



**Universidad
de Valparaíso**
CHILE

Facultad de Ingeniería
Escuela de Construcción Civil

Influencia de la Adición de Dióxido de Titanio en la Durabilidad del Mortero de Cemento

Por
Francisco Aldunate Allegro

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CONSTRUCTOR

Prof. Guía: Dra. Patricia Martínez R.

Diciembre - 2014

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la profesora, Dra. Patricia Martínez, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica, por su tiempo, paciencia y por permitir trabajar en un marco de confianza y libertad fundamentales para la realización de este trabajo y en la formación profesional.

Agradezco los encargados de Laboratorio de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en especial consideración a don Mauricio Guerra, por su disposición y apoyo en todo momento.

A los profesores de la carrera de Ingeniería en construcción, por haber sido grandes formadores de conocimientos esenciales, para llegar a esta etapa de carrera profesional.

Agradezco los encargados de Laboratorio de la Universidad de Valparaíso por permitir trabajar en un ambiente cálido y alegre, por su disposición y confianza para el desarrollo del tema.

También a la secretaría de nuestra escuela; las Srtas. Emperatriz y Fabiola, por haber aguantado durante 5 años, las inquietudes y problemas de cada alumno.

Agradezco a mi familia por el apoyo y los valores que me entregaron para lograr salir adelante.

A mis compañeros, a cada uno de ellos, por su participación, compañerismo y lo más fundamental, la amistad entregada por cada uno de ellos.

*Quiero agradecer de todo corazón.
A todos, muchas gracias.*

Índice

Lista de Tablas.....	6
Lista de Figuras	7
1 ANTECEDENTES SOBRE PROCESOS FOTOCATALICOS	8
1.1 Evaluación del dióxido de titanio en el cemento	8
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo general.....	10
1.2.2 Objetivos específicos	10
1.3 Hipótesis.....	10
1.4 Alcances	10
2 ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE LA FOTOCATÁLISIS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	11
2.1 Gases emitidos al ambiente.....	11
2.1.1 Fuentes de emisión gases SO _x y NO _x	11
2.1.2 Registro de emisiones y transferencia de contaminantes en Chile	12
2.2 La fotocatalisis	16
2.2.1 Experiencia de uso de TiO ₂ en matrices cementicias en base a cemento.....	17
3 ANTECEDENTES GENERALES SOBRE DURABILIDAD	20
3.1 Aspectos generales	20
3.2 Factores que afectan la durabilidad.....	21
3.2.1 Efectos mecánicos	23
3.2.2 Efectos físicos	23
3.2.3 Efectos químicos	24
3.2.4 Efectos biológicos	29
3.3 Porosidad.....	29
3.4 Permeabilidad	30
3.5 Factores que influyen en la permeabilidad	30
3.5.1 Influencia relación agua / cemento	30
3.5.2 Influencia del curado	31
3.5.3 Influencia de los aditivos y adiciones	31
3.6 Relación de permeabilidad y porosidad.....	31

3.7	Carbonatación	33
4	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	35
4.1	Programa experimental	35
4.2	Diseño experimental	35
4.2.1	Pasos a seguir para la confección de probetas de mortero.	37
4.2.2	Nomenclatura de probetas	42
4.3	Ensayos en laboratorio.....	43
4.3.1	Ensayo de consistencia	43
4.3.2	Ensayo de contenido de aire	43
4.3.3	Ensayo de resistencia a compresión	44
4.3.4	Absorción capilar.....	45
4.3.5	Permeabilidad al agua.....	46
4.3.6	Permeabilidad al aire (método Torrent).....	47
4.3.7	Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de NO _x	50
4.3.8	Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de compuestos orgánicos.....	51
5	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
5.1	Ensayo de consistencia	52
5.2	Ensayo de contenido de aire	55
5.3	Ensayo de compresión	55
5.4	Absorción capilar.....	58
5.5	Permeabilidad al agua.....	62
5.6	Medición de la permeabilidad al aire.....	63
5.7	Análisis y medición de la actividad fotocatalítica.	65
5.7.1	Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de NO _x	65
5.7.2	Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de compuestos orgánicos.....	68
6	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.....	70
6.1	Conclusión	70
6.2	Futuras investigaciones.....	72
	Referencias	73

ANEXOS	76
Anexo 1: Granulometría del árido	76
Anexo 2: Datos de resistencia ensayados a los 7, 14 y 28 Días	77
Anexo 3: Datos de absorción ensayados a los 28 Días.....	77
Anexo 4: Datos de absorción ensayados a los 56 Días.....	79
Anexo 5: Datos de absorción ensayados a los 90 Días.....	80
Anexo 6: Datos de permeabilidad al agua 28 y 56 días.....	82
Anexo 7: Datos de permeabilidad al aire 90 días.	82
Anexo 8: Datos de reducción de NO _x	83

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Emisión de gases SO_2 y NO_x	14
Tabla 3.1 Clasificación de agentes agresivos y sus efectos.	22
Tabla 3.2 Agentes químicos habituales en el hormigón u mortero	25
Tabla 4.1: Dosificación de morteros de prueba.....	37
Tabla 4.2 Especificaciones técnicas del TiO_2	38
Tabla 4.3 Diseño factorial	41
Tabla 4.4 Medición de permeabilidad al aire	49
Tabla 5.1 Tabla de consistencia de un mortero	52
Tabla 5.2 Grado de mortero para revestimiento según resistencia especificada, f_{mr}	57
Tabla 5.3 Aplicaciones típicas según grado de mortero.....	57
Tabla 5.4 Tabla de resultados de permeabilidad al aire 28 días.....	64

Lista de Figuras

Fig.2.1: Emisiones NO _x al Aire en Sitio (Fuentes Fijas) por rubro, Total País, 2009 ..	15
Fig.2.2: Emisiones SO ₂ al Aire en Sitio (Fuentes Fijas) por rubro, Total País, 2009 ...	15
Fig.2.3: Proceso de degradación de compuestos orgánicos	18
Fig.3.1: Representación esquemática de material de igual porosidad.....	32
Fig.4.1: Diagrama de flujo de la investigación	36
Fig.4.2: Árido tamizado según NCh 165.....	39
Fig.4.3: Mezcladora con capacidad de 80 lt.	39
Fig.4.5: Esquema y detalle del método Torrent	48
Fig.4.6: Analizador de gases	51
Fig.4.8:Fotoreactor	51
Fig.5.1: Gráfico de consistencia	53
Fig.5.2: Consistencia de mortero patrón en mesa de sacudidas	54
Fig.5.3: Consistencia de mortero con adición de 2% de dióxido de titanio	54
Fig.5.4: Consistencia de mortero con adición de 5% de dióxido de titanio.	54
Fig.5.5: Gráfica de contenido de aire en el mortero	55
Fig.5.6: Gráfica de resistencia a compresión del mortero.	56
Fig.5.7: Ensayo absorción capilar	58
Fig.5.8: Absorción capilar a los 28 días	59
Fig.5.9: Absorción capilar a los 56 días	59
Fig.5.10: Absorción capilar a los 90 días	60
Fig.5.11: Resultados de penetración de agua	62
Fig.5.12: Medición de penetración de agua.....	63
Fig.5.13: Equipo Torrent.	64
Fig.5.14: Reducción de NO _x en mortero de cemento.....	65
Fig.5.15: Reducción de NO _x mortero con adición del 5% TiO ₂	66
Fig.5.16: Degradación de tinte orgánico mortero patrón	68
Fig.5.17: Degradación de tinte orgánico mortero con 5% de adición TiO ₂	69

1 ANTECEDENTES SOBRE PROCESOS FOTOCATALICOS

1.1 Evaluación del dióxido de titanio en el cemento

En nuestro ecosistema existen diversos agentes problemáticos que han sido producidos e introducidos por el hombre. Dentro de los más conocidos y estudiados en consideración a sus niveles de concentración y periodos de contaminación, encontramos los óxido de nitrógeno (NO_x) y los óxido de azufre (SO_x), los cuales tienen una peligrosidad tan alta que llegan a constituir un riesgo mortal [SINCA, 2013]. Estos componentes son emitidos a través de instalaciones fijas de combustión, vehículos de gasolina y motores diésel, afectando a corto y largo plazo la calidad del aire, lo cual, como es lógico, incide en el entorno urbano y en consecuencia la salud de las personas.

Frente a la situación anteriormente expuesta, y con el fin de mitigar los efectos negativos que provocan estos componentes es que a nivel global, tomando conciencia de este problema se procede a la regulación de estos gases en diversos materiales de construcción, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Comunidad Económica Europea a través de su legislación, señalan que los contaminantes del aire que deben ser especialmente vigilados son; dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO , NO_2 , NO_3), ozono (O_3), hidrocarburos y las partículas, en especial su fracción respirable. Ante esto en junio de 1978, en nuestro país se establece una norma de calidad del aire (Resolución N° 1.215, Delegado de Gobierno en el Servicio Nacional de Salud), la cual se constituye como norma primaria basada en los daños de los contaminantes sobre la salud de la población. Es así como vemos que en nuestro país tomándose conciencia de los efectos nocivos de estos agentes se crea una legislación especial para poder combatir la degradación ambiental, haciéndose diversos estudios de procesos auto-limpiantes unos más sustentables y económicos que otros [Faraldos et al, 2012].

Buscando una solución a este problema, se planteó que gracias al proceso de interacciones fotocatalíticas, se puede remediar el problema global que se está generando cada año [Honda y Fujishima, 1972]. En el proceso de la fotocatálisis, la superficie del semiconductor, el cual corresponde al dióxido de titanio, suele formar oxígeno que proviene del agua o del aire. Este oxígeno tiene la particularidad de encontrarse en estado de excitación, revelándose como un oxidante poderoso, capaz de descomponer la materia orgánica, los gases, las bacterias y en general los elementos contaminantes, siendo un proceso muy similar a la fotosíntesis.

La importancia de la fotocatálisis, aplicada en los materiales de construcción ha crecido notablemente en la última década. En este campo, uno de los primeros

productos estudiados es el vidrio [Paz et al, 1995; Negishi et al, 1995; Romeas et al, 1999]. Otros materiales incluidos son las baldosas cerámicas [Fujishima et al, 1999; Kaneko y Okura, 2002], hormigón [Cassar et al, 2003] y yeso [Maier et al, 2005].

En los materiales a base de cemento, principalmente aquellos expuestos a la intemperie, dan como resultado un proceso de deterioro acelerado en función a la exposición constante y directa a muchos contaminantes atmosféricos sean estos orgánicos o inorgánicos y a diferentes tipos de microorganismos tales como algas, hongos y bacterias. Dado lo anterior, se hace necesario considerar los cambios a los que constantemente están sometidos según las condiciones ambientales a las cuales se exponen. Esta situación puede producir, en muchos casos, cambios en las propiedades físicas y químicas de los materiales a base de cemento, tales como: rugosidad, porosidad y composición mineralógica, las cuales permite sin dificultad la deposición de contaminantes orgánicos, facilitando también, en cierto modo, el crecimiento bacteriológico de microorganismos [Maury et al, 2010].

