTIVIDAD

Estabilidad Química	:	Estable sólo en condiciones normales.
Incompatibilidades	:	Material Orgánico, como el papel y la madera (riesgo de incendio). Sustancias Inflamables y Combustibles (se incrementa riesgo de incendio). Agentes Reductores fuertes. Aluminio en polvo más Agua (riesgo de explosión). Alquil Esteres (riesgo de explosión). Acidos fuertes. Cianuros, Tiocianatos, Isotiocianatos e Hipofosfitos. Dimetil Formamida.
Peligro de Polimerización	:	No ocurre.
Productos Peligrosos en Descomposición	:	Oxidos de Nitrógeno y Oxido de Magnesio.
Condiciones a Evitar	:	Altas temperaturas (se descompone). Fricción y golpes.

CONTROL DE EXPOSICION

Medidas de Control	:	Trabajar en un lugar con buena ventilación. Utilizar cabinas o campanas de laboratorio con extracción forzada. Aplicar procedimientos de trabajo seguro. Capacitar respecto a los riesgos químicos y su prevención. Contar con ficha de seguridad química del producto y conocer su contenido. Mantener los envases con sus respectivas etiquetas. Respetar prohibiciones de no fumar, comer y beber bebidas en el lugar de trabajo. Utilizar elementos de protección personal asignados.
Límite Permissible Ponderado	:	8 mg/m3 (para Magnesio Nitrato 6-Hidrato como Polvos no Clasificados Decreto N°594, Ministerio de Salud)
Límite Permissible Absoluto	:	40 mg/m3 (para Magnesio Nitrato 6-Hidrato como Polvos no Clasificados Decreto N°594, Ministerio de Salud)
Limite Permissible temporal	:	No regulado.
Otros limites	:	No reportados.

EQUIPOS DE PROTECCION PERSONAL

Ropa de Trabajo	:	Uso de indumentaria de trabajo resistente al producto químico.
Protección Respiratoria	:	Aplicación de protección respiratoria sólo en caso de sobrepasarse alguno de los límites permisibles correspondientes. Debe ser específica para partículas sólidas. En caso de presencia de altas concentraciones ambientales, existencia de cantidades desconocidas o situaciones de emergencias, se deben utilizar equipos de respiración autónomos o de suministro de aire, ambos de presión positiva.
Guantes de Protección	:	Usar guantes de Neopreno y/o PVC.

Lentes Protectores	:	Se deben usar lentes de seguridad resistentes contra proyecciones de la sustancia química.
Calzado de seguridad	:	Utilizar calzado cerrado, no absorbente, con resistencia química y de planta baja.

MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

EN CASO DE:

Inhalación	:	Trasladar a la persona donde exista aire fresco. En caso de paro respiratorio, emplear método de reanimación cardiopulmonar. Si respira dificultosamente se debe suministrar Oxígeno. Conseguir asistencia médica de inmediato.
Contacto con la piel	:	Lavar con Agua, a lo menos por 10 minutos. Usar de preferencia una ducha de emergencia. Sacarse la ropa contaminada y luego lavarla. De mantenerse la lesión, recurrir a una asistencia médica.
Contacto con los Ojos	:	Lavarse con abundante Agua en un lavadero de ojos, entre 10 y 15 minutos como mínimo, separando los párpados. De continuar el daño, enviar a un centro de atención médica.
Ingestión	:	Lavar la boca con bastante Agua. Dar a beber abundante Agua. No inducir al vómito. Derivar a un servicio médico de inmediato.

Nota:

Si la lesión sufrida por una persona tiene relación laboral y está cubierta por la Ley N°16744 de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales, podrá ser atendida según proceda, por el Servicio Médico asociado a la Asociación Chilena de Seguridad, Mutual de Seguridad C.CH., Instituto de Seguridad del Trabajo, Instituto de Normalización Previsional o por la Administración Delegada correspondiente.

ALMACENAMIENTO

Area de Almacenamiento	:	Zona de almacenaje de reactivos y soluciones químicas con riesgo de reactividad y oxidación. Almacenamiento en bodegas y/o cabinas, de características incombustibles diseñadas para contener productos reactivos y oxidantes. Lugar fresco a frío, seco y con buena ventilación. Proteger de la luz solar directa. Acceso controlado y señalización del riesgo.
Código de almacenaje Winkler	:	Amarillo
Precauciones Especiales	:	Mantener separado de condiciones y sustancias incompatibles. Proteger contra el daño físico. Tener los envases cerrados y debidamente etiquetados.

MEDIDAS PARA EL CONTROL DE DERRAMES O FUGAS

PROCEDIMIENTO

Contener el derrame o fuga.
Ventilar y aislar el área crítica.
Utilizar elementos de protección personal - Nivel de protección B o C.
Recoger el producto a través de una alternativa segura.
Disponer el producto recogido como residuo químico.
Lavar la zona contaminada con Agua.
Solicitar ayuda especializada si es necesaria.
Aplicar Guía de Respuesta a Emergencia Americana (Guía N°140).

DISPOSICION DE RESIDUOS QUIMICOS

En general, los residuos químicos se pueden eliminar a través de las aguas residuales, por el desagüe u otra alternativa segura, una vez que se acondicionen de forma tal de ser inocuos para el medio ambiente.

Posibilidad:

- Mezclar con precaución y en pequeñas cantidades con Sodio Sulfito sólido o Sodio Tiosulfato sólido, después de lo cual y agitando simultáneamente se añade Agua. En caso necesario, la reacción se acelera agregando con cuidado Acido Sulfúrico diluido. La solución resultante se neutraliza, diluye con Agua y se elimina por las aguas residuales o por el desagüe.

Es importante considerar para la eliminación de residuos, que se realice conforme a lo que disponga la autoridad competente respectiva, solicitándose previamente la autorización correspondiente.

INFORMACION REGLAMENTARIA

Decreto N°594 "Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo".
Decreto N°40 "Reglamento sobre Prevención de Riesgos Profesionales".
NCh 382.Of1998 "Sustancias Peligrosas - Terminología y Clasificación General".
NCh 2120/5.Of98 "Sustancias Peligrosas - Parte 5: Clase 5 - Sustancias Comburentes y Peróxidos Orgánicos".
NCh 2190.Of1993 "Sustancias Peligrosas - Marcas para Información de Riesgos".
NCh 1411/IV.Of1978 "Prevención de Riesgos - Parte 4: Identificación de Riesgos de Materiales".
NCh 2245.Of2003 "Sustancias Peligrosas - Hojas de Datos de Seguridad - Requisitos".
NCh 2137.Of1992 "Sustancias Peligrosas - Embalajes y Envases - Terminología".
Decreto N°298 "Transporte de Cargas Peligrosas por Calles y Caminos".
Ley N°19300 "Bases Generales del Medio Ambiente".
Reglamentación SESMA: Página web: www.sesma.cl

Vigente desde 22/01/2007 version N°1

Este documento solo podrá ser impreso, no soportando modificaciones, copia, o edición.