

# TRABAJO FINAL

CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN APLICACIONES  
TECNOLÓGICAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR.

*Diseño de un Ensayo Acelerado para la Determinación del Ataque  
por Acción de los Sulfatos a Estructuras de Hormigón y Alternativa  
propuesta para el Diseño de un Contenedor.*

*Rodrigo Sebastián Malanca*

[malanca@cab.cnea.gov.ar](mailto:malanca@cab.cnea.gov.ar)

**Directora: Lic. Telma Ramallo.**

Diciembre de 2003

Comisión Nacional de Energía Atómica

Universidad Nacional de Cuyo (Instituto Balseiro)  
Universidad Nacional de Buenos Aires (Facultad de Ingeniería)

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN E INTRODUCCIÓN.....	1
1. Conceptos de Durabilidad.....	3
2. Factores que afectan la durabilidad del Hormigón Armado.....	3
3. Breve descripción de los procesos de Hidratación, fraguado y endurecimiento de la pasta cementicia.....	4
4. Factores que afectan la durabilidad del Hormigón .....	9
4.1 Factores propios del Hormigón.....	9
4.2 Factores Externos.....	9
5. Desarrollo del Ensayo Acelerado .....	27
5.1 Requerimientos de desempeño .....	29
5.2 Caracterización de los componentes que intervienen e identificación de los mecanismos de degradación .....	29
6. Descripción del ensayo acelerado propuesto .....	30
7. Propuestas de Diseño .....	36
8. Conclusiones .....	41
9. Bibliografía .....	42

## *Diseño de un Ensayo Acelerado para la Determinación del Ataque por Acción de los Sulfatos a Estructuras de Hormigón y Alternativa propuesta para el Diseño de un Contenedor.*

### **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo postular uno de los ensayos acelerados en el marco de la Norma ASTM E-632-82, para la evaluación de la vida de servicio de estructuras de Hormigón Armado de alto desempeño, que serán utilizados como barreras de ingeniería en repositorios para residuos radiactivos de media actividad.

Los resultados de tal evaluación son requeridos para el análisis probabilístico y determinístico necesario para el licenciamiento del emplazamiento y construcción de este tipo de instalaciones.

Dado que el hormigón es el principal material utilizado en este tipo de repositorios, sus propiedades y particularmente su durabilidad deben ser evaluadas teniendo en cuenta tanto los factores propios del mismo, factores intrínsecos, como también factores extrínsecos.

Dentro de los factores intrínsecos podemos citar su formulación, incluyendo las armaduras, su elaboración, curado y diseño estructural, y como factores extrínsecos, condiciones climáticas y ambientales, características de suelo y de operación en servicio.

Es importante destacar que dentro de los criterios empleados en el diseño conceptual de estos tipos de repositorios, las estructuras que actúan de barrera deberán permanecer sin alterar sus propiedades de aislamiento, durante todo su tiempo de servicio, que comprende cientos de años.

Si bien no es posible garantizar que su desempeño no se verá alterado durante todo el período de vida de servicio, el obtener resultados de ensayos acelerados y a largo plazo, nos permitirá estimar la durabilidad de tales estructuras a través del soporte de modelos matemáticos adecuados.

En el presente trabajo se exponen los pasos a tener en cuenta para el desarrollo de los ensayos de evaluación, estableciendo los parámetros relevantes a ser considerados en los mismos y los resultados obtenidos hasta el presente.

### **Introducción**

De acuerdo al diseño conceptual de un futuro repositorio para la disposición de residuos radiactivos de media actividad, el principal material de construcción a ser empleado será el Hormigón Armado. Con el fin de obtener la información requerida para el análisis probabilístico y determinístico a la hora de solicitar a

la ARN las licencias respectivas para su emplazamiento, diseño y construcción, se hace necesario evaluar el comportamiento y su durabilidad a largo plazo de este tipo de barreras de ingeniería.

Si bien el comportamiento de estos hormigones a través de su vida de servicio, estará ligado a las condiciones particulares del sitio en el cual se emplazará el repositorio, resulta necesario conocer cuáles serán las respuestas de este material a solicitaciones extremas, a fin de determinar cuáles son los factores que más afectan a la integridad del mismo y en que magnitud se producen los efectos indeseados.

Este Proyecto comenzó a desarrollarse en el año 1994, con la planificación de un programa de trabajo que incluía desde el desarrollo de la formulación hasta la evaluación de las propiedades del producto bajo Normas de Calidad. Se diseñaron varias formulaciones de hormigones, considerados por la bibliografía consultada como de alto desempeño, utilizando en las mismas diferentes tipos de materia prima.

A través de un contrato con el Centro de Investigaciones de la Construcción (CECON) del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), los hormigones fueron confeccionados y evaluadas sus propiedades.

Como consecuencia de ello, se seleccionaron dos hormigones como candidatos más promisorios y se planificó una segunda etapa para construir a escala real un contenedor tipo, con el diseño propuesto por la UA Gestión de Residuos Radiactivos.

Esto llevó a realizar, en el año 1999, una segunda contratación con el CECON del INTI, a fin de rediseñar las formulaciones con los materiales que por ese entonces estaban disponibles en el mercado y construir un contenedor prototipo, que permitiera evaluar y optimizar los parámetros de diseño y construcción y estudiar su comportamiento.

Como resultado de dicha contratación se fabricaron en forma sucesiva tres contenedores, mejorándose la tecnología empleada tanto para su moldeo como para su colocación, compactación y curado.

Sobre la base de los resultados ya obtenidos de los estudios realizados con el último contenedor prototipo, correspondientes a las características del hormigón tanto a escala laboratorio como a escala piloto “in situ”, y teniendo en cuenta los estudios sobre corrosión de armaduras, se deberán establecer las definiciones necesarias para el diseño final y construcción de un nuevo prototipo de contenedor para someterlo a los ensayos tendientes a obtener todos los parámetros relacionados con su desempeño y durabilidad, como también establecer los requerimientos mínimos para su aceptación o rechazo.

Si bien el presente trabajo está dirigido a evaluar el comportamiento a largo plazo de una estructura de hormigón, los resultados de los estudios que se lleven a cabo, serán aprovechados también para evaluar la durabilidad de los

hormigones a emplear en la construcción del repositorio para residuos radiactivos de media actividad.

### **1. Conceptos de Durabilidad**

La función principal del hormigón como barrera de ingeniería, para ser empleado en repositorios cercanos a la superficie, es la de aislar los residuos radiactivos de media actividad debidamente acondicionados, por períodos de hasta 300 – 500 años. Esto lleva a pensar que la característica más importante a ser tenida en cuenta es su durabilidad durante todo el tiempo de servicio.

La durabilidad es uno de los factores más importantes a la hora de proyectar estructuras de hormigón armado. La misma se define según el manual Americano de la Construcción como:

*“La capacidad del material para resistir hasta cierto punto los efectos de las condiciones de servicio a que está sujeto tales como la meteorización, la acción química y el desgaste”.*

Desde el punto de vista de los factores tendientes a deteriorar las condiciones iniciales del hormigón a través del tiempo, se pueden considerar las cargas impuestas al operar la estructura, la acción del medio ambiente al que será expuesto y componentes químicos agresivos con los que la estructura estará en contacto durante su fase operativa y de aislamiento.

Todos estos factores también son tenidos en cuenta en la etapa de diseño del proyecto, ya que lo que se busca además, es impedir el daño prematuro.

### **2. Factores que afectan la durabilidad del hormigón armado**

La durabilidad del hormigón está relacionada con su resistencia a las acciones corrosivas de los agentes atmosféricos, ataques químicos, abrasión y otros procesos de degradación.

En la práctica, varios mecanismos de degradación pueden actuar simultáneamente con posibles efectos sinérgicos, que afectarán la vida de servicio de las barreras. Estos dependerán tanto de factores propios de la fabricación del hormigón como de factores externos al mismo. Dentro de estos últimos se encuentran los provenientes de efectos atmosféricos y del suelo y los provocados por acciones agresivas de los residuos radiactivos involucrados.

Estos factores se han agrupado de la siguiente manera:

#### *Factores propios del hormigón*

- Tipo de cemento, adiciones.
- Tipo de agregados, reacción álcali-agregado
- Formulación empleada y uso de aditivos

- Barras de refuerzo
- Diseño de construcción, dimensiones de recubrimiento de armaduras.
- Elaboración, colocación, compactación y terminación
- Curado

#### *Factores externos*

- Erosión.
- Especies químicas agresivas
- Ciclos de congelamiento y deshielo

#### *Factores de Uso y Operación*

- Radiación
- Cargas mecánicas
- Especies microbianas

### **3. Breve descripción de los procesos de hidratación, fraguado y endurecimiento de la pasta cementicia**

Para una mayor comprensión, es conveniente hacer una breve introducción a los mecanismos de hidratación del cemento para luego entender cómo influyen cada uno de los factores intervinientes.

Como es sabido, los productos calcinados provenientes del clinker de un cemento Pórtland común, no constituyen una fase simple, sino que consisten en cuatro fases o componentes principales. Los mismos son: Silicato tricálcico, Silicato dicálcico, Aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. A estas fases se agregan otros componentes en menor cuantía como material calcáreo que no ha reaccionado durante el proceso de fabricación, yeso e impurezas conteniendo magnesio y hierro.

Una vez que el cemento entra en contacto con el agua, se desarrollan una serie de reacciones de hidratación de los distintos componentes que se encuentran presentes.

Las reacciones de hidratación son irreversibles y exotérmicas y la cantidad de calor generada durante la reacción es diferente para cada uno de los componentes del cemento.

A continuación se muestran las reacciones químicas, aproximadas, que tienen lugar con cada uno de los componentes principales del cemento Pórtland.

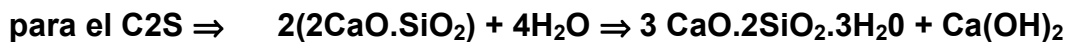
### *Reacción de los Silicatos Tricálcico y Dicálcico*

Los silicatos tri-cálcico y di-cálcico (C3S y C2S), “alita” y “belita” respectivamente, en contacto con el agua se hidrolizan dando como resultado silicato de calcio hidratado, menos básico que el silicato anhidro, e  $\text{Ca(OH)}_2$ .

El principal producto así formado es el silicato de calcio hidratado  **$\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$** , (C-S-H), denominado también por algunos autores como “**Tormeborita gel**”, es un producto amorfo, responsable de la alta resistencia mecánica del producto endurecido, conteniendo una red de poros rígidos de diámetro del orden de los Armstrong conocidos como “poros gel”. No obstante la composición química del C-S-H es variable y dependiente de la edad, temperatura y relación agua/cemento.

Las impurezas presentes dentro de la alita y la belita, afectan la composición de los productos de hidratación. Este aspecto de pureza es de gran importancia debido a que la alita y la belita forman aproximadamente un 70% del cemento común, por lo tanto de sus purezas dependerán los productos de hidratación formados y las propiedades de la pasta de cemento obtenida.

La relación C/S del Silicato de calcio anhidro es mayor que la sílica hidratada formada. La racción química generada queda expresada según la siguiente reacción:



El otro producto de reacción,  **$\text{Ca(OH)}_2$** , se lo conoce como portlandita y se lo designa CH.

Durante el proceso de hidratación del C3S y C2S, se forman diferentes cantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$  que rondan en un 40% y 18% respectivamente.

La formación del  $\text{Ca(OH)}_2$  en la hidratación del cemento es la responsable de la alta alcalinidad de la pasta. Esta condición de elevada alcalinidad, hace que el hormigón sea muy susceptible al ataque de ácidos, pero a la vez provee una adecuada protección a las armaduras de hierro que se encuentran amebidas, debido a que mantiene la capa de óxido pasivando las barras de hierro.

### *Reacción del Aluminato Tricálcico (C3A)*

El Aluminato tri-cálcico, C3A, es la primera fase en reaccionar cuando el cemento entra en contacto con el agua. La acción de adicionar intencionalmente yeso en el cemento, es a los efectos de retardar este proceso de reacción.

En el cemento, la presencia de yeso introduce una modificación de la reacción. La reacción inmediata que existe entre el C3A y el yeso en presencia de agua provoca un fenómeno de retardo debido principalmente a la formación de

etringita,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , que forma una película protectora sobre los granos de C3A retardando su hidratación.

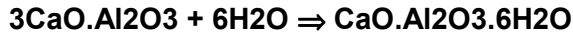
Esta película retarda la hidratación de este componente y hace que la reacción de hidratación sea principalmente la hidratación de los silicatos de Calcio.

Esta película no se mantiene durante todo el proceso de reacción en forma invariante, sino que se va renovando a medida que transcurre la hidratación de los componentes del cemento.