Esto genera la necesidad de una mejor comprensión y análisis experimental de la posible correlación entre los dos procesos fotocatalíticos de oxidación (NO_2) y la inactivación de las bacterias. Como también existe una carencia de antecedentes sobre las interacciones que se pudieran producir entre el dióxido de titanio y las propiedades mismas del cemento, pudiendo influir en su *Durabilidad*. Siendo el cemento el material más utilizado por años en la construcción e ingeniería, sus estudios se han concentrado en la determinación de las resistencias y trabajabilidad, sin embargo, también se han realizado estudios enfocados en la durabilidad de esta, para así estimar la vida útil de hormigones y morteros.

Una posible metodología para detectar el problema, es hacer una evaluación de la durabilidad y el costo económico que acarrea el mortero a base de cemento con adición de Dióxido de Titanio (TiO_2). Quedando este estudio como un análisis económico, y de propiedades físicas del mortero con dióxido de titanio dando como resultado un mortero “sustentable”.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia del dióxido de titanio sobre las propiedades relacionadas con la durabilidad del mortero de cemento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar la efectividad del dióxido de titanio como agente fotocatalítico.
- Determinar el efecto de la dosis del dióxido de titanio sobre las propiedades relacionadas con la permeabilidad y porosidad del mortero de cemento.
- Determinar la influencia del dióxido de titanio en las propiedades físicas y mecánicas del mortero de cemento.
- Realizar estudios comparativos con los distintos ensayos experimentales utilizados, para evaluar la durabilidad de los morteros de cemento.

1.3 Hipótesis

- La adición de TiO_2 al mortero de cemento mejorará la durabilidad del mortero y las condiciones ambientales en nuestro entorno.

1.4 Alcances

- Se considera como primera influencia el factor de ataque químico en la durabilidad del mortero y será medido por su permeabilidad.
- Se considera solo morteros con aplicaciones de revestimiento.

2 ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE LA FOTOCATÁLISIS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo primordial, explicar la influencia de los gases contaminante en nuestro ambiente y el mecanismo de reacción del dióxido de titanio (TiO_2) y sus propiedades auto-limpiantes, realizando una recopilación de información, donde se explica todo lo relativo al TiO_2 y su proceso de fotocátalisis.

2.1 Gases emitidos al ambiente

La formación de gases en nuestra atmósfera nace de las fuentes de energía habitualmente utilizadas en las actividades industriales y urbanas (transporte, calefacción) son el carbón y el petróleo. La energía se obtiene de éstas fuentes mediante un proceso de combustión, liberándose a la atmósfera el azufre y el nitrógeno que contienen en forma de óxidos: dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo éstos óxidos las principales causas de la acidificación tanto del suelo como de las aguas.

Los compuestos de azufre son responsables de dos tercios del total de la lluvia ácida y los compuestos de nitrógeno no producen acidificación si los mismos son absorbidos por las plantas.

Las fuentes antropogénicas de estos contaminantes primarios son tres:

- Emisiones industriales
- Gas de escape de los automóviles
- Emisiones urbanas (hogares).

2.1.1 Fuentes de emisión gases SO_x y NO_x

La mayor parte de los SO_x antropogénicos provienen de la combustión de carbón y petróleo en las plantas generadoras de electricidad (carboeléctricas y termoeléctricas).

Las fuentes de óxidos de azufre son los procesos industriales que más contribuyen a la presencia de SO_x en la atmósfera son la calcinación de los minerales de sulfuro, la refinación del petróleo, la producción de óxido sulfúrico, y la de coque a partir del carbón.

Los óxidos de azufre se eliminan del aire mediante su conversión en ácido sulfúrico y sulfatos, en esta forma terminan depositándose sobre la tierra o en el mar, ya sea con la precipitación pluvial o sedimentándose en forma de partículas.

Ciertas bacterias emiten una gran cantidad de óxido nítrico hacia la atmósfera, por lo que constituye una fuente natural que no es posible controlar.

La mayor parte de los óxidos de nitrógeno producidos por fuentes artificiales se deriva de las plantas generadoras de energía eléctrica, en las que la alta temperatura de la combustión de los energéticos facilita la formación de estos óxidos.

2.1.2 Registro de emisiones y transferencia de contaminantes en Chile

A partir de la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD) y la adopción de la Agenda 21, comenzó el interés entre la comunidad internacional, y de cada gobierno en particular, por la creación de los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) como una herramienta fundamental para la gestión ambiental de cada nación [RETC, 2009]

Luego en el año 2002 en Chile comenzó el proceso de evaluación para la incorporación del RETC en la gestión ambiental, en el marco del programa de trabajo de la Comisión para la Cooperación Ambiental Chile-Canadá. Para ello se realizó un taller de trabajo con la participación de expertos internacionales, que permitió conocer la experiencia de Canadá, México y otros programas RETC en el mundo. Como resultado de este taller, se reconoció la necesidad de desarrollar el RETC en nuestro país, generándose de esta manera el estudio “Análisis de Situación y Factibilidad para Establecer un Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes en Chile”, ejecutado entre marzo y mayo del año 2003, con aportes de Environment Canada, mediante la firma de un memorando de entendimiento entre UNITAR, como agencia implementadora, y CONAMA (antecesora del Ministerio del Medio Ambiente). Dicho acuerdo fue generado en diciembre del año 2002. [RETC, 2009]

Los contaminantes al aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterios se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos (EE.UU.), con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población.

Actualmente, el término “contaminantes criterio” ha sido adoptado en muchos países. Para cada contaminante criterio se han desarrollado guías y normas.

Las guías son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Como respuesta a esos niveles de exposición, se han generado normas que establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un período definido; estos valores límite son diseñados con un margen de protección ante los riesgos y tienen la finalidad de proteger la salud humana y el medio ambiente. (Instituto Nacional de Ecología (INE), México.)

Los contaminantes criterios son:

- a) Dióxido de Azufre (SO₂)
- b) Dióxido de Nitrógeno (NO₂)
- c) Material Particulado (MP)
- d) Monóxido de Carbono (CO)
- e) Ozono (O₃)
- f) Plomo (Pb)

El RETC registra emisiones de cinco contaminantes criterio, sólo el ozono no está actualmente incorporado.

Dentro estos registros podemos observar en la tabla 2.1 la emisión de gases SO₂ y NO_x en ton/año registrada en cada región del país desde el año 2005 y 2009. Y en las Fig. 2.1 y 2.2 la fuentes de energía que producen los gases contaminantes.

Tabla 2.1 Emisión de gases SO₂ y NO_x

Región	SO ₂					NO _x				
	2005	2006	2007	2008	2009	2005	2006	2007	2008	2009
Arica y parinacota	632	622	754	650	1025	338	345	299	437	438
Tarapacá	3508	9301	125589	23395	25280	9662	10297	12261	12820	16900
Antofagasta	176648	198926	205599	217008	242253	17552	20491	26530	33486	35718
Atacama	90076	92364	98455	119677	105381	7603	8226	11402	29642	29886
Coquimbo	768	1067	1030	1539	3649	161	268	586	4314	7196
Valparaíso	30643	44310	45115	65881	64761	5796	7866	11091	16078	18372
Libertador Gral. Bernanrdo O ´Higgins	120441	118830	119368	159860	160597	1474	1608	2199	4836	4895
Maule	7345	7482	5733	5842	5699	3893	4045	4064	5521	5802
Biobío	25740	40096	44662	434944	44893	17013	20389	21791	26827	28950
La araucanía	1510	1937	2012	3886	3914	1181	2003	2148	2331	2892
Los Ríos	1189	1092	1637	2962	3166	307	230	316	2993	3555
Los Lagos	4026	5074	5559	8227	18196	590	1353	3279	7005	11625
Aisén del Gral. Carlos ibáñez del campo	108	135	124	204	342	527	685	1182	2645	2978
Magallanes y de la antártica chilena	440	646	686	781	936	2694	2190	2493	2559	2604
Metropolitana de Santiago	17561	23576	30507	310402	32143	3364	6892	8742	9225	9211
Total país	480635	545458	686830	1355258	712235	72155	86888	108383	160719	181022

(Fuente, RETC, Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Atmosférica Provenientes de la emisiones del D.S. N° 138/2005 MINSAL y estimaciones de los inventarios del MMA. Años 2005-2009. Valores en t/año ,2009)

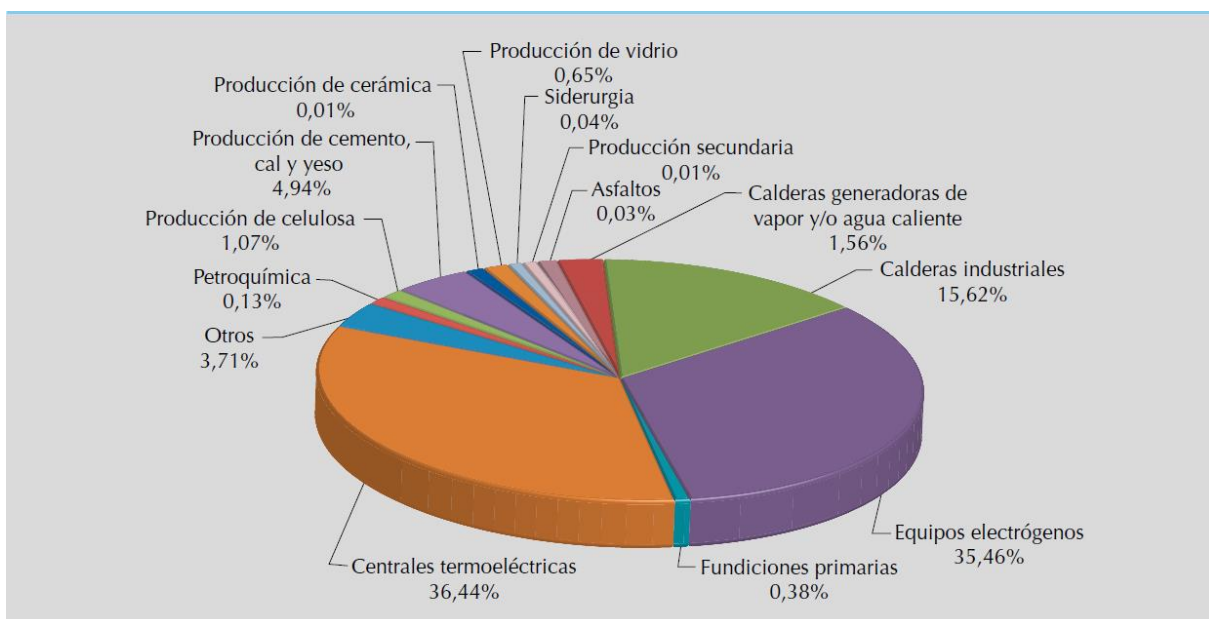


Fig.2.1: Emisiones NO_x al Aire en Sitio (Fuentes Fijas) por rubro, Total País, 2009

(Fuente MINSAL, 2009.)

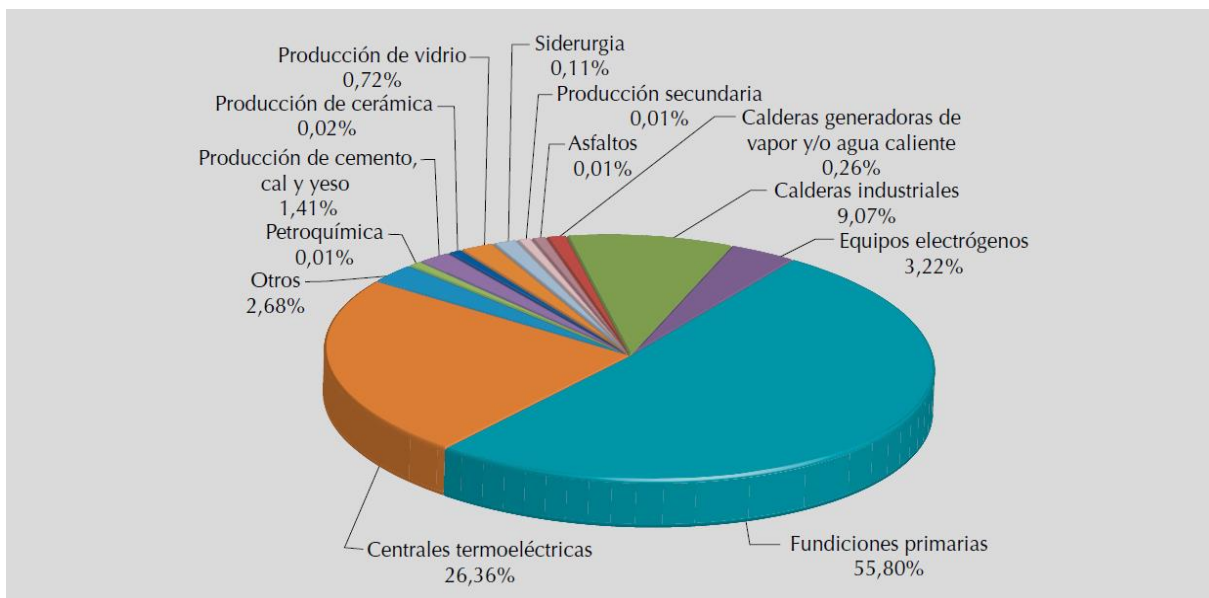
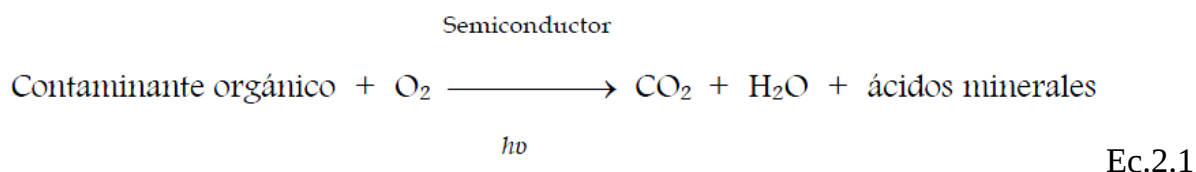


Fig.2.2: Emisiones SO₂ al Aire en Sitio (Fuentes Fijas) por rubro, Total País, 2009

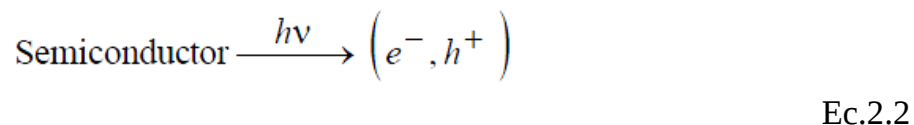
(Fuente MINSAL, 2009.)

2.2 La fotocatalisis

El concepto de la fotocatalisis se dio a conocer en el ámbito de la ciencia a comienzo del año 1930. La fotocatalisis corresponde a la propiedad que poseen algunos materiales de estimular reacciones químicas en presencia de luz ultravioleta, las cuales de otra manera serían imposible o excesivamente lentas [Serpone, 1995]. Así, la fotocatalisis puede definirse como la aceleración de una fotorreacción por medio de un catalizador. La fotocatalisis heterogénea posibilita la degradación, e inclusive la mineralización de contaminantes orgánicos, los cuales poseen una difícil biodegradación y se encuentran presentes en el aire o en el agua. Esto se genera principalmente mediante el uso de un semiconductor, la presencia de oxígeno y una fuente de irradiación en el medio de reacción según la reacción global que se muestra en la ecuación 2.1:



La fase inicial del procedimiento consiste en la procreación de pares electrón-hueco, los cuales se caracterizan por la ausencia de un electrón en un enlace covalente. En estos pares electrón-hueco, la carga asociada es la del electrón con signo (+) en las partículas de semiconductor, ver Ec.2.2. Cuando un fotón con una energía $h\nu$ (luz ultravioleta) que iguala o supera la energía del salto de banda del semiconductor E_g (salto de banda), incurre sobre éste y se fomenta un electrón e^- de la banda de valencia (BV: esta banda tiene todos los subniveles ocupados por electrones) hacia la banda de conducción (BC: bandas que están vacías de electrones, o bien, no tienen todos los subniveles llenos), generándose un hueco h^+ en esta última banda [Hoffmann,1995].



A la vez, existe una retención de reactivos y, de acuerdo con el nivel de energía (redox) del catalizador, un electrón es transferido hacia una molécula aceptadora (Ox). De esta manera se produce una reacción de reducción de la misma. Simultáneamente un foto-hueco es transferido hacia una molécula donadora (D), que se oxidará. El flujo neto de electrones es nulo y el catalizador permanece inalterado. La excitación fotónica del catalizador sería como el paso inicial de la totalidad del sistema catalítico.

Para la selección de un conductor, los criterios de mayor relevancia son:

- 1 Inercia química: resistencia ejercida a la fotocorrosión, al ataque por reactivos y además a la insolubilidad del agua.
- 2 Potencial redox perteneciente a la banda de conducción positivo para poder oxidar los hidroxilos o el contaminante de manera directa. Además un potencial redox correspondiente a la banda de conducción y de valencia negativo para poder reducir el oxígeno o la especie que sea necesario reducir.
- 3 Ancho de banda que posibilite la activación con luz solar, por lo tanto con radiación visible o UVA.
- 4 Escasa toxicidad
- 5 Acceso a bajo costo.

Una gran cantidad de sustancias semiconductoras han sido utilizadas para la degradación de compuestos. Sin embargo, el fotocatalizador con el que se han obtenido mejores resultados de degradación es el dióxido de titanio (TiO_2) [Andreozzi et al., 1999; Blake D.M., 1994, 1995, 1997, 1999 y 2001; Guillard et al., 1999; y 1999d; Prousek, 1996].

2.2.1 Experiencia de uso de TiO_2 en matrices cementicias en base a cemento

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio fue evidenciada en 1972, cuando Honda y Fujishima pudieron descubrir que el dióxido de titanio expuesto a la luz solar, era capaz de producir la disociación fotocatalítica del agua [Lisebigier et al, 1995]. El dióxido de Titanio ha demostrado ser un catalizador efectivo y su aplicación ha sido un apoyo para solucionar una gran diversidad de problemas medioambientales, tales como el tratamiento de purificación de agua y aire. Además, se debe señalar que posee una alta estabilidad química, lo cual permite que actúe sobre un extenso rango de pH. De manera simultánea, es capaz de generar transiciones electrónicas por medio de la absorción de luz ultravioleta [Blake, 2001].

Este fotocatalizador corresponde a un óxido de marcado carácter iónico y se presenta de variadas formas alotrópicas naturales (anatasa, rutilo, brookita) o artificiales [Swamy et al, 2001]. El rutilo corresponde a un polimorfo con estabilidad termodinámica a cualquier temperatura, a diferencia de la anatasa, en la cual su generación se encuentra favorecida a temperaturas bajo 600 °C.

Generalmente la Anatasa presenta mayor eficacia fotocatalítica, pese a su menor ancho de banda en comparación con el Rutilo. Esto puede deberse a la mayor estabilidad que presentan los hidroxilos absorbidos sobre la superficie del rutilo, lo cual complica la generación de radicales hidroxilo y/o a la mejor distancia de cargas presentes en la anatasa dado por la reducción del oxígeno y por último al potencial Redox presente en la banda de valencia de la Anatasa, el cual es más negativo. Como se señaló anteriormente, el dióxido de Titanio tiene una ventaja muy importante de

poder usar radiación UV Solar. Esto ocurre debido a que la separación energética entre las bandas de valencia y conducción es tal, que los fotones con longitud de onda a 387 nm. tienen energía suficiente para producir la excitación fotónica del catalizador [Herrmann ,1999].

De esta manera, cuando las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) son irradiadas con fotones de energía de igual o mayor magnitud a su ancho de banda, se genera una posibilidad de promover electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción. Por esta razón se producen pares electrón- hueco en el óxido, a su vez estos pueden migrar hacia la superficie.

Sobre la superficie del dióxido de titanio, se encuentran moléculas hidroxilo ($-\text{OH}$), las cuales absorben en la forma de $\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}$ [Hussain Al-Ekabi et al ,1989].

Estos huecos productores por la radiación se oxidan $\text{Ti}^{\text{IV}}\text{OH}$ formando radicales, los cuales degradan de manera directa al compuesto orgánico como se muestra en la Fig.2.2:

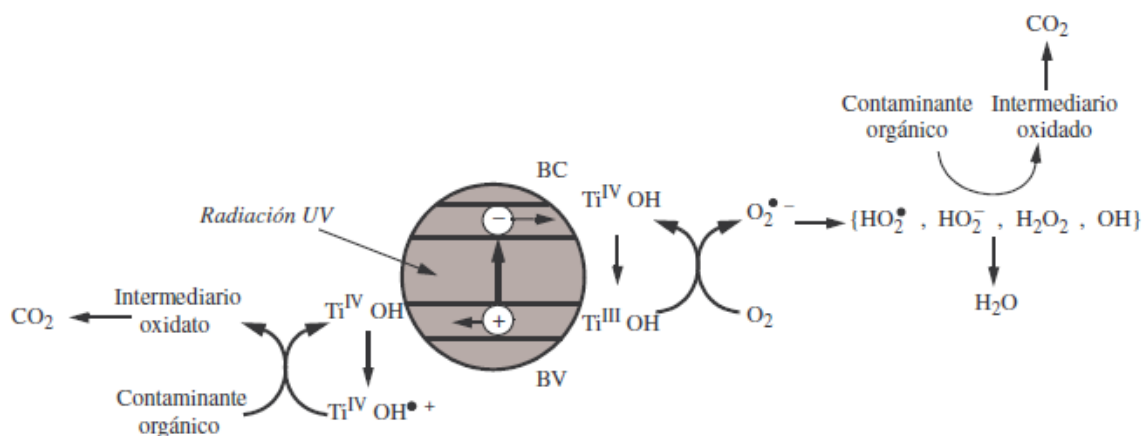


Fig.2.3: Proceso de degradación de compuestos orgánicos.