La formación de una película de etringita sobre los granos de C3A, produce una presión debido a la cristalización en puntos localizados. Esta continua cristalización genera un estado tensional sobre la película de etringita hasta que se rompe.

Una vez rota la película, se produce nuevamente la hidratación del C3A, reaccionando nuevamente con el yeso dando lugar nuevamente a la formación de la película protectora de etringita sobre los bordes de grano, sellando la zona de rotura y retardando la reacción nuevamente.

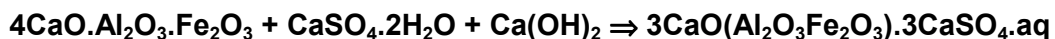
El proceso de formación de la película de etringita va cesando a medida que se van consumiendo los iones de sulfato. Esto conduce a que el C3A comience a reaccionar con la etringita produciendo un producto llamado monosulfato,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , y finalmente consumida toda la etringita, continúe su hidratación resultando la siguiente reacción:



#### *Reacción del C4AF (Ferrita)*

En un estado temprano de reacción, la fase ferrita reacciona con el yeso y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produciendo una solución sólida de sulfoaluminatos y sulfoferrita, presentándose en cristales en forma de aguja.

La reacción de hidratación de la fase ferrita, se desarrolla según:



El proceso continuo de reacción tiene un comportamiento similar al de la formación de etringita, en donde a medida que los iones de sulfato que se encuentran dentro de la solución sólida de forroaluminato, son consumidos, estos van siendo reemplazados por iones de hidróxido.

#### *Teorías de Fraguado*

Algunos investigadores describen este proceso como la formación de una sustancia coloidal dispersa, sol, formada a partir de la hidratación del cemento.

El coloide es luego neutralizado por la concentración de iones calcio del medio y el sol coagula en forma de gel, (tobermorita gel). El comienzo del fraguado coincide con el comienzo de la gelatinización y el final del mismo, con el final



de la precipitación de flóculos.

El lapso durante el cual la pasta va cambiando sus características, se denomina período de fraguado y puede determinarse su comienzo y su fin, a los que se los denomina tiempo de fraguado inicial y final respectivamente.

Cuando la tobermolita gel comienza a secarse, comienza también el proceso llamado endurecimiento. El tan pequeño tamaño de las partículas del gel, del orden del  $0,001\mu\text{m}$  (extremadamente alta área superficial) (superficie específica  $3.10^6\text{ cm}^2/\text{g}$ ), comparado con la partícula de cemento que tiene un tamaño medio de  $10\mu\text{m}$ , explica la atracción que se produce de contacto entre sí y a las partículas de cemento no totalmente hidratadas, así como a las superficies de los agregados más finos.

A medida que este proceso progresa se hace evidente la pérdida de fluidez de la pasta hasta llegar al estado sólido, con lo cual la reacción no se paraliza sino que continúa, siempre que haya agua disponible, pues a lo largo del tiempo van reaccionando los sectores más internos de cada partícula de cemento, hasta que después de varios años todas las partículas se transforman en sus correspondientes silicatos hidratados.

Según la teoría coloidal propuesta por *Michaelis*, se produce primeramente un fenómeno de disolución que provoca una hinchazón de los granos de cemento y la aparición de una solución muy concentrada de cal. Esta solución actúa sobre los silicatos para dar, bajo las formas de un gel, un silicato cálcico hidratado, prácticamente insoluble. La masa gelatinosa aumenta poco a poco su volumen por absorción de la cal y se vuelve así cada vez más densa e impermeable.

Ella estrecha los granos de cemento que continúan hidratándose por succión de agua contenida en el gel. Este último, empobreciéndose en agua, aumenta su resistencia. Se explica así el fraguado bajo el agua, constituyendo el gel una masa protectora, endurecedora y nutritiva para los granos del cemento.

Gracias a sus observaciones sobre las reacciones de fraguado de los yesos y los silicatos de bario, y procediendo por analogía, *Henry le Chatelier* enunció en 1887 otra teoría, conocida como teoría cristalina.

Según esta teoría, cuando se pone un cemento en presencia del agua, se produce primeramente una reacción química de hidratación: el cemento anhidro se disuelve en el agua y da lugar a una solución saturada. En esta solución aparecen sales hidratadas, cuya solubilidad es mucho más débil que la de las sales anhidras. La solución es entonces sobre-saturada y las sales hidratadas se precipitan bajo formas de microcristales. La solución restante puede entonces disolver nuevas partículas anhidras y las reacciones se continúan hasta la puesta en solución de la totalidad del cemento. Es lo que constituye el principio del fraguado.

Se produce por último un fenómeno mecánico de endurecimiento que es debido a la multiplicación y a la adherencia de los cristales, tomando éstos a menudo una forma alargada (especie de agujas embrolladas), la que se

aprecia con la ayuda del microscopio electrónico.

Esta teoría mejorada y completada permite una comprensión clara y sencilla del fraguado y del endurecimiento. Explica bien la mejor o peor adherencia del cemento a los áridos según su naturaleza. Permite igualmente comprender la acción de ciertos cuerpos actuando como retardadores o aceleradores del fraguado, por modificación de la velocidad de disolución de las sales anhídras en el agua de amasado.

Las teorías precedentes pueden complementarse y formar un conjunto coherente. Puede admitirse que se producen cristales muy finos que precipitan poco a poco, constituyendo la masa coloidal que da origen al fraguado. La estructura cristalina se desarrolla a continuación y da lugar a una red de finas agujas enredadas que otorgan a la pasta su coherencia y dureza.

### *Porosidad de la Pasta*

Durante la solidificación de la pasta cementicia, el volumen de la misma decrece, produciéndose un encogimiento de la mezcla. Este encogimiento debido al secado y cristalización del gel, conduce a la formación de poros de tamaños de diámetros que se encuentran en el orden de los Ångström, llamados poros gel.

El porcentaje en volumen de estos poros gel, se incrementa con el avance del proceso de hidratación, llegando a ocupar aproximadamente el 20 – 30% del volumen de la pasta de cemento endurecida.

Otro sistema de poros que también tiene lugar durante la solidificación de la pasta cementicia y es formado por la evaporación del exceso de agua no unida, es conocido como sistema de poros capilares. Estos poros capilares tienen tamaños cuyos diámetros están en el orden de los micrones y ocupan un volumen aproximado entre el 1 y el 40 % de la pasta de cemento endurecida, dependiendo de la cantidad de agua utilizada en el proceso de mezclado.

Cambios de temperatura provocan un movimiento del agua interna desde los poros gel hacia los poros capilares y viceversa, esto provoca cambios de volúmenes.

Otro tipo de poros que se presentan en la pasta son los poros de aire o burbujas cuyos tamaños varían de 0,01 mm a 2 mm y su porcentaje en el volumen de la pasta cementicia varía del 1 al 10%, dependiendo de la calidad del amasado o de la incorporación de adiciones.

De los tres sistemas de porosidad, los poros capilares son los responsables del deterioro de las pastas cementicias, desde el punto de vista de la lixiviación y corrosión, dado que estos micro canales ofrecen un paso para la penetración de aguas agresivas provocando la degradación de la pasta.

Los poros gel no representan ningún efecto significado, mientras que los poros de aire por el contrario reducen la permeabilidad de la pasta cementicia, si son lo suficientemente pequeños y si se encuentran homogéneamente distribuidos. Al contener aire dentro de los poros, éste impide el pasaje de agua proveniente de los poros capilares, sólo cuando el aire de su interior es desplazado por difusión, el agua puede penetrar en ellos.

#### **4. Factores que afectan la durabilidad del Hormigón**

##### **4.1 Factores propios del Hormigón.**

###### ***Tipo de cemento, adiciones***

Existen diferentes tipos de tipos de cementos portland normalizados bajo Norma IRAM 50.000, que pueden adquirirse comercialmente en el país:

- Cemento portland normal
- Cemento portland con “filler” calcáreo
- Cemento portland compuesto
- Cemento portland con escoria
- Cemento de alto horno
- Cemento portland puzolánico
- Cemento portland de alta resistencia inicial
- Cemento portland moderadamente resistente a los sulfatos
- Cemento portland altamente resistente a los sulfatos
- Cemento portland de bajo calor de hidratación
- Cemento portland resistente a la reacción álcali – agregado
- Cemento portland blanco

Estos diferentes tipos de cementos han sido fabricados de acuerdo a las distintas necesidades de uso, ya sea para uso general, en cuyo caso no se requieren propiedades especiales de durabilidad, resistencia mecánica temprana, color, etc., o para su utilización en estructuras especiales y/o ambientes agresivos para lo cual se han elaborado cementos especiales con o sin adiciones, cuyas composiciones son específicamente diseñadas.

Además estos cementos son categorizados de acuerdo a los niveles de resistencia mecánica necesarios.

En la Tabla 2, puede observarse los diferentes tipos de cementos de uso general.

Tipo de cemento	Nomenclatura	Composición (g/100 g)			
		Clínker + sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	“Filler” calcáreo (F)
Cemento pórtland normal	CPN	100-90		0-10	
Cemento pórtland con “filler” calcáreo	CPF	99-80			1-20
Cemento pórtland con escoria	CPE	89-65		11-35	
Cemento pórtland compuesto	CPC	98-65	dos o más, con P + E + F ≤ 35		

Cemento pórtland puzolánico	CPP	85-50	15-50		
Cemento de alto horno	CAH	65-25		35-75	

**Tabla 2 - Tipos de cemento de uso general y composición**

Cuando además se requieren propiedades especiales en el hormigón, la norma IRAM 50.001 especifica otros requerimientos en función de las propiedades especiales buscadas en el producto. Estos requisitos están especificados en la Tabla 3

<b>Denominación</b>	<b>Designación</b>
De Alta Resistencia Inicial	ARI
Moderadamente Resistente a los Sulfatos	MRS
Altamente Resistente a los Sulfatos	ARS
De Bajo Calor de Hidratación	BCH
Resistente a la Reacción Álcali-Agregado	RRAA
Blanco	B

**Tabla 3 Cementos de características especiales**

Para la fabricación de los diferentes tipos de cementos se utilizan adiciones incorporadas en seco, como ser escorias, puzolanas, micro-sílice, pigmentos colorantes, etc.

La acción de estos compuestos, es la de modificar en forma permanente y favorable las condiciones iniciales del hormigón, ya sea en estado plástico o endurecido.

En todos los casos se busca mejorar las prestaciones de resistencia, impermeabilidad y durabilidad.

Una de las formas de mejorar la impermeabilidad es con el agregado de sílica-fume, que ayuda al aumento de la durabilidad, impidiendo el ingreso de agentes nocivos que puedan actuar químicamente, como el caso de cloruros y sulfatos.

Analizando brevemente cada uno de los compuestos antes mencionados, tenemos:

### *Escorias*

Tanto el cemento y la escoria contienen los mismos componentes básicos, pero la proporción de óxido de calcio en la escoria es inferior que en el cemento. Lo contrario sucede con la proporción de óxido de sílice, que no tiene las mismas propiedades físicas.

En lo que se refiere a la resistencia a la compresión, un hormigón realizado con cemento Portland normal, presenta mejor desempeño que uno realizado con cementos y adiciones de puzolanas y/o cenizas volátiles.

Esta característica de menor resistencia de los cementos con adiciones, se presentan sólo en los primeros días de fraguado, tiempo que ronda entre los 2 a 7 días.

Pasado los 28 días la resistencia es la misma, pudiendo llegar a ser muy superior durante periodos más prolongados. Esta es una de las características que favorece las numerosas aplicaciones del uso de cementos con adiciones.

Existen muchas ventajas en el uso de cemento obtenidos con escorias para la fabricación de hormigones. Estos presentan muchas ventajas respecto al cemento Portland normal y al hormigón fabricado sólo con cemento Portland.

Las ventajas que se presentan en el cemento son:

- Resistencia a largo plazo mejor que la del cemento común
- Resistencia a la acción agresiva del agua del mar
- Mejor densidad que la del cemento común
- Calor de hidratación menor que el del cemento Portland normal, lo que evita las grietas
- Gran resistencia a la difusión de cloruros y a los sulfatos
- Produce hormigón más duradero

La única desventaja es la resistencia a corto plazo. Se necesita un activador (generalmente CaO) para aumentarla.

Las ventajas obtenidas en los hormigones son las siguientes:

- Se trabaja mejor el hormigón fresco (colada más fácil)
- Menor calor de deshidratación (como en el caso del cemento, la ventaja es que disminuye la tendencia a agrietarse)
- Mayor tiempo de fraguado
- A breve plazo la resistencia es menor, pero a largo plazo es mejor
- Desaparece la reacción álcali - sílice
- Elimina o reduce la eflorescencia
- Reduce la porosidad y la difusividad del hormigón (especialmente interesante por el aspecto y por la acción química)
- Aumenta la resistencia a las agresiones químicas
- Produce hormigón casi blanco (aceptable en algunas construcciones donde el aspecto es importante).