(Fuente Hussain Al-Ekabi et al ,1989)

Resumiendo lo anterior, la capacidad de degradación de contaminantes del proceso fotocatalítico es sencilla. En este sentido, el proceso fotocatalítico, emplea la radiación ultravioleta o luz solar como raíz de excitación del catalizador (TiO_2), sobre el que se adsorben distintos gases, sean estos, oxígeno (O_2), vapor de agua (H_2O), y también las especies contaminantes del aire, estos gases participan en distintas reacciones de oxidación-reducción capaces de degradar los contaminantes produciendo finalmente especies inocuas como CO_2 y H_2O e iones inorgánicos [Tompkins, et.al. 2005].

[Lawryk ,1996; Cassar , 2003] indican que las sustancias TiO_2 como aditivo en el cemento pueden eliminar junto a los NO_x y SO_x otros compuestos orgánicos volátiles, como el benceno y el tolueno, cloruros orgánicos, aldehídos, o los hidrocarburos aromáticos policíclicos, moviéndose estos en la atmósfera. Además, el dióxido de titanio, es comúnmente aplicado en desinfección degradando bacterias, endosporas, hongos [Chen, 2009; Howard ,2011].

La cantidad de contaminantes atmosféricos que pueden ser degradados con aplicaciones de dióxido de titanio y radiación ultravioleta es extraordinariamente extenso dado que, a priori, prácticamente cualquier compuesto orgánico es susceptible de ser oxidado mediante la fotocatálisis.

3 ANTECEDENTES GENERALES SOBRE DURABILIDAD

3.1 Aspectos generales

El termino durabilidad describe la capacidad del hormigón para resistir las influencias agresivas dentro del entorno de servicio a que está expuesto. Las influencias agresivas pueden incluir el clima, las temperaturas extremas, el agua de mar, el contacto con productos químicos o el impacto y la abrasión. El mortero puede exhibir una durabilidad comparable al hormigón convencional, por lo que la mayoría de las consideraciones de durabilidad y los ensayos que se aplican al hormigón convencional también se aplican al mortero.

En la guía de durabilidad del concreto, publicada por American Concrete Institute (ACI, 2008), nos define que la vida útil de una estructura a base de cemento se encontrara acotada como el periodo de tiempo que se inicia desde la ejecución de la estructura hasta que se completa un cierto y determinado nivel aceptable de deterioro. Es decir, que su vida útil de servicio es la suma del periodo de iniciación y del periodo de propagación del mecanismo de daño o del agente de deterioro que agreden al hormigón.

Este periodo de tiempo constituye la vida prevista o vida proyectada en servicio. Normalmente, para edificaciones convencionales este periodo de tiempo puede ser de 50 años. Sin embargo, para obras de infraestructura, algunas recomendaciones estipulan hasta 100 años o más [Canovas, 2001].

En la etapa de propagación de daños, usualmente se pueden evidenciar distintos niveles o síntomas de decadencia, tales como: manchas superficiales, desintegración parcial del hormigón de recubrimiento (degradación de la pasta superficial), exposición del agregado, fisuras en el hormigón de recubrimiento desprendimientos del recubrimiento, desintegración total del hormigón de recubrimiento, u otras. Por lo anterior, el tiempo de vida útil de servicio de cada estructura es muy variable dependiendo del caso, debido a que cada proyecto tiene un cierto y determinado nivel de aceptación. Por ejemplo, desde el punto de vista estético puede ser inaceptable que una estructura de cemento presente manchas o presencia de hongos o bacterias, además, la estanqueidad puede ser definitiva para que no haya humedad o permeabilidad (p. e. estructuras estancas); también, la funcionalidad pueden implicar el que no se presenten deflexiones excesivas, fisuras o perdidas de masa; finalmente, la seguridad demanda no propasarse en los límites de resistencia previstos bajo las cargas de servicio y las solicitaciones mecánicas.

Según el comité 221 del ACI (ACI, 2008), la pérdida de durabilidad de un hormigón o mortero ocurre cuando esta reacciona en algunas de las siguientes condiciones:

- a. Abrasión
- b. Erosión de estructuras hidráulicas
- c. Cavitación
- d. Agresión química Ataque de Sulfato
- e. Exposición al agua de mar
- f. Ataque de ácidos
- g. Corrosión de metales en el hormigón
- h. Acción de los cloruros
- i. Carbonatación
- j. Helada y deshielo
- k. Agresión de la helada Sales de deshielo
- l. Reacción química del agregado
- m. Reacción álcali sílice
- n. Reacción álcali carbonato

Es por esto que para preservar la durabilidad de una estructura, es fundamental que el control de calidad no se limite al producto ya terminado, sino que a todos los componentes del mismo, es decir, deben extenderse a todas las fases de ejecución de la estructura.

3.2 Factores que afectan la durabilidad

La carencia de durabilidad puede ser causada por agentes externos que existan en el ambiente o por agentes internos dentro del mortero [ACI 201, 2008].

Podemos inferir, que los agentes internos conocido como álcali-silice, álcali-carbonato, álcali-silicato y la etringita influyen directamente en las características físicas y químicas de sus agregados, y en las propiedades físicas del propio mortero. Si hablamos desde el punto de vista de los agentes externos en el ambiente y sus procesos destructivos, estos pueden ser de naturaleza química, mecánica, física, biológica o mixta.

Por lo tanto, la pérdida de las características propias del hormigón y mortero es debido, de forma general, a la acción combinada de diferentes agentes agresivos, los que se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, en función a su actuar como se indica en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación de agentes agresivos y sus efectos.

Grupos	Agentes	Efectos
Efectos Mecánicos	Carga, sobrecarga, choque, impactos y rozamiento. Agua corriente y aire	Grietas, principalmente en el conglomerante. Erosiones. Trituración. Erosión, cavitación.
Efectos Físicos	Variaciones de temperatura y diferencias. Cambios de humedad y no uniformidad. Fuego. Temperatura alta. Corriente eléctrica y Radiación	Grietas, fallos en la unión cemento/áridos. Grietas y pérdida de unión cemento/árido. Grietas y cambios químicos. corrosión armaduras, disolución enlace cemento/árido
Efectos Químicos	Aire y otros gases. Aguas agresivas. Productos químicos, suelos y suelos minerales.	Anulación enlace pasta/Árido, SH_2 , SO_2 , CO_2 y NH_3 reaccionan. Reacciones de SO_4H_2 , Sulfatos aguas carbónicas, Cloruros. Reacciones de ácido y sales acidas. Reacciones de ácidos débiles, de Sulfatos zeolitas
Efectos biológicos	Vegetación, microorganismos (bacterias, formas microscópicas de vida orgánica.)	Fisuras. Ataque por ácidos. Humedad. Formación de Sulfatos. Relajación mecánica de la textura.

(Fuente, O. Valenta, Simp. Int. Quim. Del cemento en Tokio, 1968)

3.2.1 Efectos mecánicos

La influencia de los efectos mecánicos abarca todas aquellas cargas, sobrecargas, vibraciones y fricciones que pueden afectar el comportamiento futuro del elemento estructural. Estas pueden ser producidas por causas naturales, ya sean efectos de viento y agua o por causas netamente artificiales.

Los procesos erosivos de mayor frecuencia que ocurren en los elementos a base de cemento, son los derivados a la abrasión mecánica, la cual se produce por el desplazamiento de materiales sólidos sobre la superficie de un elemento [Zabaleta, 1988].

Una estructura de cemento puede encontrarse expuesta a la acción deteriorante de la abrasión, como en consecuencia el desgaste del mismo por las acciones abrasivas puede ser de carácter mecánico e hidráulico. La abrasión mecánica se produce primordialmente en pisos y pavimentos de hormigón, donde se manifiesta el tránsito de personas y vehículos, etc.

La acción hidráulica se manifiesta en estructuras que están constantemente en contacto con flujos de agua, presentando dos variantes:

- 1) Abrasión hidráulica, que producen los sólidos arrastrados por el agua.
- 2) La erosión por cavitación que se genera en determinadas condiciones cuando el flujo de agua se mueve con muy alta velocidad.

Dado a lo anterior, estos efectos conducen a deterioros en forma de picaduras y roturas superficiales del hormigón y mortero.

3.2.2 Efectos físicos

Son todos los fenómenos de origen físico que puede afectar a futuro el comportamiento de la estructura a base de cemento, tales como: variaciones de humedad, variabilidad de temperatura, heladas, fuegos, corrientes eléctricas y radiaciones.

Los efectos físicos más comunes que actúan adversamente en la durabilidad del hormigón y el mortero incluyen: el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de las sales en los poros, la exposición a temperaturas extremas como son las heladas o el fuego y el desgaste de la superficie [ACI 201, 2006].

La variabilidad de temperatura es sumamente perjudicial en una estructura por la magnitud de sus efectos, son estas las que están en ciclos alternativos con las

temperaturas bajo y sobre el punto de congelación del agua (0°C), que se denominan ciclos de hielo-deshielo.

Sometido al rango de variación de los ciclos, primordialmente a las temperaturas bajo (0°C), y del estado de saturación del mortero u hormigón, el agua contenida en sus poros puede solidificarse (congelarse), produciendo un proceso de expansión en grandes dimensiones. [ACI 201, 2008].

El aumento excesivo de volumen producido al formarse hielo llevará consigo un considerable aumento en las tensiones internas del material, que provocará el agrietamiento de la superficie, lo que a su vez, produce una mayor facilidad en la entrada del agua en la estructura, con lo que el proceso destructivo de la estructura va a empeorando a través de su ciclo de vida. [MOP, 1989]

Además se puede destacar, las variaciones de humedad, pero sus efectos no son tan nocivos, ya que sus magnitudes son pequeñas y generalmente poco profundas. Se presentan a través de ciclos alternativos de saturación y secado de la estructura a base de cemento, lo cual por efecto de la tensión superficial del agua contenida en sus poros, puede producir un proceso deteriorante. [Zabaleta, 1988].

3.2.3 Efectos químicos

La durabilidad del mortero frecuentemente viene determinada por la velocidad a la que la estructura se descompone como resultado de una reacción química. En todas estas interacciones, las sustancias agresivas sean estas iones y moléculas son transportadas desde algún lugar del ambiente (aire o sumergido), hasta encontrar la sustancia necesaria para su reacción en la estructura. Sin embargo, si la sustancia agresiva se encuentra depositada en la estructura, tal molécula deberá ser transportada para su reacción, es decir, la necesidad de un transporte es fundamental para su reacción.

A fin de cuentas, las reacciones entre las sustancias que son agresivas suelen interactuar cuando estas solamente se encuentran en contacto con una sustancia reactiva o reactante. No obstante, la baja velocidad de transporte de las sustancias agresivas (iones y moléculas), ya sea en el interior y exterior de la estructura, producen un deterioro de largo plazo como para manifestar sus efectos nocivos. El Comité ACI 515 y la Asociación del Cemento Pórtland [Portland Cement Association, 1968] han tabulado los efectos de numerosos agentes químicos sobre el concreto. En la Tabla 3.2 se resumen agentes químicos habituales en el hormigón y mortero.

Tabla 3.2 Agentes químicos habituales en el hormigón u mortero

Velocidad de ataque a temperatura ambiente	Ácidos Inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Otros
Rápida	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	-	Cloruro de aluminato	-
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio* >20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gaseoso) Licor de Sulfato
Lenta	Carbónico	-	Hidróxido de sodio* 10 a 20%	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloro(gaseoso)) Agua de mar Agua blanda
Despreciable	-	Oxálico Tartánico	Hidróxido de sodio* < 10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de cinc Cromato de sodio	Amoníaco (liquido)

*El efecto del Hidróxido de Potasio es similar al Hidróxido de sodio.

(Fuente: ACI Comité 201)

La mayoría de estos agentes más frecuentes, son encontrados en el aire y otros gases, de la atmósfera natural o contaminada, aguas agresivas (sean estas naturales superficiales o subterráneas, industriales, servidas o del mar) y otros líquidos; ácidos reactivos, productos químicos orgánicos (aceite y grasas); suelo y terrenos agresivos.

Todos estos elementos pueden producir un ataque químico y un efecto en la durabilidad de una estructura, pero no todos ellos actúan de la misma manera, es por esto que se ha dividido según el tipo de agente atacante.

a) Ataque por Sulfatos

Diversos sulfatos de calcio, sodio, potasio, y magnesio que se encuentran naturalmente en el suelo o disueltos en agua freática o en la atmósfera pueden llegar a acumularse sobre la superficie del mortero incrementando su concentración a través del tiempo y por lo tanto aumentando su riesgo de deterioro. Los mecanismos que producen el ataque al mortero por sulfatos, son dos reacciones químicas:

La combinación de los sulfatos con hidróxido de calcio (cal libre), que forman sulfato de calcio (yeso) y la combinación de yeso con aluminato de calcio hidratado para formar sulfoaluminato de calcio (etringita).

Estas dos reacciones tienen como resultado un aumento del volumen solidó (en aproximadamente un 18%), y a la segunda se le atribuyen la mayoría de las expansiones, rupturas o ablandamientos del hormigón y mortero causados por soluciones de sulfatos. [Neville, 1988].

De acuerdo con Neville, las secuelas por ataque de sulfatos no solo producen degradación por aumento de volumen y fisuras, si no también, una disminución en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento. Desde luego, lo anterior también conlleva a una pérdida de adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de los áridos. El deterioro por lo general, comienza en las aristas y esquinas, siguiendo con una microfisuración y una fisuración que astilla el mortero y lo reduce a una condición friable y blanda. El ion sulfato que se expresa como (SO_4^{-2}) y que causa la degradación del mortero puede ser de origen natural, biológico o industrial. Entre los sulfatos de origen natural, se pueden mencionar algunos suelos orgánicos, suelos que contengan turbas (material orgánico rico en carbono), algunos suelos arcillosos o aguas freáticas de estos mismos suelos, que pueden producir sales sulfatadas.

Los sulfatos en forma de sales más agresivas, son: el sulfato de amonio (NH_4SO_4), el sulfato de calcio (CaSO_4 , yeso), el sulfato de magnesio (MgSO_4 , sal hidratada), el sulfato de sodio (NaSO_4). Algunos sulfatos menos agresivos, pero de todas maneras dañinos son: el sulfato de cobre, el sulfato de aluminio y el sulfato de bario, que son insolubles en el agua. Otra fuente natural de sulfatos, es el agua de mar, que aparte de contener sales de sulfatos, está compuesta por otras sales, cuya acción química de conjuntos pueden ser supremamente agresivas con el mortero. Entre las sales disueltas más comunes en el agua de mar están: cloruro de sodio (NaCl), cloruro

de magnesio (MgCl^2), sulfato de magnesio (MgCl_4), sulfato de calcio (CaSO_4), cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio (K_2SO_4). [Neville, 1988]

La extensión del ataque del sulfato depende de su concentración y la permeabilidad del mortero, es decir de la facilidad con que el Sulfato puede transportarse entre los poros, en el interior de una estructura a base de cemento.

b) Ataque por álcalis

El ataque por álcalis logra producirse a ciertas sustancias en el mortero. La diferencia entre el ataque de sulfato y el ataque por álcalis es que, en el ataque por álcalis dependerá de los elementos reactivos que contienen sus agregados (áridos) para que puedan así reaccionar con el cemento, no obstante, tienen la misma tendencia de expandirse en la estructura.

Debido a la naturaleza sumamente compleja de este inconveniente, no todos los científicos y expertos están de acuerdo en las causas porque el hormigón y el mortero logra expandirse; a pesar de todo, hoy en día se identifican tres tipos de reacciones, denominadas: álcali-sílice; álcali-carbonato y álcali-silicato. Las interacciones químicas que se provocan, se identifican en forma general como reacción álcali-agregado [Campbell y Roper, 1991].

La reacción más habitual en el hormigón y el mortero es la primera de ellas, identificada como álcali-sílice y se originan al ser atacados los minerales silíceos del agregado por los hidróxidos alcalinos de la estructura a base de cemento derivados de los óxidos de sodio y de potasio (Na_2O y K_2O). Esta reacción tiene la particularidad de producir un gel alcalino-silicoso, el cual es higroscópico (que atrae agua en forma de vapor o de líquido de su ambiente), y es el resultado de la interacción de los álcalis solubles en el cemento y los elementos integrantes de las partículas de sus agregados, considerando que el gel alcalino-silicoso que por su característica de ser hidrofílico, absorbe humedad incrementando su volumen. De esta manera se genera suficiente presión de dilatación para fracturar la estructura. La expansión del gel puede tener también lugar por un efecto de aumento de presión hidráulica generada por un fenómeno de ósmosis. A veces, parte de este gel abandona el interior de la estructura a través de las grietas, y aparece en las superficies en forma de gotas gelatinosas [Fernández Cánovas, 1994]

Los deterioros provocados por este ataque dependen del contenido en álcalis del cemento, de la forma y unión de estos en el mismo, de la dosificación de cemento, de los áridos, tamaño y cantidad de los mismos, porosidad del hormigón o mortero y presencia de agua.

La interacción de álcali-carbonato se considera distinta a las otras, pues se lleva a cabo entre los álcalis aportados por el cemento en la fase líquida de la estructura a base de cemento y los áridos que contengan carbonatos como los de magnesio o los de calcio y magnesio. Por la poca frecuencia con que se presenta, se conoce poco de este tipo de reacción; sin embargo, se han identificado como reactivos los áridos calizos de naturaleza dolomítica en los que los minerales arcillosos tienen un papel importante durante el proceso de esta reacción. [Grupo español del hormigón, 1993].

c) Ataque por ácidos

El efecto de los ácidos como sustancia agresiva, donde el hormigón y mortero actúa como sustancia reactiva, se traduce en la alteración de los compuestos cálcicos: hidróxido cálcico, silicato y aluminato cálcico hidratado, interactuando más o menos de forma inmediata, en las sales cálcicas del ácido que ataca. Ya que la pasta de cemento hidratada tiene un carácter alcalino, producido fundamentalmente por la portlandita o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ generada en la hidratación de los silicatos, puede ser atacada por los ácidos dando las sales cálcicas correspondientes, que en la mayoría de los casos son solubles y por tanto, se eliminan de la estructura a base de cemento haciendo a éste cada vez más poroso y con mayor superficie expuesta al ataque. Desde el punto de vista de su naturaleza se pueden considerar los ácidos inorgánicos y los orgánicos.

Entre los ácidos inorgánicos que atacan al mortero se pueden señalar como peligrosos el ácido sulfúrico y el ácido sulfuroso, que producen sulfato cálcico y por tanto etringita; el ácido clorhídrico, ácido nítrico, ácido sulfhídrico y ácido carbónico, que generan sales solubles las cuales son eliminadas por lixiviación (proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido) [CEB, 1992].

Entre los ácidos orgánicos se pueden considerar por su carácter agresivo el ácido acético que se encuentra en los vinos y vinagres, y que con el hidróxido cálcico da lugar a la formación de acetato cálcico.

Es muy importante destacar que hay una diferencia fundamental entre el ataque por ácidos, y el ataque por sulfatos y álcalis. En el primer caso, ocurre una destrucción total del sistema de poros, dado que los ácidos reaccionan con todos los componentes del cemento; mientras que en el caso de los sulfatos, éstos atacan solo algunos de ellos. Por lo tanto, en el ataque por ácidos, la permeabilidad del mortero sano es de menor importancia; en cambio, en el ataque por sulfatos o álcalis, la permeabilidad del mortero sano es extremadamente importante [CEB, 1992].

3.2.4 Efectos biológicos

La floración de organismos sobre las estructuras a base de cemento puede llegar a producir daños mecánicos causados por: musgos, algas, líquenes, hongos y bacterias. Estas se pueden encontrar en suelos y paredes, alcantarillas, zonas costeras, entre otras [Montoya, 1979], así como también, la capacidad de las plantas y árboles de poder introducirse a través de fisuras y puntos débiles, resultando la expansión del hormigón que logra incrementar la fisuración y el deterioro. Esta vegetación, así mismo, puede retener aguas sobre la superficie de la estructura, produciendo la saturación del mismo conllevándola a un riesgo de heladas, además los microorganismos pueden lograr una serie de ataques químicos al desarrollar ácidos húmicos que disuelven la pasta de cemento.

3.3 Porosidad

Se comprende como porosidad en una estructura de pasta de cemento hidratada los espacios de vacíos generados en la masa del hormigón o mortero por consecuencia de diversos factores. Los poros generados en el hormigón y mortero son profundamente finos y si estos logran formar conductos entre sí el transporte de sustancias líquidas y gaseosas se hace más expedito. Es por esto que el estudio de la porosidad juega un papel importante ante los ataques agresivos, mencionados anteriormente.

Los poros capilares se originan al añadir una cantidad de agua superior a la necesaria para formar los cristales hidratados de los aluminatos y silicatos del cemento. Este exceso de agua se añade para obtener una pasta plástica y trabajable. Tras el fraguado, el agua sobrante queda atrapada en el interior de la masa, formando una red de poros y capilares [Andrade, 1998]. Las burbujas de aire ocluido también participan en la formación de esta red de poros, cuyos tamaños varían desde pocos nanómetros (microporos) a micrómetros (capilares) o incluso milímetros (grandes poros o poros de aire). Estos poros pueden estar interconectados entre sí (porosidad abierta) o no (poros cerrados).

Es por esto que existen tres formas importantes en que los agentes agresivos pueden penetrar entre los poros capilares que son: agua pura o que lleve iones agresivos; dióxido de carbono y oxígeno.

Ellos se pueden desplazar a través del hormigón o mortero de diferentes maneras, pero todo el transporte depende de la pasta de cemento hidratado. La durabilidad del mortero depende principalmente de la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gaseosos, pueden entrar en los poros capilares y moverse a través de él; a esto se le llama comúnmente permeabilidad de una estructura. Por ello la

eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad [CYTED, 2000].

3.4 Permeabilidad

Según Neville la permeabilidad de una estructura a base de cemento es la facilidad que presenta éste a ser penetrado por un fluido (aire, gas o líquido), y es consecuencia de la porosidad que posee la pasta hidratada y los áridos y de la falta de compactación adecuada.