Desde el punto de vista de la rentabilidad, el cemento con incorporación de escorias presenta las mismas características de resistencia que el cemento Portland normal, pero su coste es inferior ya que su producción es menos

compleja. En el cemento de escorias basta un simple molido, mientras que con el otro cemento hay que seguir una serie de fases.

En cuanto a las características que deben reunir las escorias para la fabricación de cementos:

- deben provenir de alto horno donde se procese mineral de hierro y es por eso que se les llama escoria siderúrgica.
- deben ser básicas, esto es, que el contenido de elementos básicos tiene que ser superior al contenido de los elementos ácidos
- debe ser granulada, es decir, se debe enfriar bruscamente a la salida del alto horno dejándola en estado vítreo.

### *Puzolanas*

Su adición, otorga una moderada resistencia al ataque por sulfatos, cuando la cantidad presente de estos es moderada.

El agregado de puzolanas no hace a un hormigón resistente a los sulfatos de manera absoluta, sino que mejora las características en cuanto a su comportamiento.

La acción beneficiosa de las puzolanas en el cemento, viene dada en función de la relación que exista entre la cantidad de Sílica y el contenido de alúmina y/o óxido férrico. Relación dada por  $\text{SiO}_2 / \text{R}_2\text{O}_3$ , que tenga la puzolana incorporada. El efecto resistente de los cementos Pórtland resistente a los sulfatos, se ve incrementado cuando las relaciones antes mencionadas son elevadas.

El mecanismo por el que se adquiere la resistencia a los sulfatos por medio de puzolanas, se ha tratado de desarrollar según algunas teorías, las que ponen de manifiesto los modos de reaccionar.

- a) Los efectos son atribuidos al efecto del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sobre la solubilidad del aluminato de calcio hidratado. La disminución de la concentración de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  propia de la reacción de las puzolanas incrementa la solubilidad del aluminato de Calcio hidratado.  
Consecuentemente, la reacción ocurre a través de la solución y sin ningún tipo de expansión, como ocurre al tomar contacto la etringita con los sulfatos.
- b) La segunda teoría sugiere que una disminución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aumenta la concentración de sulfato necesaria requerida para convertirla en una sólida, la que generalmente está formada en la pasta endurecida como parte del yeso y la etringita.  
Según Lea, este modelo es incompleto y propone que la resistencia a sulfatos viene dada por medio de la inhibición de los sulfatos al reaccionar, debido a la película protectora de silicato de calcio hidratado que se forma alrededor de los compuestos de aluminato.

Estas teorías se han planteado debido a que las puzolanas se combinan con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  durante la hidratación de la alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), la belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ), resultando de este modo, que la reducción en el contenido de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , no puede ser la causa de un aumento de la resistencia a los sulfatos, debido a que la expansión del sulfato es propia de la formación de etringita proveniente del Aluminato de Calcio Hidratado y no de una reducción en la cantidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

### *Filler Calcáreo*

Aún no se conoce con exactitud cuál es el mecanismo de reacción, pero se ha comprobado que su incorporación mejora la resistencia a la acción de los sulfatos.

En el mercado es posible encontrar diferentes tipos de cementos que garantizan durabilidad u otros aspectos requeridos para proyectar hormigones que cumplan con los requerimientos del proyecto encuadrados en diversas normas.

El proyecto en estudio del nuevo reglamento CIRSOC 201 indica la máxima relación agua/cemento ( $a/c$ ) permitida, el tipo y cantidad de cemento a utilizar y la resistencia mínima a especificar para el hormigón en función del grado de la agresividad del medio (ver tabla). Por ejemplo, para el caso de hormigón simple y armado distingue:

- Ataque moderado: en este caso se debe utilizar un **Cemento MRS** o un cemento normal con el agregado de una adición mineral, de comportamiento equivalente debidamente verificado. La relación agua cemento no debe exeder de 0.50, y la resistencia a especificar no deberá ser inferior a 30 MPa
- Ataque fuerte: debe emplearse un **Cementos ARS** o un cemento normal con el agregado de una adición mineral, de comportamiento equivalente debidamente verificado. La relación  $a/c$  no deberá exceder de 0.45, y la resistencia a especificar no deberá ser inferior a 35 MPa.
- Ataque muy fuerte: utilizar **Cementos ARS** más una adición mineral cuyo comportamiento esté debidamente verificado para condiciones de exposición similares. Puede prescindirse el uso de la adición mineral cuando se utilice una protección exterior capaz de resistir la agresión. Relación  $a/c$  no deberá exceder de 0.40, y la resistencia a especificar no deberá ser inferior a 40 Mpa, El contenido de cemento del hormigón deberá ser al menos de 350 kg/m<sup>3</sup>.

### **MRS - Moderadamente Resistente a los Sulfatos**

Es un cemento al cual se le limita el contenido de C3A (aluminato tricálcico) a valores menores o iguales al 8 % en masa, lo cual hace a este material apto para utilizarlo cuando existe un ataque moderado de sulfatos o será utilizado en hormigones de estructuras en contacto directo con agua de mar.

### **ARS - Altamente Resistente a los Sulfatos**

Es el cemento conocido como ARS. La norma IRAM limita el contenido de C3A (aluminato tricálcico) a un máximo de 4 % en masa y la suma de C3A + FAC4 (ferroaluminato tetracálcico) debe ser menor o igual a 22 %, calculados teóricamente de acuerdo a la composición química. Su utilización se limita para estructuras sometidas al ataque fuerte de sulfatos presentes en ciertas aguas y/o suelos de contacto.

### **Tipo de Agregados y Reacción Álcali - Agregado**

Las características de los agregados utilizados para el proyecto de hormigones es de vital importancia. Los mismos deben ser resistentes, deben poseer superficies con buena rugosidad y sin aristas marcadas y fundamentalmente deben ser inertes a reaccionar con los componentes del cemento. Como parámetros de mayor interés los agregados deben poseer.

- Resistencia Mecánica
- Baja permeabilidad

En relación a la porosidad de los mismos, es mucho menor que la de la pasta de cemento. A pesar de esto, la pequeña porosidad que poseen favorece la acción destructiva del hielo que se forma en el interior de sus poros.

Este fenómeno es debido a que los poros presentes en el agregado, tienen la facilidad para permitir el ingreso de agua pero poseen dificultad por dejar que la misma pueda salir con facilidad, propio de la acción capilar que se presenta en canales de muy pequeño diámetro.

Este inconveniente para permitir la salida del agua, hace que a bajas temperaturas se formen láminas de hielo que tienden a expandirse, aumentando su volumen e incrementando el estado tensional interno del agregado, llevándolo de esta manera a su posterior fisuración.

Como en la mayoría de los casos la pasta de cemento posee una menor resistencia que los agregados, ésta sufrirá el deterioro antes que los agregados.

Como se puede observar, en términos de durabilidad se debe lograr que los agregados tengan la menor porosidad posible, evitando su posterior deterioro al estar en presencia de agua.

En relación a una de las propiedades que debe cumplir un agregado, respecto a su estabilidad química, se presenta brevemente la reacción **Álcali – Agregado**, de ahora en más RAA.



Esta reacción ocurre entre la solución altamente alcalina de los poros, con un pH muy elevado, y las partes silíceas de los agregados.

La forma en que se produce la reacción, viene dada por la concentración de Na y Mg que disuelve la sílica, dando lugar a la formación de un gel que forma una película sobre la superficie de los agregados.

El gel de sílice – álcali se forma en la superficie, moviéndose luego hacia el interior. Esta reacción provoca esfuerzos de tracción que conllevan a la posterior fisuración de los agregados y pasta circundante.

El aumento de la fisuración implica una reducción de la impermeabilidad del hormigón debido a que se forma en muchos casos, un sistema de canales intercomunicados, los que permitirán el ingreso y egreso del agua.

Los agregados más susceptibles de reaccionar son aquellos ricos en sílice, como ser el ópalo. En cambio materiales graníticos son más estables y las velocidades de reacción son lo suficientemente bajas.

La forma en que se puede hacer un diagnóstico de si esta reacción es viable, es a través de un patrón de fisuración, el que se distingue de la fisuración propia durante la contracción por fraguado.

Desde el punto de vista de la **granulometría**, esta debe ser continua, debido a que permite una mayor compacidad. La reducción del volumen de vacíos permite lograr una mayor impermeabilidad, una mejor trabajabilidad del hormigón fresco, disminuye la cantidad necesaria de pasta de cemento mejorando la economía del conjunto y ofrece una mayor resistencia mecánica logrando así, mayor resistencia a los agentes químicos por poseer un menor número de poros o vacíos; responsables de la pérdida de las características requeridas.

Es aconsejable que los agregados no posean aristas salientes o no sean lajosas, ya que darían lugar a puntos de concentración de tensiones dentro de la masa de hormigón, llevándolo a una posterior fisuración.

La granulometría continua mejora la consistencia, pero no manifiesta cambios en la resistencia. Una aumento de la resistencia se logra también con una mejor calidad de los agregados, como así también en la forma que tengan. Agregados redondos mejoran la trabajabilidad, frente a aquellos que muestran formas más irregulares.

Por otro lado, los agregados triturados mejoran la resistencia, pero disminuyen la consistencia debido al mecanismo de traba que se presenta por fricción entre las superficies de los mismos.

Para el caso que estamos estudiando, estructuras que deben poseer estanqueidad y durabilidad adecuada, la correcta selección de granulometrías, es tendiente a disminuir la porosidad, minimizando de esta manera la permeabilidad, factor limitante de las condiciones de proyecto establecidas.

### **Formulación Empleada y uso de Aditivos**

Los parámetros más importantes en la formulación empleada son la relación agua/cemento, y contenido total de cemento.

Para obtener una baja permeabilidad es necesario definir correctamente las realciones antes establecidas.

La cantidad de agua a utilizar en la mezcla, queda definida por la relación agua cemento (a/c). Un aumento de la cantidad de agua en la mezcla, mejora la trabajabilidad de la pasta, pero tiene efectos desfavorables sobre la resistencia debido a un aumento de la porosidad capilar y por lo tanto de la permeabilidad obteniéndose un producto de menor durabilidad.

Desde el punto de vista de la resistencia, lo más aconsejable sería trabajar con relaciones a/c lo más bajas posibles, pero los valores mínimos están condicionados por aspectos económicos y de trabajabilidad, pudiendo llegar en el mejor de los casos a un valor mínimo de 0.35 sin presencia de aditivos fluidificantes.

En lo que se refiere a la cantidad de cemento total utilizada para un hormigón con características particulares, se define el peso de cemento por m<sup>3</sup> de hormigón elaborado.

Los reglamentos definen las cantidades mínimas de cemento a ser utilizadas. Como ejemplo el reglamento CIRSOC 201 establece que un hormigón debe tener como mínimo 280 KgC<sup>o</sup>/m<sup>3</sup> H<sup>o</sup>. Sin embargo, los valores para la elaboración de Hormigones de alto desempeño, se fija un mínimo de 350 a 400 KgC<sup>o</sup>/m<sup>3</sup> H<sup>o</sup>.

Un hormigón que posea valores elevados en el contenido de cemento, garantiza un adecuado nivel de resistencia, logrando así disminuir las dimensiones de las secciones resistentes, como así también las cantidades de acero necesarias cuando se proyectan estructuras de hormigón armado.

Cuando se requiere variar algunas de las propiedades de tanto de las mezclas frescas como del producto endurecido, se puede recurrir a la utilización de aditivos. Existen diversos tipos de aditivos que permiten obtener características particulares como ser variación de los tiempos de fraguado, mejora de la trabajabilidad, cambios en la fluidez, etc.

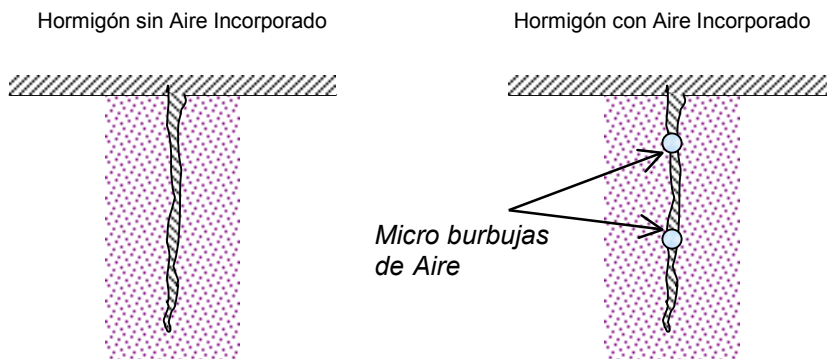
Los aditivos son incorporados al hormigón en el momento de su elaboración. Se puede citar a modo de ejemplo, aditivos tales como, aceleradores de fragüe, incorporadotes de aire, superfluidificantes, retardadores de fregüe, etc.