Se entiende como permeabilidad la velocidad con que el agua y otros componentes fluyen o son transportados a través del mortero u hormigón. Cuanto más permeable sea el hormigón menor será su durabilidad. Un mortero permeable es propenso a su desintegración porque el agua que penetra en sus poros se expande por congelación sometándolo a tensiones que no puede soportar. Igualmente la fácil penetración de sulfatos, ácidos y otros productos químicos agresivos aceleran el proceso de destrucción del mortero.

Por lo anteriormente dicho, la disminución de la permeabilidad es una manera efectiva para mejorar la durabilidad del mortero y para lograrla se deben conocer los factores que más influyen.

3.5 Factores que influyen en la permeabilidad

El mortero tiene un sistema de poros internos y vacíos comunicados entre sí; su tamaño, número y continuidad hacen al mortero más o menos permeable a gases, líquidos y sales disueltas. Estos poros pueden presentarse en la pasta de cemento, en los distintos tipos de áridos y en la zona de contacto de ambos. Las cavidades y vacíos de aire dejados por el agua bajo el refuerzo y los agregados aumentan la permeabilidad del mortero. Puede decirse que todas las etapas de la construcción del mortero, desde la selección de los materiales hasta las prácticas constructivas, influyen de algún modo sobre la permeabilidad del mortero. No obstante puede afirmarse que sobre la misma influyen fundamentalmente, la relación agua/cemento, el proceso de curado y el uso de aditivos químicos y minerales.

3.5.1 Influencia relación agua / cemento

La relación entre agua y cemento (a/c) afecta no solamente la resistencia a la compresión del hormigón y mortero sino también su permeabilidad. Pequeños cambios en esa relación (a/c) pueden significar apreciables diferencias en la permeabilidad. La relación agua/cemento (a/c) se define como el peso del agua presente por unidad de peso de cemento. Una relación de 0,5 significa que la pasta de cemento está compuesta

por 50 kg de agua por cada 100 kg de cemento. A menor relación a/c, mayor es la concentración de la pasta. A mayor relación a/c, mayor es la dilución de la pasta. Con menores relaciones a/c, la concentración creciente de granos de cemento en la pasta deja menos espacio entre ellos para ser ocupados por el agua, al estar más unidos unos con otros. En resumen, hay mayor espacio entre los granos de cemento de la pasta a medida que aumenta la relación agua/ cemento. Inicialmente el espacio entre los granos de cemento forma una red continua, llena de agua, formada por los poros capilares. A medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros y esto hace al mortero menos penetrable. Los poros pequeños son bloqueados más fácilmente que los grandes y mientras más granos de cemento se tengan (menor relación a/c) el bloqueo será mayor con lo que se consigue una menor permeabilidad y un mortero más durable [Montoya, 1979].

3.5.2 Influencia del curado

El curado a través de su influencia en la porosidad y la permeabilidad del mortero, tiene un papel muy importante en la durabilidad. El mortero debe madurar bajo condiciones apropiadas de humedad y temperatura para desarrollar todas sus características y propiedades. Un curado adecuado asegura que el hormigón o mortero será resistente, tenga baja permeabilidad, se encuentre libre de fisuras y, por lo tanto, sea durable en el tiempo.

3.5.3 Influencia de los aditivos y adiciones

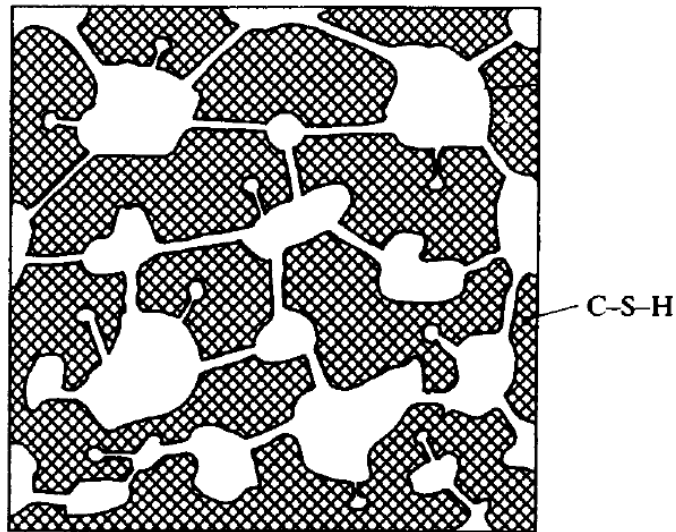
Los aditivos reductores de agua de rango normal a alto se pueden usar para reducir la relación a/c entre un 5 y un 20%. Este incrementa la concentración de granos de cemento y baja la permeabilidad del mortero. Las cenizas volantes y el microsilíce (polvo de sílice) reducen la permeabilidad (Cabrera y et al, 1980). Esta es una razón importante para especificar el uso de adiciones minerales. Una combinación de los mecanismos químicos y físicos de las cenizas volantes y el microsilíce produce el bloqueo de los poros capilares del mortero. Ellos no sólo contribuyen a la hidratación de una manera similar a la del cemento, sino que por su tamaño tan pequeño bloquean aún más el espacio entre los granos de cemento.

3.6 Relación de permeabilidad y porosidad

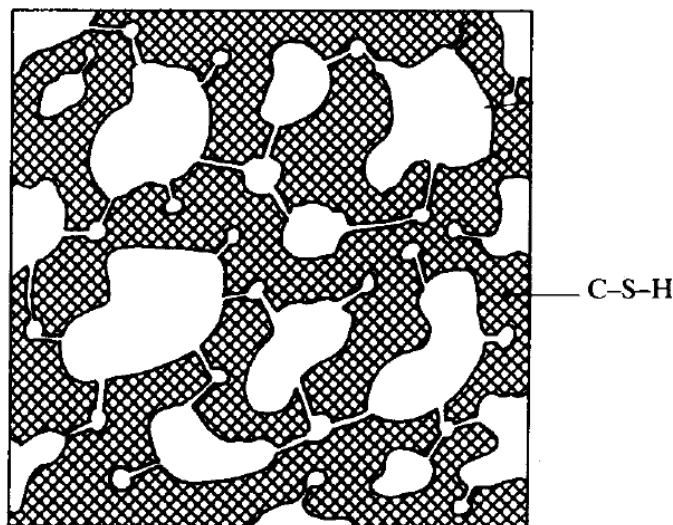
Unos de los temas que más ha sido estudiado, es la relación entre la permeabilidad y la porosidad [Itoh, 2011]. En este sentido, la primera no puede existir sin esta última, por lo tanto, debe existir una relación entre ambas propiedades.

Según Neville (2010), es posible que dos materiales tengan porosidad muy similar, pero lo que se pueden diferenciar es la interconexión de sus poros, ósea, si los

poros capilares están conectados por largos pasajes, su permeabilidad será relativamente alta; no es así, si sus poros estuvieran parcialmente conectados, pudiendo tener la misma porosidad y distinto grado de permeabilidad. Esto se representa en las siguientes figuras.



(a)



(b)

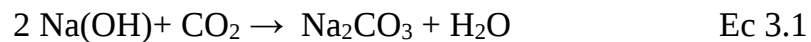
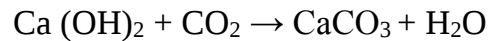
Fig.3.1: Representación esquemática de material de igual porosidad, pero: (a) alta permeabilidad, los poros se encuentran interconectados, y (b) baja permeabilidad, los poros se encuentran cerrados.

(Fuente, A.M. Neville, Concrete technology, 2010)

3.7 Carbonatación

La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera juega un papel importante en ciclo de vida de un hormigón u mortero, debido a sus características acidas, el CO₂ reacciona con el hormigón u mortero, gracias a la naturaleza alcalina de este último. Este proceso se conoce como carbonatación.

El proceso de carbonatación se lleva a cabo de la siguiente manera: el aire que está en contacto con la superficie de concreto penetra por los poros capilares y el CO₂ que contiene, reacciona rápidamente con los hidróxidos en la solución de poro. Ver la siguiente ecuación.



El aire que entra entonces en los poros ya no contiene dióxido de carbono, creándose de esta manera una diferencia de concentración de CO₂ entre el aire del exterior y el del interior. Esta diferencia produce la difusión del CO₂ atmosférico hacia el interior de los poros.

Los productos precipitados durante la reacción del CO₂ con los hidróxidos disminuyen la permeabilidad del concreto y reducen el pH de la solución del poro.

Si la carbonatación continúa, entonces en la fase sólida de la pasta de cemento también reacciona con el CO₂ desligando los cloruros de los cloroaluminatos e incrementándose de esta manera el peligro de corrosión. La principal consecuencia de la carbonatación es una caída abrupta del pH de la solución del poro y por lo tanto aparece un frente de carbonatación, separando dos zonas: una hacia la superficie, con un Ph menor de 8 y otra, hacia el Interior del concreto, con un pH superior a 12. Estas zonas se pueden distinguir fácilmente por medio de un indicador de pH como la fenolftaleína; sin embargo, se prosiguen las investigaciones para obtener otros métodos de medición que comparen su eficiencia [Castro, P. y et al, 1997].

Cuando el frente de carbonatación llega al refuerzo, la capa pasiva se vuelve inestable, rompiéndose la protección que le confería al acero e iniciándose el proceso de corrosión. Este último, en este caso, es generalizado y homogéneo, tal como si el refuerzo estuviera expuesto a la atmósfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del concreto y, por lo tanto, en contacto con el acero durante más tiempo. Dicha circunstancia produce, a largo plazo, una reducción en la sección transversal de la barra y una cantidad significativa de

óxidos y productos de corrosión, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión en el concreto que agrieten el recubrimiento, o bien pueden difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto y producir manchas en el acabado. Cuando la carbonatación se produce en un concreto que contiene cloruros, los efectos dañinos de la primera se suman a los efectos nocivos de los segundos, y generan una corrosión severa [Castro, P. y et al, 1997].

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

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

El valor de k depende de diversas variables como el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la proporción del cemento, y las características del medio ambiente. De esta manera a mayor humedad en los poros, el CO_2 penetra con más dificultad que si no tuviera agua.

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

4 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En los capítulos anteriores se otorgó la información suficiente para la comprensión y realización de la investigación. En este capítulo se presenta la metodología de investigación a emplear y su programa experimental para poder cumplir los objetivos del trabajo.

4.1 Programa experimental

Para el desarrollo de la investigación, se realizó la confección de diversas probetas variando la cantidad de TiO_2 en su dosificación. Se conducirán ensayos físicos y mecánicos para evaluar el efecto de TiO_2 sobre las propiedades de los morteros, los cuáles se describirán en el presente capítulo. Se presentará además el factorial de ensayo que permitirá obtener resultados suficientes para cumplir con los objetivos planteados, y validar las hipótesis propuestas.

4.2 .Diseño experimental

Para cumplir con los objetivos planteados desde un comienzo, se requiere establecer los pasos esenciales que forman el diseño de la experiencia. Para ello se confecciono un diagrama de flujo, el que se presenta en la Figura 4.1 y que muestra el diseño y los pasos a seguir para el desarrollo de la investigación.

El primer paso a seguir fue realizar una recopilación bibliográfica existente de los aspectos relevantes del mortero de cemento, enfocándose en las variables que influyen en la durabilidad y de experiencia anteriores en uso de dióxido de titanio en mezclas cementicias. Luego se realiza el diseño de la experiencia con especial enfoque en los efectos del contenido de dióxido de titanio en las propiedades a medir para caracterizar el desempeño del mortero obtenido.