### *Incorporación de Aire:*

Se ha comprobado que a diferencia del aire accidentalmente incluido en el hormigón, la incorporación de aire en forma intencional mejora la calidad del hormigón en cuanto a reducir su permeabilidad y a atenuar los efectos de congelamiento y deshielo, actuando de forma altamente beneficiosa sobre la durabilidad del hormigón.

Estas mejoras son debidas a que las microburbujas del aire incorporado interceptan los conductos capilares formados al evaporarse el agua del hormigón fresco.

La incorporación de aire tiene efectos benéficos hasta un máximo en el que la influencia va disminuyendo. La bibliografía indica que los valores de aire a incorporar, respecto del total del volumen de hormigón, rondan entre el 4% y 6%.



Para analizar la influencia del aire incorporado en el comportamiento del hormigón se debe utilizar el llamado **factor de espaciamiento**. Este se define como el promedio de las máximas distancias medidas desde cualquier punto de la pasta, hasta el borde de un vacío de aire.

Los valores del factor de espaciamiento medidos en función de la resistencia al congelamiento y deshielo, están comprendidos entre 0,2 a 0,3 mm.

Durante el proceso de incorporación de aire, se debe controlar que los espaciamientos se encuentren entre los valores mencionado, como así también que la cantidad de aire incorporada no sea excesiva, obteniéndose burbujas de tamaños comprendidos entre los 0,5 mm y 1,25 mm de diámetro.

### *Superfluidificantes:*

Son utilizados para darle a la mezcla una consistencia plástica, blanda y/o fluida según se requiera, sin aumentar la relación a/c (debido a la necesidad de incorporar mayor cantidad de agua), lo que provocaría en ese caso una disminución de la resistencia y también la durabilidad.

Los superfluidificantes son muy efectivos en la defloculación y dispersión de las partículas de cemento, son aditivos altamente eficientes cuando se utilizan adecuadamente. Por medio de ellos es posible:

- Mejorar la trabajabilidad del hormigón sin adición de agua, ya que existe un efecto de lubricación de los agregados.
- Dispersar las partículas del cemento de tal forma que los hormigones puedan fabricarse usando menos agua de la necesaria para una completa hidratación de la pasta.
- Se pueden producir pastas de cemento hidratado lo suficientemente estables y densas para unirse fuertemente a los agregados y al acero de refuerzo para producir un material compuesto muy resistente.
- Hacer hormigones tan densos que pueden ser más resistentes y durables que muchas rocas naturales.

Hay que tener presente que el uso de superfluidificantes puede producir incompatibilidades, debido a que incorpora en la pasta un nuevo componente químico de naturaleza orgánica, no obstante su empleo es en muy bajas concentraciones.

### ***Armaduras de Refuerzo***

Los aceros utilizados en estructuras de hormigón armado, deben garantizar un adecuado grado de resistencia. Existen diferentes tipos y calidades dependiendo de la metodología de su fabricación.

La utilización del tipo de acero adecuado, de la utilización de la sección resistente especialmente calculada y del correcto diseño de la armadura permitirán que éstas no sean un factor causante de una disminución de la durabilidad.

Para establecer los parámetros mínimos de los aceros a utilizar, existen en el mundo diversas normas destinadas a fijar las condiciones de calidad y resistencia requeridas para cada tipo de estructuras.

Las características de las barras utilizadas en estructuras construidas y proyectadas en nuestro país, están definidas por la Norma CIRSOC 201.

FORMA DE UTILIZACION EN OBRA			1	2	3	4	5
			Barras de acero		Alambres de acero	Mallas de acero	
DESIGNACION DEL ACERO (***)			AL 220	ADN 420	ATR 500 P ATR 500 N	AM 500 L	AM 500 P AM 500 N
ELABORACION DEL ACERO			Laminado en caliente	Dureza natural	Dureza mecánica	Dureza mecánica	
CONFORMACION SUPERFICIAL			Lisa ( L )	Nervurada ( N )	Alambres Perfilados (P) Nervurados (N)	Alambres lisos	Alambres Perfilados (P) Nervurados (N)
DESIGNACION ABREVIADA			I	III DN	IV AP y IV AN	IV ML	IV MP y IV MN
1	Diámetro nominal (d)	mm	6 - 8 - 10 - 12 - 16 - 20 - 25	6 - 8 - 10 - 12 - 16 - 20 - 25 - 32 - 40	4 a 12	(**) 3 - 3,4	4 a 12
2	Límite de fluencia mínimo (R <sub>e</sub> , R <sub>p0.2</sub> )	MPa	220	412	490	490	490
3	Resistencia a la tracción mínima (R)	Mpa	340	500	550	550	550
4	Alargamiento porcentual de rotura, mínimo (A <sub>10</sub> )	%	18	12	6	6	6
5	Resistencia al corte de las uniones soldadas en las mallas mínima	kN	-----	-----	-----	0,175 S <sub>máx.</sub> (*)	0,15 S <sub>máx.</sub> (*)
6	Diámetro del mandril de doblado. Angulo de doblado 180°	mm	2 d	d ≤ 25 3,5 d d = 32 5,0 d d = 40 7,0 d	4 d	4 d	4 d

**Tabla 4 Ref. Cirsoc 201**

***Diseño, dimensiones de recubrimiento, construcción. Elaboración, colocación, compactación y terminado de las superficies.***

El diseño y la construcción de las estructuras de hormigón son de gran importancia, ya que influyen notablemente en la durabilidad requerida.

En cuanto al diseño, es importante definir desde el inicio cuáles serán las solicitudes en servicio.

Una de las características más importantes a tener en cuenta relacionada con la durabilidad a definir en la etapa de diseño, es la dimensión que debería tener el recubrimiento de las armaduras.

Las dimensiones y calidad del recubrimiento (covercrete) estarán íntimamente ligados a la durabilidad. Es de suma importancia conocer parámetros tales como velocidad de difusión de especies químicas agresivas, porosidad y permeabilidad del recubrimiento al momento de establecer el espesor mínimo en el diseño.

El valor máximo del recubrimiento se fijará evitando que el hormigón se desprenda por falta de adherencia con las barras de acero.

En la etapa de construcción, se deben tener presente todos los aspectos que hacen a la elaboración y colocación del hormigón fresco, como así también las condiciones de curado del hormigón endurecido.

La elaboración debe ser uniforme con la finalidad de obtener un hormigón homogéneo y con iguales propiedades en toda su masa.

Los diferentes pastones también deben poseer entre sí la misma consistencia y trabajabilidad durante la colocación del hormigón fresco.

La colocación, debe ser realizada de manera tal, que se eviten segregaciones de los componentes, las que de suceder provocarían una inhomogeneidad en la masa de hormigón, dando como resultado zonas de menor resistencia y mayor permeabilidad.

Para ello, es necesario que el colado del hormigón se haga a distancias cercanas al punto de colocación, lo que evita la separación entre los áridos y la pasta de cemento durante la caída. Las diferentes coladas deben ser de espesor menor o igual al elemento utilizado para el vibrado.

La compactación tiene como finalidad darle mayor compacidad a la mezcla, de este modo se obtendrá una adecuada densidad del hormigón fresco, produciendo un hormigón menos permeable y por lo tanto más durable.

Existen diferentes métodos para este fin, pero actualmente el más efectivo es uso de vibradores, ya que permiten ser usados aún en zonas de difícil acceso.

En cuanto a la terminación superficial, ésta debe ser de la mejor calidad posible, la que se logra con el uso de encofrados con superficies lisas y en buen estado. Los encofrados metálicos cumplen con estas características. De este modo se evita poseer superficies muy rugosas, mal terminadas y con

oquedades que de producirse permitirían la acumulación de sustancias o sales que puedan ser nocivas a futuro para la durabilidad del hormigón.

### **Curado**

El curado es una etapa muy importante durante el proceso de fragüe.

Durante el curado se debe mantener la cantidad de agua necesaria, de modo que se evite su evaporación, favorecida por el calor generado durante las reacciones exotérmicas de hidratación de los compuestos del cemento. Si la reacción exotérmica es lenta, dará como resultado un aumento de la red capilar, en cambio si la reacción es brusca, dará lugar a la formación de fisuras observables a simple vista.

La aparición de fisuras como resultado de un curado defectuoso, hace que exista una disminución en la resistencia, aumentando la porosidad e incrementando al mismo tiempo la permeabilidad. Todos estos efectos adversos hacen que los hormigones obtenidos posean baja durabilidad.

Los tiempos necesarios para el curado, deben ser tenidos en cuenta para que el hormigón desarrolle una resistencia adecuada. Durante los primeros 7 días, se debe prestar atención a que bajo ninguna circunstancia, haya ausencia de agua, ya que durante estos primeros días se desarrolla la resistencia temprana. El proceso de curado debe seguir llevándose a cabo aproximadamente hasta los 25 a 30 días, tiempo en que desarrolla el 90% de la resistencia total del hormigón.

## **4.2 Factores Externos**

### **Erosión.**

La erosión es uno de los factores externos que menos influencia tiene en nuestras estructuras ya sólo estarán expuestas durante la fase operativa, pero durante su etapa de asilamiento, dado que estarán totalmente cubiertas, no van ser influenciadas por este factor de degradación. No obstante debido a la vida de servicio muy prolongada que poseen, se debería considerar que otros fenómenos erosivos producidos por acción del agua podrían alterar su integridad.

Como condiciones de diseño tendientes a mejorar el comportamiento, se deben realizar hormigones con relación a/c bajas y favorecer el uso de agregados de elevada dureza.

El tamaño de los agregados debería ser de un tamaño adecuado, tendiendo a los de mayor diámetro sin superar los 20 mm aproximadamente. Esto se debe a razones de trabajabilidad, evitando los inconvenientes de segregación por quedar retenidas partículas gruesas en los entramados de las armaduras.

Muchos de los ensayos que demuestran la aptitud de los hormigones a resistir la acción erosiva, se basan en la pérdida de peso y espesor. Existen numerosos ensayos normalizados, como ser el ensayo “ Los Angeles”, de los que no se darán detalles debido a que excede los alcances del presente trabajo.

### ***Especies Químicas Agresivas.***

Los agentes químicos externos son de vital importancia en lo que se refiere a su composición y modo de reaccionar con los diferentes componentes del cemento.

El estudio de cómo degradan las estructuras de hormigón, y cómo se pueden minimizar sus efectos, y en el mejor de los casos evitarlos, es un tema que al día de hoy, se estudia con profundidad por diversos laboratorios en el mundo.

En el presente trabajo, se dará una breve introducción de cómo actúan algunos de los agentes químicos, para entender posteriormente los mecanismos en los que se basan los métodos de ensayo y las normas de aplicación.

Los agentes químicos agresivos que se tratarán serán:

- Carbonatación
- Acción de los Sulfatos.
- Acción de los Cloruros.

### ***Proceso de Carbonatación:***

Para dar una explicación a este fenómeno, se tomará como base el trabajo publicado por Luis Fernández Luco, Corrosión por carbonatación. Espesor y Calidad del Recubrimiento.

El proceso de carbonatación es de suma importancia desde el punto de vista de su acción sobre el hormigón y la consecuente corrosión de las armaduras.

El hormigón posee un pH fuertemente básico (cerca de 12.5), el que provee una película protectora a las armaduras frente al fenómeno de corrosión, debido a que las barras de acero en estas condiciones se encuentran pasivadas.

*Bajo estas condiciones, el conjunto estructural, Hormigón + Acero, es decir el hormigón armado, posee una elevada durabilidad durante largos periodos de tiempo, si se han brindado las propiedades de resistencia e impermeabilidad adecuadas.*



Sin embargo el problema patológico del Hormigón Armado que se presenta con mayor frecuencia es el de corrosión de las armaduras. Este fenómeno se ve favorecido por acción de la carbonatación.

Durante el proceso de hidratación del cemento Portlan, se forman silicatos de calcio hidratados, responsables de la resistencia e hidróxido de calcio (portlandita), que es quien brinda el pH básico al hormigón.

Cuando el hormigón toma contacto con el  $\text{CO}_2$  presente en el aire, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se combina con el  $\text{CO}_2$  para dar como resultado  $\text{CaCO}_3$ , carbonato de calcio. Esta reacción es la responsable de disminuir el pH a valores de aproximadamente 9.

En estas condiciones se pierde el pasivado del acero que se encuentra inmerso en la masa de hormigón, con lo que deja de existir la película protectora, y con ello comienza la corrosión de las armaduras.

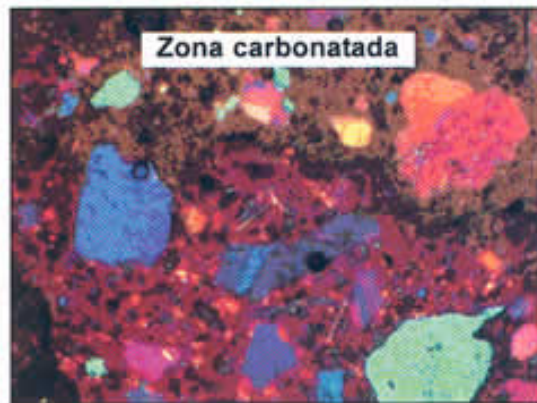
El óxido formado genera puntos de tensión localizados, que llevan a la fisuración del hormigón cuando el valor de dichas tensiones, supera la resistencia a la tracción del mismo.

Por esta razón, se debe minimizar el efecto de la fisuración al máximo posible, logrando de esta manera disminuir el ingreso de contaminantes al interior del hormigón. Es decir disminuir la vía de acceso de éstos a las armaduras.

Desde el punto de vista de la cinética de carbonatación, es un proceso mas o menos lento, la observación del avance del frente de carbonatación, así llamado el la bibliografía, se puede hacer mediante el uso de una solución de fenolftaleína en alcohol, que muestra un color fucsia intenso en la zona NO carbonatada.



**FOTO 1:** Testigo de hormigón donde se detecta la zona carbonatada por ausencia de color fucsia.



**FOTO 2:** Corte delgado de hormigón observado con luz polarizada y lámina retardadora de yeso.

Desde el punto de vista del diseño, es importante tener en cuenta el efecto de la carbonatación en el recubrimiento de las armaduras, que es la zona mas vulnerable bajo los efectos del aire circundante.

*Ataque por Acción de Sulfatos.*

Dado que este trabajo pretende dar los lineamientos a seguir en la ejecución de un ensayo acelerado debido a la acción de los sulfatos, se explicará con un adecuado grado de detalle el efecto nocivo sobre estructuras de hormigón.

Los sulfatos se encuentran presentes como sales en suelos y como soluciones en el agua subterránea, en las formas de sulfato de sodio, potasio, calcio y magnesio, siendo esta última la más nociva para el hormigón.

El daño provocado al hormigón se produce cuando toman contacto las soluciones de sulfato con los componentes de aluminato del cemento tales como el C3A Hidratado.

Aún no se conocen los mecanismos precisos de degradación y a qué modelos responden concretamente, no obstante existe innumerables trabajos de investigación al respecto..

Existen diversas teorías respecto de los mecanismos de degradación que se basan en aceptar que la formación de etringita es un proceso de hidratación normal del cemento al inicio de las reacciones de hidratación cuando las fases de aluminato tricálcico del cemento reacciona con el sulfato de calcio (yeso) presente en el mismo.

Sobre la base de este concepto, la formación de etringita también podría tener lugar en el hormigón maduro sometido a condiciones de humedad, encontrándose las especies reactivas dentro de las cavidades o poros. Es un proceso de hidratación llamado maduración de Ostwald.

Estudios recientes sugieren que el ataque por sulfatos puede degradar el hormigón a causa de la descalcificación de C-S-H, que es el componente que da mayor liga al cemento Portlan hidratado.

Acorde a este mecanismo propuesto de degradación, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  liberado por la reacción de C-S-H, reacciona con los iones de sulfato soluble y monosulfoaluminato ( $3\text{CO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{CaSO}_4$ ) para formar etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

Debido a que el C-S-H se degrada, el módulo de elasticidad se reduce, disminuyendo las tensiones requeridas para evitar la expansión y por lo tanto se produce la fisuración.

Cualquiera sea el mecanismo adoptado para la formación de etringita, la forma en que actúa sobre el hormigón es la misma. Es decir, la etringita llena los poros de la pasta de cemento, al hidratarse aumenta su volumen generando puntos de tensión localizados.

Si los valores de tensión desarrollados, superan a los valores de resistencia a la tracción de la pasta endurecida ésta se fisura. El aumento paulatino de fisuras, hace que este sea un fenómeno retroalimentado, debido a que las fisuras generadas permiten el ingreso de nuevas cantidades de agua con sulfatos en solución, que acelera el proceso de degradación.

Cuando las estructuras deban estar inexorablemente sometidas a la acción de los sulfatos, es muy importante el uso de cementos adecuados como los de Alta Resistencia a los Sulfatos ARS.

Estos cementos están limitados en el contenido de C3A. Los valores máximos permitidos son los siguientes.

MRS: Es un cemento al cual se le limita el contenido de C3A (aluminato tricálcico) a valores menores o iguales al 8 % en masa

ARS: Es el cemento conocido como ARS. La norma IRAM limita el contenido de C3A (aluminato tricálcico) a un máximo de 4 % en masa y la suma de C3A + FAC4 (ferroaluminato tetracálcico) debe ser menor o igual a 22 %, calculados teóricamente de acuerdo a la composición química.

El proyecto de Norma CIRSOC 201, establece el grado de ataque según el contenido de sulfatos presentes.

**Tabla:** Agresividad del medio ambiente en función del contenido de sulfatos según Proyecto de actualización del CIRSOC 201 (sulfatos en agua y/o en suelo expresados como  $SO_4^{2-}$ )

<b>Grado de ataque</b>	<b>En Agua: Sulfatos solubles (mg/l)</b>	<b>En Suelos: Sulfatos solubles (% en masa)</b>
Moderado	150 a 1.500	0,10 a 0,20
Fuerte	1.500 a 10.000	0,20 a 2,00
Muy Fuerte	Mayor de 10.000	Mayor de 2,00

Otro factor a tener en cuenta es la forma en que las estructuras estarán expuestas a la acción de los sulfatos, ya que el efecto del daño se verá acelerado si se presentaran ciclos de humedecimiento y secado intensos durante su vida útil.

En la observación de este efecto favorecedor del daño se fundamenta el método de ensayo acelerado propuesto.

Un factor que influye en la mayor o menor degradación sufrida por la acción de los sulfatos, es la cantidad de cemento presente por  $m^3$  de hormigón elaborado. Estudios realizados por G.J Verbeck -Performance of Concrete - University of Toronto Press lo demuestran en el siguiente gráfico.

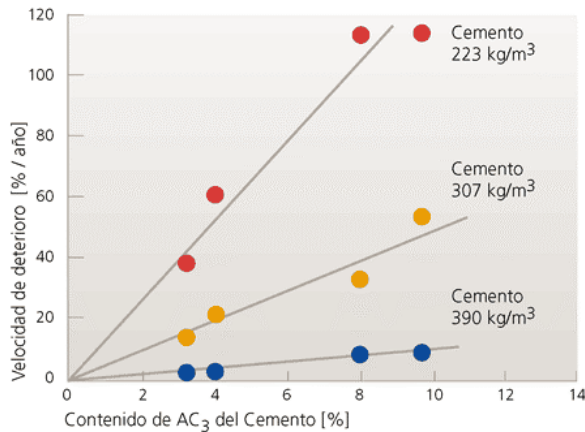


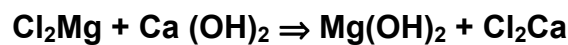
Gráfico: Efecto del C3A del cemento y del contenido de cemento del hormigón.

**Ensayos acelerados de deterioro de hormigón en sulfatos**  
(G.J Verbeck -Performance of Concrete - University of Toronto Press)

### *Acción de los Cloruros.*

En el caso de que las estructuras de hormigón estén en presencia de aguas que posean diversas formas de cloruros en solución como ser:  $\text{Cl}_2\text{Ca}$  y  $\text{Cl}_2\text{Mg}$ , siendo este último el que causa mayor daño a las estructuras, deberá tenerse en cuenta la disminución del pH del Hormigón, lo que implica la pérdida de la película de óxido protectora que recubre las barras.

La reacción de los cloruros de Magnesio con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , viene dada como:



Esta película protectora al quedar eliminada, permite la corrosión de las barras de acero, que aumenta progresivamente a medida que los cloruros van reaccionando con los componentes del cemento. Los productos de la corrosión de las barras provocan un aumento de volumen ejerciendo una presión sobre el hormigón y provocando la fisuración del mismo.

La aparición de fisuras incrementa la permeabilidad del agua con cloruros disueltos, lo que hace aún más vulnerable al hormigón armado como conjunto. Otro efecto que trae aparejado la acción de cloruros, es la pérdida de resistencia estructural, debido a que las armaduras reducen su sección resistente, debilitando al conjunto estructural.

### **Ciclos de congelamiento y deshielo**

El fenómeno se presenta en zonas donde existe una amplitud térmica considerable, alcanzando mínimos por debajo de los  $0^\circ\text{C}$  o cercanos a él y máximos que rondan los  $30^\circ\text{C}$ .

El fenómeno producido por el congelamiento del agua y su posterior deshielo, es muy perjudicial debido a que provoca un incremento de la fisuración del hormigón.

La fisuración ocurre cuando el agua que se encuentra en el interior de los poros, alcanza temperaturas lo suficientemente bajas como para producir cristales de hielo, los que al aumentar su volumen inducen tensiones en el hormigón, provocando su posterior agrietamiento afectando la durabilidad.

Con la utilización de cementos adecuados y/o el empleo de aditivos especiales, se puede lograr una mejora en el comportamiento de los hormigones frente a estos ciclos térmicos.

Otros factores que afectan la durabilidad de los hormigones y que deben ser tenidos en cuenta son las **cargas mecánicas** sufridas durante la vida de servicio y el **ataque de microorganismos**, que si bien son mencionados en el presente trabajo no serán tratados en detalle.

Todos los factores que intervienen en el desempeño de hormigones, se resumen en la siguiente tabla 4.

Factores a controlar en la construcción	Factores Medioambientales
<ul style="list-style-type: none"><li>• Composición del Cemento</li><li>• Propiedades de los agregados</li><li>• Composición del Hormigón, particularmente relación a/c</li><li>• Adiciones y Aditivos</li><li>• Armaduras de Refuerzo</li><li>• Práctica de construcción: pastones (batching), mezclas, disposición y consolidación</li><li>• Curado.</li><li>• Composición del Cemento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ciclo de Congelamiento y Deshielo.</li><li>• Ataque de Sulfatos.</li><li>• Ataque de Cloruros.</li><li>• Ataque de Ácidos.</li><li>• Lixiviación de Ca (OH)<sub>2</sub>.</li><li>• Abrasión – erosión.</li><li>• Biodegradación.</li></ul>

**Tabla 4**

## **5. DESARROLLO DE UN ENSAYO ACELERADO PARA LA DETERMINACIÓN DE EFECTOS DEBIDO A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS SOBRE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.**

Para el desarrollo de la propuesta de ensayo acelerado, se ha recurrido a la norma *ASTM E 632 – 82* (Reaprobada en 1996). Esta norma da los lineamientos generales que deberían utilizarse para realizar un ensayo acelerado con la finalidad de predecir el comportamiento durante la vida de servicio de componentes estructurales.

El objetivo de la norma es dar un perfil de predicción sistemático para la vida de servicio, incluyendo la identificación de las características críticas de desempeño y necesidades de información para el desarrollo del ensayo, la interpretación de los datos y el informe de los resultados.

Esta norma tiene implementado esquemáticamente un seguimiento de los pasos a seguir para lograr una correcta ejecución de los ensayos. Fig.1 (diagrama)

*Identificación de las características críticas de desempeño para ser utilizadas como indicadores de degradación.*

No obstante ser la durabilidad la característica más importante a tener en cuenta, una de las propiedades que permite evaluar la calidad de un hormigón, incluyendo su durabilidad, es su resistencia mecánica.

Una elevada resistencia mecánica mantenida durante toda la vida de servicio, permite predecir una durabilidad por igual período.

La resistencia mecánica de un hormigón es dependiente de varios factores que van desde la calidad y naturaleza de los componentes empleados como materia prima, su formulación, su elaboración, colocación, terminación y curado.

Otra de las propiedades a tener en cuenta es la permeabilidad al agua, no sólo por ser ésta la vía de liberación de radionucleídos al ambiente, sino que es también uno de los factores de degradación más importante especialmente cuando lleva en solución especies reactivas.

Generalmente cuando un hormigón posee una alta resistencia mecánica también posee una baja permeabilidad al agua, no obstante, no siempre se da esta situación ya que se han encontrado hormigones con igual resistencia mecánica y diferentes permeabilidades. Por lo tanto la permeabilidad al agua es una propiedad importante que debe ser considerada cuando se evalúa su calidad.

También la calidad del hormigón dependerá de su resistencia al ataque químico de especies que, reaccionando con los componentes del hormigón afectan su integridad por formación de productos de reacción expansivos o solubles y también productos conducentes a favorecer la corrosión de las barras de la armadura de refuerzo.