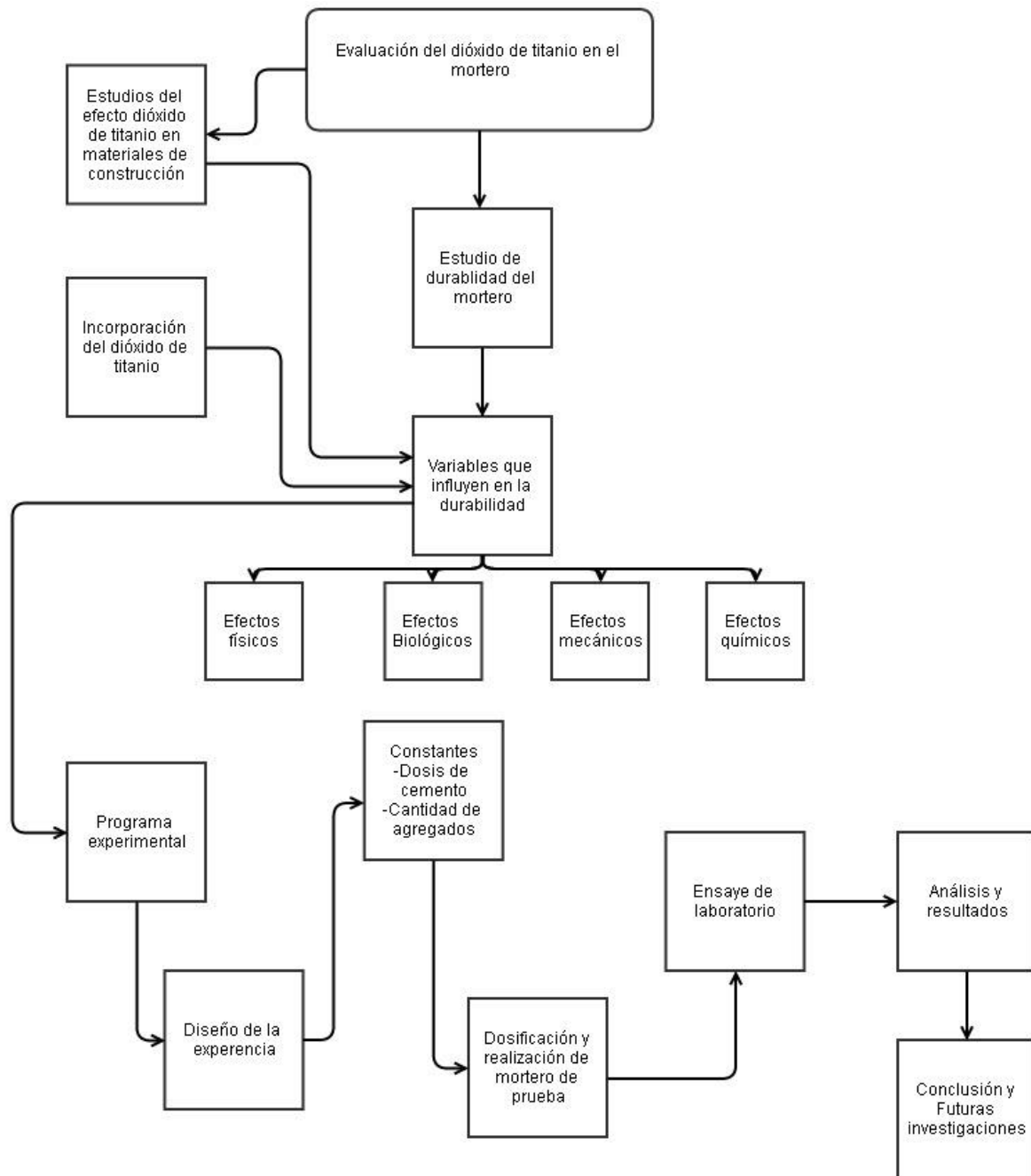


Fig.4.1: Diagrama de flujo de la investigación

4.2.1 Pasos a seguir para la confección de probetas de mortero.

A continuación se presentan los factores que afecten el desempeño del mortero, en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas, finalizando con la presentación del diseño factorial.

a. Tipo de mortero

Se estableció un mortero patrón y 2 morteros de prueba con distinto porcentaje de TiO_2 en función al peso del cemento expresado, para la confección y realización de ensayos dentro de laboratorio, que tendrá las siguientes características: 1:3 (1 de cemento y 3 de arena), dosificado según NCh 2256 Of.2013 “Morteros- requisitos generales”

Tabla 4.1: Dosificación de morteros de prueba

	Patrón		2% TiO_2 (en función del peso de cemento total expresado)		5% TiO_2 (en función del peso de cemento total expresado)	
Material	Peso (kgr/m ³)	Valor absoluto (lts/m ³)	Peso (kgr/m ³)	Valor absoluto (lts/m ³)	Peso (kgr/m ³)	Valor absoluto (lts/m ³)
Cemento	480,41	162,85	478,68	162,26	476,10	161,39
Arena	1441,24	517,15	1436,04	515,28	1428,30	512,51
TiO_2	0,00	0,00	9,57	2,45	23,81	6,10
Agua	290,00	290,00	290,00	290,00	290,00	290,00

b. Tipo de cemento

En Chile está vigente la norma NCh 148, of. 68 que corresponde a la normativa de Cemento. En ella se definen algunos términos, se clasifican según sus componentes y según sus resistencias. Para la investigación se considerará un cemento puzolánico, de grado corriente, del tipo “Especial”, de marca comercial Cemento melón, que cumple con las normativas vigente hoy en día, estipuladas por NCh 148 Of 68 “Cemento-Terminología, clasificación y especificaciones generales”.

c. Dióxido de Titanio :

Para la elaboración de morteros, se usó el dióxido de titanio como adición insoluble combinada con el cemento en bajos porcentajes, esta será de marca comercial A200, siendo muy similar al Aerioxide p-25 o Degussa p-25, usados

normalmente para la elaboración de hormigones auto-limpiante. Las características del material según el proveedor quedan expresadas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas del TiO₂

Propiedades		a200
TiO ₂ contenido %		≥ 99.0
color(en comparación con el estándar de la muestra)		no inferior a
materia volátil a 105 °C		≤0.5
L. O. I. En 800 °C		≤0.5
Soluble en agua	% sales	≤0.25
Soluble en ácido	% sales	≤0.5
de residuos en el tamiz 45 um	%	≤0.05
de ph de suspensión acuosa		6.8-7.6
brillo	%	≥ 98.7
La absorción de aceite g/100g		≤; 23
La fuerza de teñido(en comparación con el estándar de la muestra) %		≥ 110
bario, ba	mg/kg	≤; 5
Metales pesados	mg/kg	≤ 20
zinc, zn	mg/kg	≤ 50
Stibium, sb	mg/kg	≤50
Cromo, cr	mg/kg	≤ 20
Plomo, pb	mg/kg	≤ 10
Arsenico, As	mg/kg	≤3
mercurio, hg	mg/kg	≤ 1
cadmio, cd	mg /kg	≤ 1
Fierro, fe	mg/kg	≤ 50

d. Granulometría

Se realizó según la norma NCh 165 of. 77 “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”, y consiste en hacer pasar las muestras representativas del acopio por una serie de tamices ordenados de mayor a menor. Los pesos retenidos se expresan como porcentajes del peso total de la muestra. Finalmente, la granulometría se expresara en porcentajes que pasan, acumulados.

En esta investigación se considera el uso de arena negra, proveniente de la región Valparaíso, sector Con-Con, que presenta un tamaño nominal de 5 mm. Donde sus características se pueden ver en la gráfica de la fig 4.2.

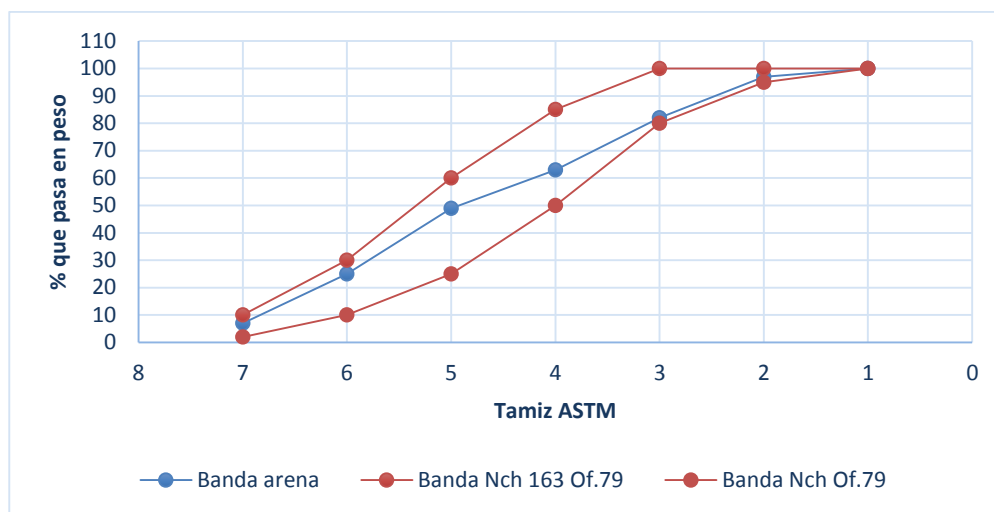


Fig.4.2: Granulometría árido fino.

e. Condiciones de ejecución de los morteros

Se fabricaron los morteros bajo condiciones óptimas en laboratorio. Se tendrá en consideración: La temperatura del mortero en fresco, el tiempo de amasado, velocidad de amasado, humedad de los agregados, según lo indica la NCh 2260 Of.96 “Morteros- preparación de mezclas de prueba y mezclas comparativas de laboratorio”. Se dispondrá de un equipo con capacidad total de 80 lt. para el amasado, (ver fig. 4.3).



Fig.4.3: Mezcladora con capacidad de 80 lt.

f. Curado

Este proceso es fundamental y de tanta relevancia como la dosificación o la fabricación misma. Para obtener un buen producto, además es necesario proteger el mortero fresco de las condiciones ambientales, especialmente viento y calor.

Se mantuvo el mortero sumergido en agua tranquila saturada en cal o en una cámara con humedad relativa superior a un 90% , durante 28 días, mientras se desarrollan las reacciones de hidratación de los minerales que conducirá a disminuir las retracciones y aumentar las resistencias del mortero, según la NCh 158 of 67.