Si bien los estudios de emplazamiento de un futuro repositorio tendrán en cuenta condiciones ambientales que favorezcan a la durabilidad de las barreras, una propiedad que permite evaluar la calidad del hormigón es la resistencia al stress provocado por el congelamiento y deshielo del agua de poro. En particular esta resistencia deberá ser evaluada en la etapa de construcción y operación del repositorio, período en el cual la estructura se encuentra en superficie, no así en su etapa de aislamiento, en la cual permanecerá cubierta.

Resumiendo entonces, las características críticas de desempeño para ser utilizadas como indicadores de degradación de un hormigón serán las siguientes:

- Resistencia mecánica
- Permeabilidad al agua
- Resistencia al ataque de agentes químicos
- Resistencia a la corrosión de las armaduras de refuerzo
- Resistencia al congelamiento y deshielo

### **5.1 Requerimientos de desempeño**

Se considerará, para el presente ensayo, como requerimientos mínimos de desempeño mantener la integridad de la estructura durante toda su fase de servicio (operación y aislamiento), con iguales características de las propiedades de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión química y de armaduras, baja permeabilidad, baja porosidad, reacción negativa al álcali agregado y resistencia a los sulfatos, que las obtenidas al inicio de su fase operativa.

Los rangos de valores serán aquellos que al momento de la construcción hayan sido obtenidos o prefijados en la etapa de diseño.

No obstante, y con el fin de lograr una definición que permita realizar una evaluación de los resultados de los ensayos de durabilidad, se utilizarán como indicadores de degradación, valores extraídos de los estudios anteriores y de la bibliografía.

### **5.2 Caracterización de los componentes que intervienen e identificación de los mecanismos de degradación**

Se pueden identificar como componentes e interfases de las estructuras de hormigón los siguientes elementos:

- HORMIGON
- INTERFASE BARRAS-HORMIGON
- BARRAS DE REFUERZO
- COBERTURA INTERNA HORMIGON
- COBERTURA EXTERNA HORMIGON

Los factores que afectan la durabilidad de estos componentes y en consecuencia la vida de servicio de la instalación de disposición final, se deben considerar desde dos aspectos. Uno con relación al diseño y construcción de las estructuras y otro considerando las características del sitio de emplazamiento causantes de su degradación.

En el presente trabajo se ha considerado como propiedades a ser utilizadas como indicadores de degradación a las mismas propiedades críticas de desempeño para cada componente o interfase.

La caracterización completa de los componentes y materiales a ser evaluados se ha llevado a cabo en estudios anteriores y los resultados allí obtenidos son utilizados en el presente trabajo. Los mecanismos de degradación, que induzcan cambios en las propiedades antes mencionadas, son extraídos de la bibliografía.

En la tabla 5 se muestra un ejemplo de una matriz que permite la identificación de algunas de las propiedades que pueden indicar degradación para cada uno de los componentes de la estructura.

Elementos a Analizar	Inspección Visual							Cambios medidos											
	Crecimiento de Micro - Organismos	Apariencia General	Cuarteo Superficial	Fisuración	Eflorescencia de Sales en sup.	Ampollamiento	Aparición de Óxido superficial	Descascaramiento	Color	Absorción de Agua	Permeabilidad	Absorción Capilar	Cambio en las Diemisiones	Corrosión de barras de Acero	Resistencia a la Compresión	Resistencia a la Flexión	Resistencia a la Tracción	Módulo de Elasticidad	Módulo de Rotura
Hormigón																			
Interface Barras de Refuerzo																			
Barras de Refuerzo																			
Cobertura Interna del Hormigón																			
Cobertura Externa del Hormigón																			

**Tabla 5**

En cuanto al tipo y rango de degradación, sus valores límites dependerán lógicamente de las condiciones a la que estará expuesta la estructura y todos sus componentes durante toda la vida de servicio para la cual se proyectó. No obstante, en esta etapa se identificarán y cuantificarán los cambios inducidos en los materiales y/o elementos que componen la estructura.

### **6. DESCRIPCION DEL ENSAYO ACELERADO PROPUESTO**

El ensayo que a continuación se propone corresponde a lo indicado como pre - ensayo según la norma ASTM E -632-82. El pre – ensayo tiene como finalidad demostrar de una manera rápida los cambios en las propiedades de los diferentes componentes o materiales cuando son expuestos a niveles extremos de degradación.



La propuesta de ensayo tiene como finalidad establecer una metodología que permita obtener a corto plazo cuál es el rango de deterioro que produciría la presencia de iones del sulfato del medio sobre las estructuras de hormigón en condiciones desfavorables.

La ASTM establece dos métodos de ensayos acelerados, la norma ASTM C452, “Standard Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate”, y la ASTM C1012, “Test Method for Length Changes of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution”.

Ambos métodos han sido fuertemente criticados por diversos investigadores debido a que muchos de los resultados obtenidos no manifiestan el comportamiento real de los hormigones.

Las críticas efectuadas son mostradas en la Tabla 6.

<b>Críticas</b>	<b>Referencia</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las causas de la expansión no son determinadas por el ensayo, además de no dar información de la formación de etringita durante su ensayo y la expansión.</li> </ul>	Idorn, Johansen y Thaulow (1992).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la ASTM C452, la adición de sulfatos no es representativa de las condiciones reales de campo, ambas, ASTM C452 y ASTM C 1012 son sensitivas también a la medida de las probetas y la geometría adoptada.</li> </ul>	Tumidajsky y Ture (1995)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La ASTM C452 no es representativa de las condiciones de campo debido a que un inadecuado curado del cemento, resulta en compuestos de cemento sin hidratar, los que están siendo expuestos al ataque. El factor de fisuración no es tenido en cuenta por ambas normas.</li> </ul>	Metha y Gjorv (1974).
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ambas normas de la ASTM, ignoran la condición del ataque ácido de sulfatos, el cual es muy típico de las condiciones reales de campo.</li> </ul>	Metha (1975)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La composición del cemento afecta la tasa en la que se consumen los iones de sulfato, introduciendo variaciones en la metodología de ensayo de la ASTM C 1012. El pH durante el ensayo está entre 3 a 5 órdenes de magnitud diferentes de las condiciones reales de campo. El ensayo de la norma antes citada es prolongado, porque las cantidades de iones de sulfato disminuyen en la solución durante el ensayo.</li> </ul>	Brown (1981)

Ref: Departamento de Transporte de California, “Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Hydraulic Cements for Caltrans LLPRS Program”.

**Tabla 6**

Ambas normas correlacionan el daño provocado por acción de los sulfatos por medio de la expansión de las probetas debido a la formación de etringita.

Por otro lado, Metha y Gjorv proponen en su metodología de ensayo, el uso de la pérdida de resistencia a la compresión como una medida del daño debido a la acción de los sulfatos.

Esta metodología de predicción se basa en que ambos investigadores sostienen que la fisuración causada por la formación de etringita y su consecuente expansión, así también como la pérdida de C-S-H, afectan adversamente la resistencia a la compresión en el futuro.

Como base de esta propuesta, se ha tomado como modelo el método propuesto por el Departamento de Transporte de California, “Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Hydraulic Cements for Caltrans LLPRS Program”.

Las modificaciones realizadas a la metodología de ensayo tomada como base, se han realizado ajustándose también a las necesidades y requerimientos del proyecto que nos ocupa.

La propuesta de ensayo planteada en este trabajo, adopta como parámetro de medición del daño causado por la acción de sulfatos, la pérdida de resistencia a la compresión. Además, en el ensayo se ha incorporado un factor adicional relacionado con el envejecimiento propio de la etapa de operación de la estructura, como es la aparición de micro-fisuración. Este estado de fisuración podría representar condiciones extremas de las estructuras luego de un período prolongado de servicio.

Además, para acelerar el proceso de degradación se propone someter a las probetas a un ciclo de humedecimiento y secado de la superficie al aire. Este fenómeno es observado en bases off- shore de torres de perforación para la obtención de petróleo.

Las siguientes fotos muestran este fenómeno.



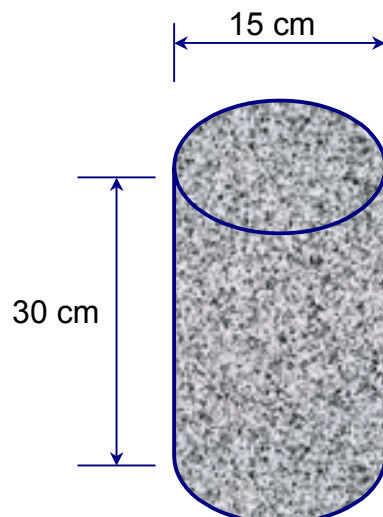


Esta forma de determinar el efecto de los sulfatos, permitirá además correlacionar los resultados obtenidos con el resto de los ensayos que expresan diversas formas de comportamiento por medio de la resistencia. Además, como se mencionó anteriormente, uno de los factores que más influye en la durabilidad de las estructuras, es la resistencia a la compresión y la invarianza de su valor en el tiempo.

Otra ventaja de establecer la correlación de los efectos por medio de esta metodología, es que permite determinar la relación o grado de deterioro de las probetas sometidas a un ambiente agresivo, frente a probetas que han sido confeccionadas y ensayadas bajo condiciones normales.

Para el ensayo se utilizarán probetas cilíndricas de hormigón, confeccionadas con el tipo de cemento previamente seleccionado en la etapa de la elaboración de las estructuras de prueba.

Las dimensiones de la probeta son las siguientes:



El número de probetas mínimo a utilizar en el ensayo será de 8 en cada etapa. Los tiempos establecidos para las distintas etapas son:

- 7 días
- 14 días
- 28 días
- 60 días

Las condiciones de curado serán dadas en atmósfera normal (RH 100% y 25°C), de modo que las probetas sólo estén en contacto con ambiente agresivo, en el momento del ensayo.

Una vez que las probetas han sido curadas, deben ser preparadas para comenzar con el ensayo.

La preparación consiste en aplicar una pequeña carga de tracción, en un valor igual al 30% de la resistencia a la tracción obtenida al ensayar las estructuras de prueba.

El objetivo de aplicar esta carga, es provocar o inducir la formación de microfisuras que aceleren el ingreso de la solución de sulfatos.

Este grado de fisuración permite una mayor penetración de la solución, como así también brinda una correlación más aproximadas con las condiciones de servicio reales a largo plazo.

Una vez sometida la probeta a la carga mencionada, ésta será inspeccionada con el fin de determinar el grado y tipo de fisuración. Para ello se realizará una observación microscópica y se utilizará una técnica de medición apropiada a tal fin.

Una vez que las probetas están en condiciones de ser sometidas a la acción de los sulfatos, estas se sumergirán en una solución de Sulfato de Sodio al 4% (NaSO<sub>4</sub>). De esta manera se logra acelerar los efectos, ya que las concentraciones que establece la norma CIRSOC 201 para determinar el grado de ataque, es inferior al valor a utilizar.

La Norma establece que para un grado de ataque “Fuerte”, los valores de las concentraciones son:

- Valores Límites de sulfatos contenidos en aguas en contacto con estructuras de hormigón: **mayor de 10.000 mg / Litro**
- Valores Límites de sulfatos contenidos en suelos en contacto con estructuras de hormigón: **mayor de 20.000 mg / Kg.**

Debido a que es necesario que el contacto de las probetas con la solución sea total, las mismas van apoyadas sobre un soporte similar a una rejilla para que la acción de los sulfatos sea uniforme en todas las caras.

El pH de la solución se mantendrá constante durante todo el ensayo, esto permitiría obtener las mismas condiciones durante el ensayo que las que existirían en la zona de emplazamiento durante la vida de servicio.

El valor de pH al que estarán sometidas las probetas será de 7.2. Valor promedio de aguas subterráneas. Valores menores que este no se presentarían en el lugar de emplazamiento, debido a que las condiciones de proyecto limitan el emplazamiento de repositorios en zonas donde puedan existir medios agresivos ácidos.

Como se mencionó anteriormente, se propone además someter a las probetas a un ciclo de humedecimiento y secado de la superficie al aire.

Este efecto hace que el daño por acción de sulfatos se acelere, ya que al quedar la probeta con su superficie expuesta al aire (la que previamente ha estado en contacto con la solución), tiene mayor vulnerabilidad al ingreso de los sulfatos hacia su interior.

Se proponen ciclos de humedecimiento y secado de 24 Hs cada uno. El tiempo de cada ciclo se fijado en función de razones prácticas y de operación de los laboratorios.

Una vez que se ha concluido el periodo establecido para cada etapa de ensayo, las probetas serán sometidas a ensayos de compresión.

La resistencia a la compresión deberá ser comparada con la resistencia obtenida por los ensayos de resistencia estándar. Al mismo tiempo se ensayarán probetas previamente traccionadas, logrando de esta forma obtener una correlación completa de los resultados.

Los valores de la variación en la resistencia, serán tenidos en cuenta según la siguiente expresión.

$$\Delta\sigma_b = (\sigma_{\text{final}} - \sigma_{\text{inicial}}) / \sigma_{\text{inicial}} \times 100$$

El valor de  $\sigma_{\text{inicial}}$  es el que corresponde a la resistencia a la compresión de las probetas preparadas y de las ensayadas en condiciones normales, correspondientes al ensayo a la compresión estándar.

El rango de tolerancia de  $\Delta$ , será definido luego de establecer todas las condiciones y valores límites de los factores de degradación. Los rangos definidos serán utilizados como límites en el proceso de ensayo definitivo.

Una vez definido el rango de los factores de degradación, se recurre a la ejecución del ensayo acelerado según lo establecido por la ASTM E -632-82.

### **7. Alternativa propuesta para el Diseño de un Contenedor para albergar 18 bultos de residuos radiactivos acondicionados**

Bajo el concepto de durabilidad e integridad estructural, el diseño de la estructura juega un rol fundamental, ya que este es un factor de gran relevancia.

Persiguiendo la finalidad de lograr estructuras estancas, de baja permeabilidad y durables a lo largo del tiempo, la forma que deben ser calculadas y diseñadas estas estructuras, obliga a la utilización de métodos avanzados de cálculo tanto para la geometría como para la disposición de sus armaduras.

En este trabajo se ha diseñado, modelado y calculado un contenedor destinado a alojar 18 bultos de residuos radiactivos acondicionados.

Para el análisis de carga, se ha estimado el peso de los bultos en 500 Kg. cada uno.

500 Kg. x 18 bultos.....	9000 Kg.
Peso Propio de la Tapa del Contenedor	
0.35m x 2m x 2m x 2400 Kg./m <sup>3</sup> .....	3360 Kg.
Peso Propio del Contendor.....	15300 Kg.
<b>Peso Total del Conjunto.....</b>	<b>27660 Kg.</b>

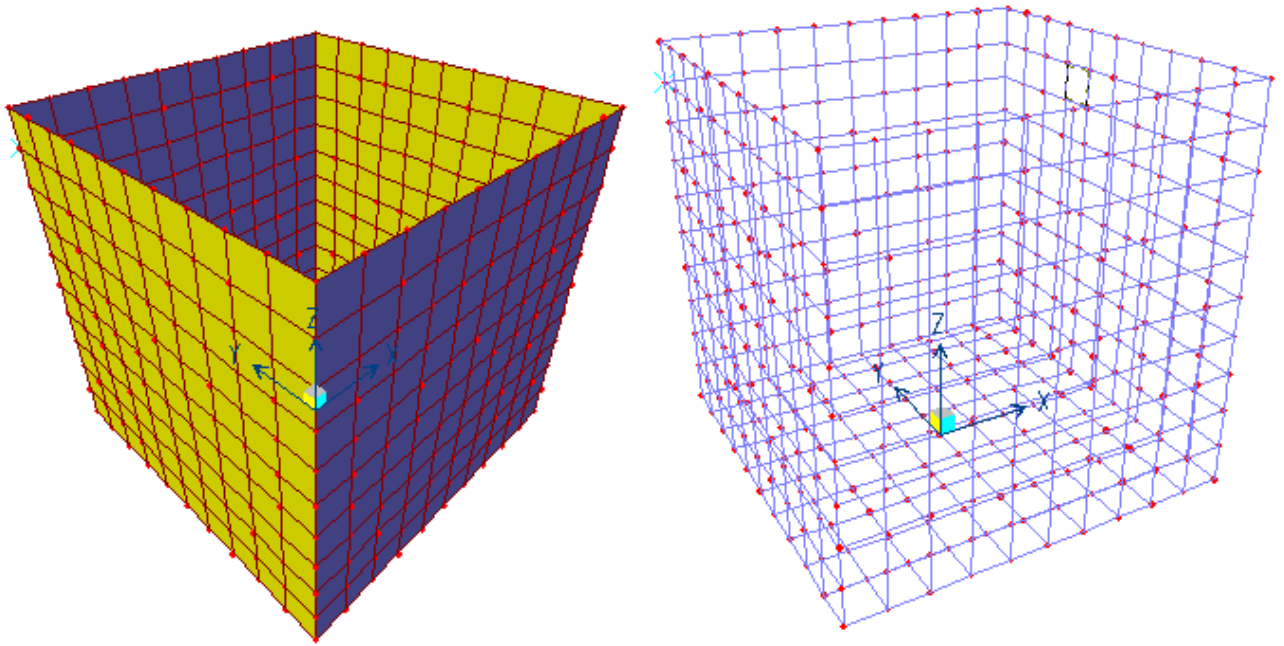
Para el análisis estructural del contenedor se ha recurrido a la utilización de un modelo de elementos finitos.

La estructura ha sido modelada en el programa SAP 2000 Non Linear, mediante una discretización de elementos planos isoparamétricos de 4 nodos.

Los estados de carga han sido considerados de manera que sean contempladas todas las situaciones posibles, ya sean las debidas a la forma de disposición de los contenedores dentro de las celdas del repositorio, como así también las situaciones correspondientes al izado del mismo.

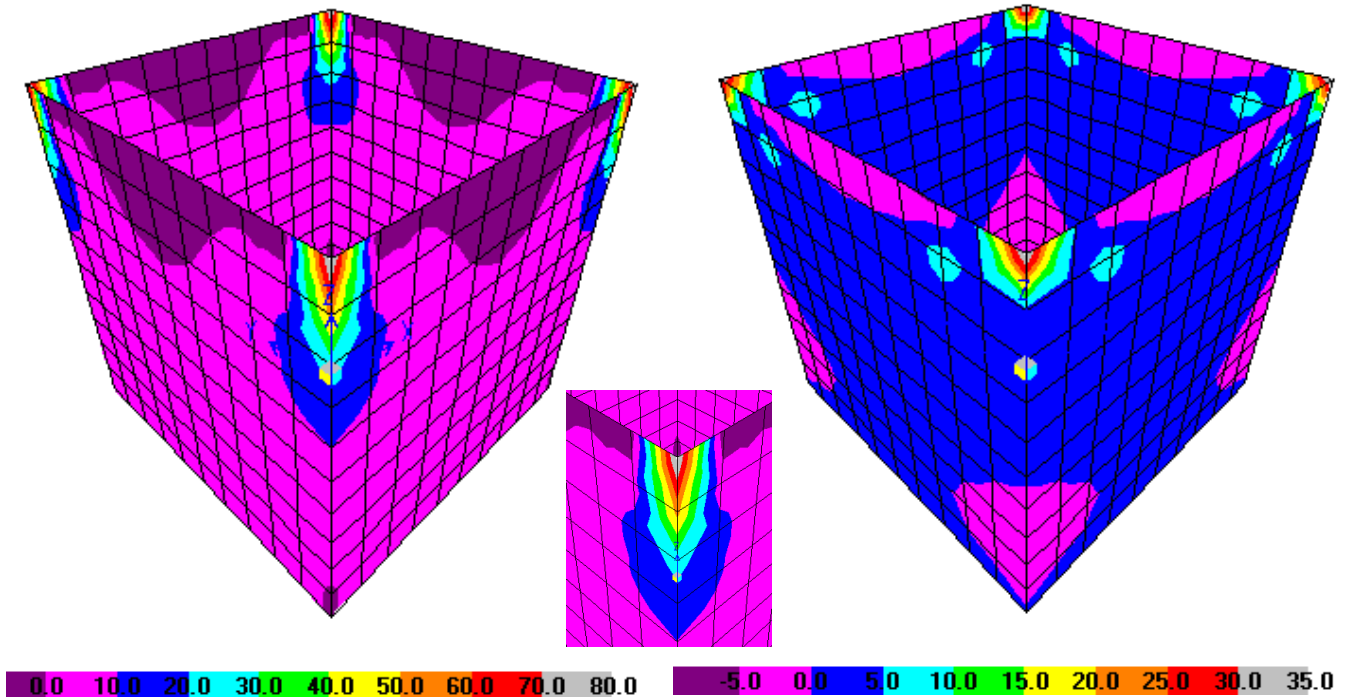
Esta forma de abordar el análisis, permite conocer con precisión el valor y la ubicación de puntos localizados de tensión.

A continuación se muestran algunos esquemas del modelo de elementos finitos utilizado. Figura 2.



**Figura 2:** Esquema del modelo de elementos finitos utilizados

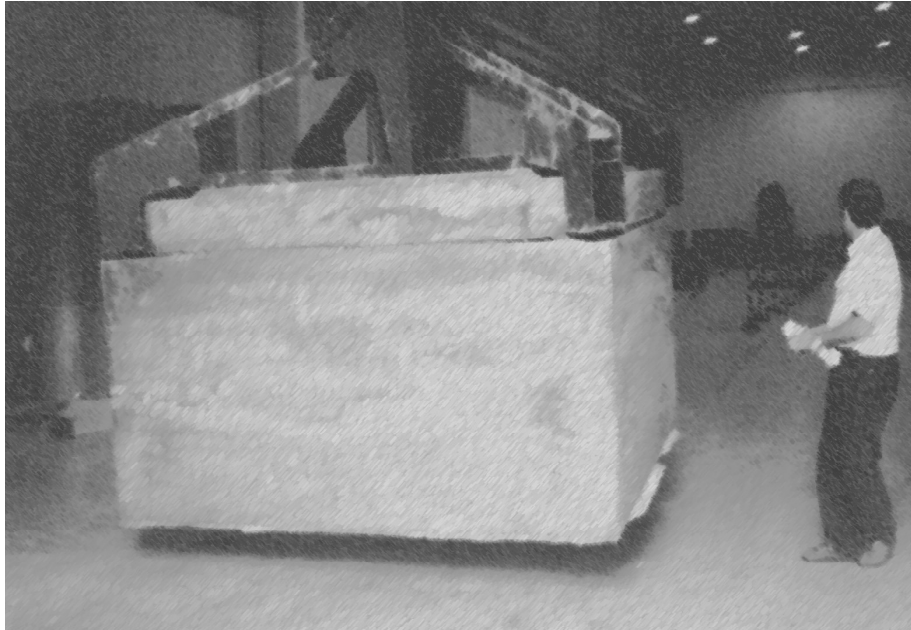
De todos los estados de carga considerados, el que presenta mayores problemas desde el punto de vista tensodeformacional, es el que corresponde al izado. Para esta operación, los contenedores son tomados de la parte superior por una estructura metálica. De forma que existe una concentración de tensiones en los bordes superiores. Este efecto se puede ver en las Figuras 3 y 4.



**Figura 3:** Tensiones en dirección vertical durante estado de montaje [t]

**Figura 4:** Tensiones en dirección horizontal durante estado de montaje [t]

El estado tensional mostrado por las figuras 3 y 4, determina los esfuerzos a ser considerados en el cálculo de las armaduras. Es un estado biaxial de tensiones, en dónde la tracción mayoritaria en las paredes del hormigón, obliga confeccionar un adecuado esquema de armaduras.



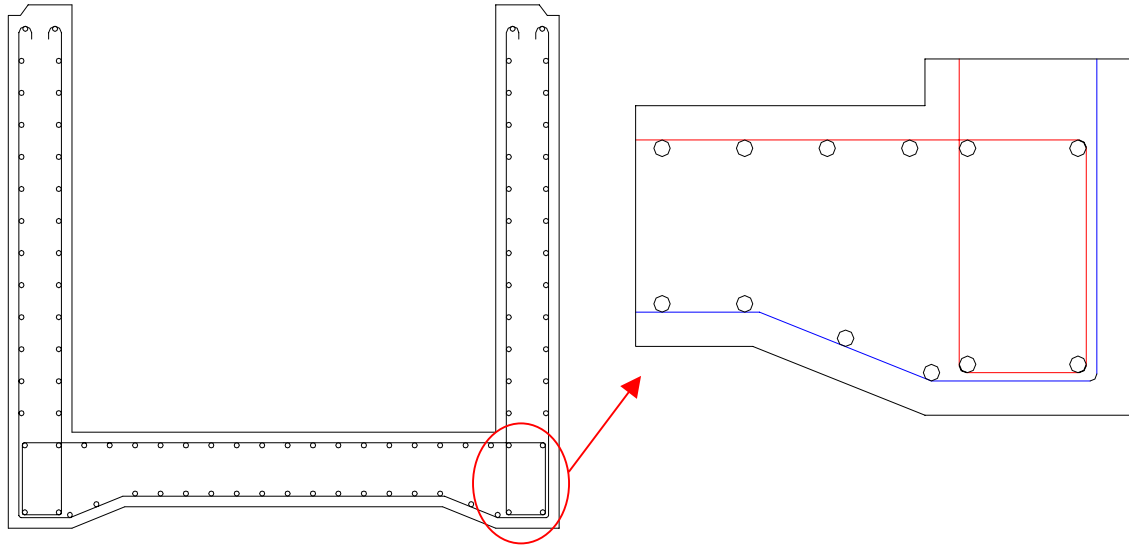
Una propuesta, es el estriado de las esquinas en la zona de tracción elevada. Esta decisión se ha adoptado con la finalidad de lograr una mayor adherencia entre el hormigón y la barra de acero destinada a transmitir la carga de tracción a la estructura de izado.

Otra propuesta de relevancia, es la forma en que se coloca la armadura de fondo y la continuidad que se le da en la pared.

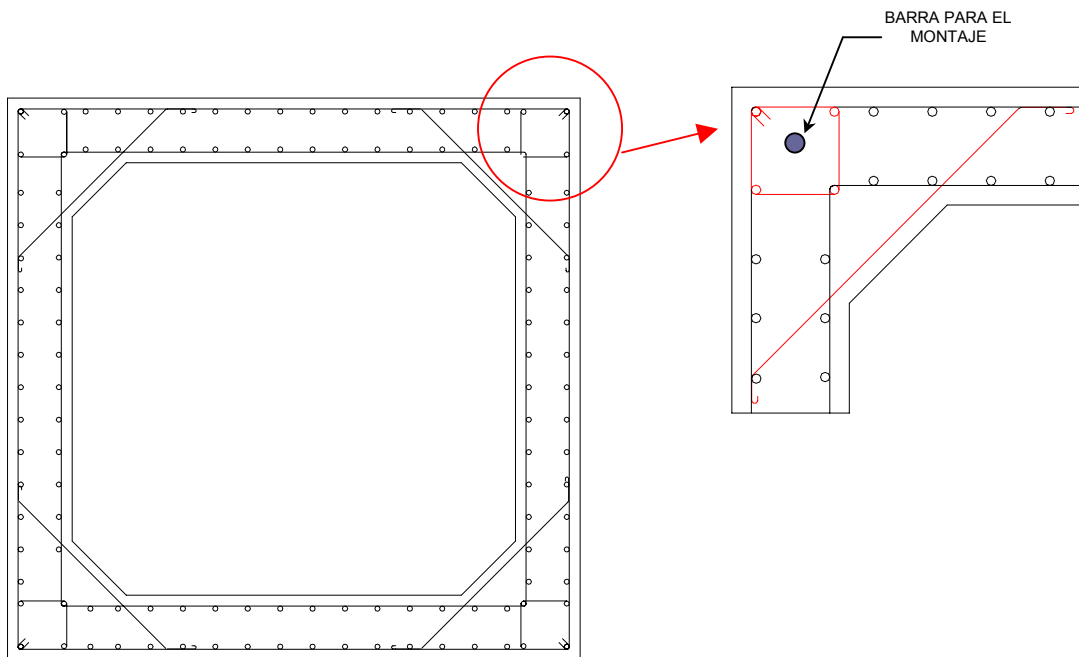
Se observa que el diseño de la armadura es tendiente a confinar la zona de unión de la pared con el fondo, la que es muy vulnerable a la formación de fisuras, debido a que existen puntos localizados de tensión.

La fisuración o agrietamiento, provocaría una disminución de la estanquidad de los contenedores. Ver figura 5 y 6.





**Figura 5:** Esquema de armaduras de fondo. La armadura interna (Rojo), provoca debido a su configuración un confinamiento del  $H^o$ , evitando que se produzcan fisuras en puntos localizados donde pueda existir tensiones de tracción.



**Figura 6:** Esquema de armaduras de paredes y esquinas. Los estribos de las esquinas y refuerzo diagonal (Rojo), mejoran la adherencia entre la barra destinada a soportar la carga de montaje y el homigón que la rodea. De esta manera se minimiza la formación de fisuras

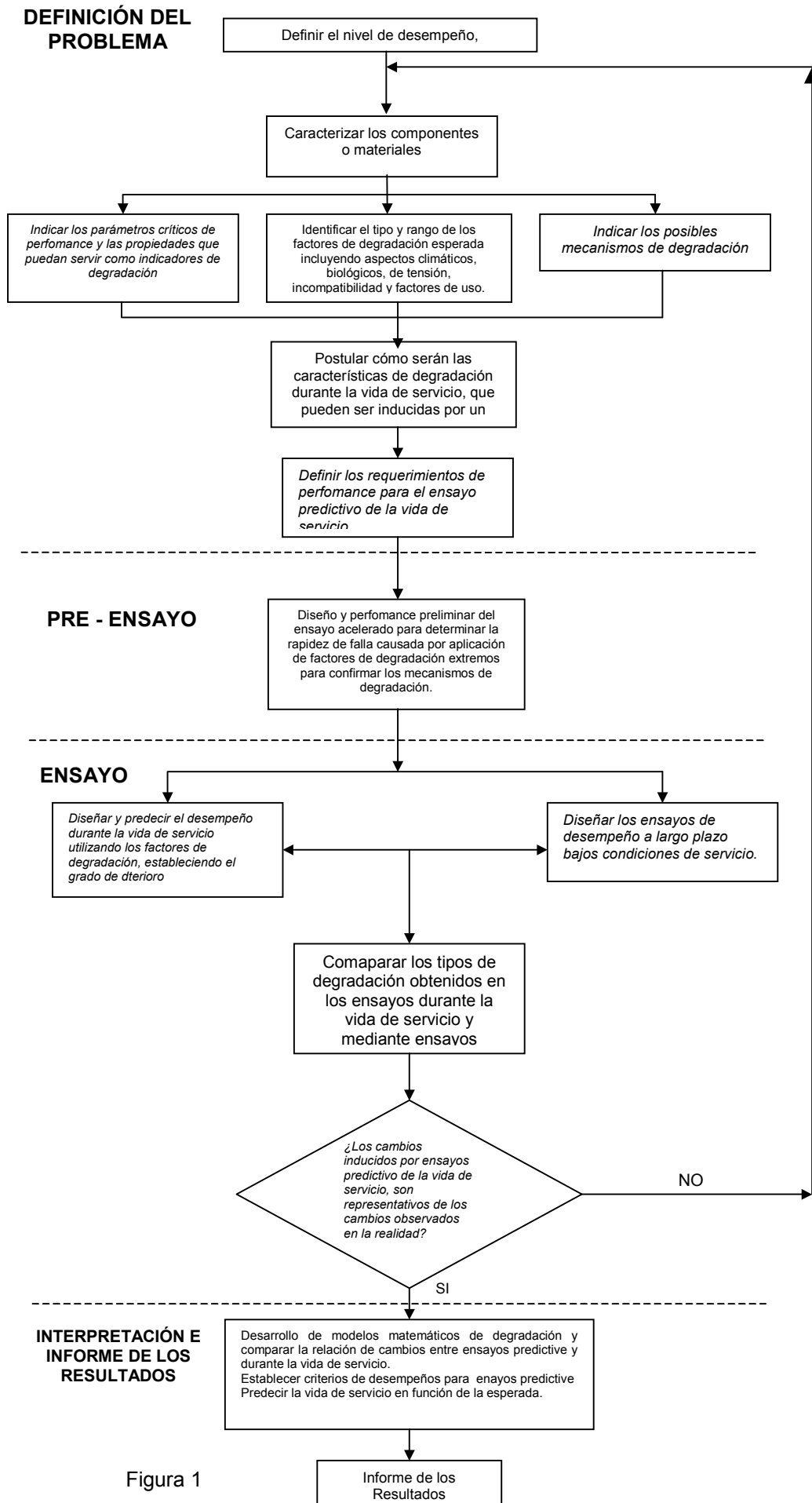


Figura 1

## **8. Conclusiones**

La propuesta de ensayo desarrollada, es una primera aproximación de la metodología a emplear para obtener todos los resultados referentes a la acción destructiva que tienen los sulfatos sobre las estructuras de Hormigón.

Dado los tiempos ofrecidos para la elaboración de este trabajo, no se ha podido llevar a cabo el ensayo en forma experimental, pero sí se han tendido en cuenta todos los detalles que intervienen.

No obstante, se sugiere realizar al mismo tiempo, ensayos que contemplen el comportamiento durante la etapa operativa de vida de servicio, de modo que se pueda establecer una correlación entre los ensayos acelerados y los resultados que se vayan observando.

Además, en paralelo a este ensayo propuesto se hace necesario establecer la influencia de todos los otros factores de degradación no contemplados en el mismo, que pudiesen tener un efecto sinérgico, como así también tener en cuenta que no siempre la suma de efectos independientes es igual o mayor en daños que pudiesen producirse al analizar uno sólo de los factores de degradación.

Es conveniente entonces basarse en la hipótesis que todas las combinaciones posibles y los efectos producidos se han tenido en cuenta con el fin de predecir el comportamiento y el nivel de prestación exigido. Sólo cuando ello haya sido verificado mediante los ensayos correspondientes será posible estimar la durabilidad de las estructuras.

Con relación a la propuesta de la alternativa de diseño para un contenedor para albergar bultos de residuos radiactivos acondicionados, la misma fue realizada con la intención de mejorar el comportamiento de dichos contenedores durante las diversas etapas de su operación.

Se han propuesto configuraciones para el armado de las barras de refuerzo, de modo que se minimice la posibilidad de formación de fisuras, como así también se han adoptado espesores de recubrimiento con la finalidad de disminuir y retrasar el avance de sustancias nocivas. El diseño elaborado cumple con los requerimientos de resistencia y facilidades constructivas.

## **9. Bibliografía:**

- *"Características del Hormigón empleado como Encamisado Interno de Tambores destinados a contener Residuos Radiactivos Inmovilizados"* - Telma Ramallo, Marta H. de Pahissa, Pedro Soto; presentado en la XIX Reunión Científica de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear - Buenos Aires Noviembre 1991.
- *"Durable Concrete for Medium Radioactive Waste in a Surface Disposal Facility"* Telma Ramallo, Marta H. de Pahissa, Myriam Lavallo, Leonardo Checmarew, Alejandra Benitez, Gabriel Mansilla, Norberto Fernandez Luco; - presentado en el SMIRT 13 Post Conference - Seminar 10 - Waste Repository Technology and Management - Iguazú, Argentina - 1995
- *Hormigones de Alta Prestación y su utilización como barrera de Ingeniería* Telma Ramallo, Adrian Goldschmidt, Carlos Bojorge, Myriam Lavallo, (CNEA) y Leonardo Checmarew, Alejandra Benitez, Alejandro Storani y Enrique Chiora (INTI), Ingeniería 2000, Buenos Aires, 2000.
- *Portland Cement Paste and Concrete.* Itzhak Soroka.1979
- *Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing.* Sendor Popovics.1992.
- *Tecnología del Hormigón Fresco.* Ing. Daniel Bascoy. 1992.
- *Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Hydraulic Cemenets for Caltrans LLPRS Program.* J.M.Monteiro,Jeffery Roesler, Kimberly E. Kurtis, John Harvey. April 2000. Pavement Research Center Institute of Transportation Studies. University of California,Berkeley.
- *Corrosión por Carbonatación. Espesor y Calidad del Recubrimiento.* Ing. Luis Fernández Luco. 2000.
- *Some Considerations in the Evaluation of Concrete as a Structural Material for Alternative LLW Disposal Technologies.* D.R. MacKnezie, B. Siskind and B.S.Bowerman. Departament of Nuclear Energy Brookhaven National Laboratory. Upton. New York. 1973.
- *Adaptación del Artículo publicado en ACI Concrete International.* Marzo de 2002. Vagn C. Johansen, Waldemar A. Klemm, and Peter Taylor

- *Standard Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials.* ASTM E 632 – 82 (Reapproved 1996).
- *Long – Term Performance of Engineered Concrete Barriers.* J.R.Clifton, James M. Pommersheim, Kennet Snyder. July 1995. Building and Fire Laboratory National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg.
- *Ficha Técnica Nº 4. Del Hormigón Fresco al Hormigón Endurecido.*
- *Vida Útil y Diseño por Corrosión de las Estructuras de Hormigón Armado.* Luis P. Traversa. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. LEMIT.
- *Concrete Durability.* Paul J. Tikalsky, Bryant Mather, Jan Olek.
- *High Strength Concrete – Durability Investigations by Using the CDF – Test – First Results.* R. Krumbach, K. Seyfarth. W. Erfurt, K. Friedemann. 1998.
- *Curso Regional de Capacitación sobre Gestión de Residuos Radiactivos de Baja Actividad.* Telma Ramallo. Organismo Internacional de Energía Atómica. Comisión Nacional de Energía Atómica. 1994.