Fig.4.4: Piscina de curado

g. Ensayes

Los ensayos a realizar dentro de laboratorio indicarán los niveles de fotocatalisis, resistencia a compresión y transporte de sustancias (capilaridad y permeabilidad al aire y al agua) del mortero que afectan indirectamente la durabilidad de éste. Los distintos ensayos quedan expresados en el diseño factorial de la tabla 4.3

Tabla 6.3 Diseño factorial

CANTIDAD DE DIOXIDO DE TITANIO		0%	2%	5%	
TIPO DE MORTERO		1:3	1:0.02:3	1:0.05:3	
DOSIS DE CEMENTO KG/CM³		480.41 kgr/cm³	478.68 kgr/cm³	476.10 kgr/cm³	
NOMENCLATURA		MUESTRAS 1 (M1)	MUESTRAS 2 (M2)	MUESTRAS 3 (M3)	
ENSAYOS MORTERO FRESCO		Co, %a	Co, %a	Co, %a	
ENSAYOs DE MORTERO ENDURECIDO					
EDAD (DÍAS)	7		RC (3)	RC (3)	RC (3)
	14		RC (3)	RC (3)	RC (3)
	28		RC (3) , C, P (3)	RC (3) , C, P (3)	RC (3) , C, P (3)
	56		C, P (3), PA	C, P (3),PA	C, P (3), PA
	90		C, PA	C, PA	C, PA

Nota: En el ensayo de capilaridad y permeabilidad al aire se usará las mismas probetas confeccionadas durante los primeros días, ya que no es un ensayo destructivo, solamente ocurre el endurecimiento de la mezcla de pasta de cemento. No afectando así los ensayos evaluados.

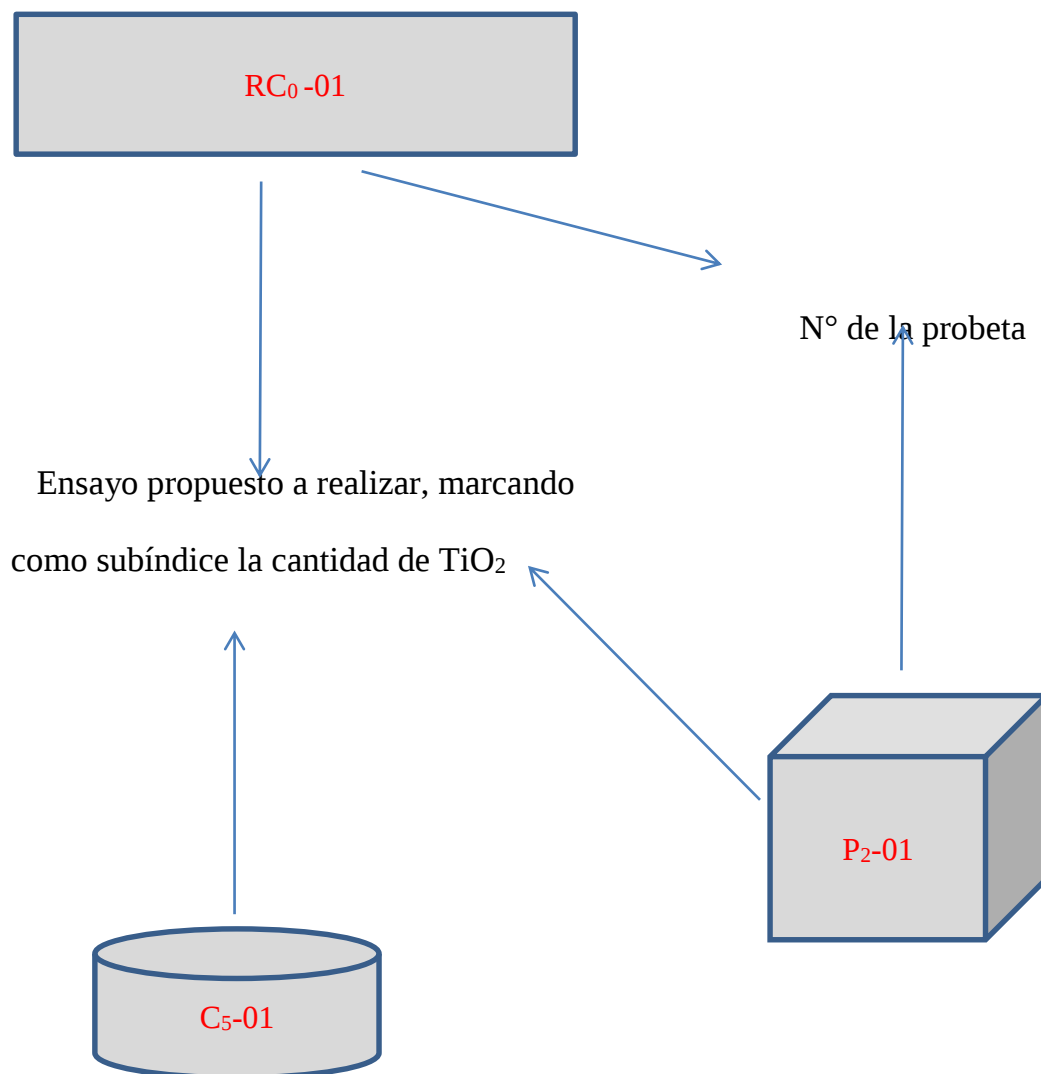
Nomenclatura de ensayos:

EL NUMERO DE PROBETAS SE IDENTIFICA ()	RC (), C (), P (), PA ()
Co	Ensayo de consistencia
%a	Contenido de aire
RC	Resistencia a la compresión
P	Permeabilidad al agua según Nch 2262 of.2009
C	Capilaridad
PA	Permeabilidad al aire

4.2.2 Nomenclatura de probetas

Para un mejor desarrollo de la investigación las probetas a realizar serán marcadas para acondicionarlas a los ensayos señalados a continuación

Para los distintos ensayos expresados anteriormente en el diseño factorial se utilizarán probetas de tamaño de 40 x 40 x 160 mm, cúbicas de diámetro 150 mm y cilíndricas de un diámetro de 100 mm y una altura de 50 mm, que serán marcadas con las siguientes siglas y números para ser identificadas según su ensayo:



4.3 Ensayos en laboratorio

4.3.1 Ensayo de consistencia

La determinación de la consistencia del mortero se lleva a cabo mediante el método de asentamiento en la mesa de sacudidas, cuyos procedimientos se encuentran en la norma NCh 2257/1 Of96 “Morteros - Determinación de la consistencia -Método del extendido en la mesa de sacudidas”.

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a. Colocar el molde troncocónico centrado sobre la plataforma, estando todos los elementos limpios y secos. Llenar el molde en dos capas y compactar cada una de ellas con 20 golpes de pisón repartidos uniformemente, con la presión necesaria y suficiente para asegurar un llenado uniforme.
- b. Enrasar con regla, evitando compactar el mortero.
- c. Retirar los derrames y secar la plataforma alrededor del molde.
- d. Levantar cuidadosamente el molde y, de inmediato, accionar el sistema.
- e. para dejar caer la plataforma por 25 veces en 15 s, en forma regular.
- f. Medir y registrar cuatro diámetros equidistantes, con una exactitud de 1 mm, con el pie de metro u otro instrumento de medición

4.3.2 Ensayo de contenido de aire

El contenido de aire del mortero es una propiedad de gran importancia que permite explicar, en muchos casos, el comportamiento que tenga este tanto en su estado fresco como endurecido. Esto justifica que en la fabricación de morteros se tenga un control especial sobre esta propiedad. Se realizara de acuerdo a la norma NCh 2184.Of 92 Hormigón y mortero - Método de ensayo – Determinación del contenido de aire.

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a. Enrasar y alisar la superficie perfectamente con el nivel superior del recipiente, utilizando la regla de enrase apoyada sobre el borde.
- b. Limpiar el borde del recipiente, eliminando restos de mortero.

- c. Cerrar las válvulas para aire y abrir las llaves par agua.
- d. Colocar la tapa centrándola cuidadosamente y apretar las abrazaderas, verificando previamente que la goma de ajuste esté perfectamente limpia.
- e. Introducir agua por una de las llaves hasta que fluya por la otra, golpeando lateralmente con la maceta para expulsar burbujas de aire atrasadas en el agua introducida.
- f. Bombear aire a la cámara de presión hasta que la aguja del dial sobrepase ligeramente el punto de partida de las lecturas. Reposar algunos segundos para enfriar el aire comprimido. Estabilizar la aguja, mediante bombeo o purga, exactamente en el punto de partida de las lecturas.
- g. Abrir la válvula de traspaso. Golpear suavemente los costados del recipiente, como también la tapa del dial para estabilizar la aguja.
- h. Registrar la lectura en % de aire, con aproximación al 0,1 %.

4.3.3 Ensayo de resistencia a compresión

En principio, el procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero se realizara de acuerdo a la norma NCh 158 Of.67 Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a. Se confecciona probetas rílem de sección de 40 mm de ancho y 160 mm de largo.
- b. Se ensaya compresión en una sección de 40 x 40 mm., aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las 8 laterales del moldaje, colocándose entre las placas de la máquina de compresión.
- c. La velocidad de carga fue tal, que la presión sobre la probeta aumente entre 10 y 20 Kg/cm²/s.
- d. Se registró la máxima carga “P”, expresada en Kg/cm²

4.3.4 Absorción capilar

Este ensayo establece el procedimiento para medir la velocidad de absorción capilar de agua del mortero. Esta propiedad física consiste en el transporte inducido por la tensión superficial del agua que actúa sobre los capilares del mortero y, se determina registrando las variaciones de peso de unas muestras de mortero que se encuentran en contacto con el agua en una de sus caras.

Este ensayo se realizará de acuerdo al método de la norma argentina IRAM 1871 (basado en la norma europea SIA 162/1), el cual está basado en la absorción por efectos capilares. El ensayo se realizó en probetas de $f=110$ mm y $h=50$ mm.

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a- Se determina el diámetro del área de la sección transversal de cada una de las probetas o testigos de la serie de ensayo, promediando los largos de dos diámetros normales medidos en la mitad de la altura de cada espécimen. Se determina el área de la sección transversal (A_i).
- b- Se sella con pintura impermeabilizante toda la superficie lateral de las probetas o testigos para evitar la absorción en ese sector.
- c- Previo al ensayo, las probetas o testigos se deben colocar y mantener sumergidas en agua, durante un período de 72 horas.
- d- Las muestras se secan en horno a $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, en un ambiente de laboratorio con una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- e- Una vez secadas las probetas o los testigos, se registra la masa seca (M_{si}) y se recubren con doble pliego de una película de polietileno durante 24 h.
- f- Luego de extraerles la envoltura de polietileno, las probetas o testigos se introducen en el recipiente sobre la base de apoyo, con una altura de agua respecto de la base de absorción de $3\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ y a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este instante se registra como el tiempo inicial del ensayo ($t=0$). Las probetas o testigos se introducen en forma inclinada para facilitar la humectación de la superficie, y con el objeto de evitar la formación de burbujas de aire.
- g- En los tiempos de 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24 horas y hasta masa constante, se retira cuidadosamente cada probeta o testigo, se enjuaga con el paño la base de absorción, la superficie lateral y se determina la masa húmeda (M_{hit}). Cada

pesada debe completarse en 30s. Para cada probeta en el instante de lectura (t) se determina el incremento de masa por unidad de área (C_{it}) mediante la Fórmula siguiente (Ec. 4.1.):

$$C_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i}; \text{ en } \left(\frac{g}{m^2} \right) \quad \text{Ec 4.1}$$

Dónde:

C_{it} = incremento de masa por unidad de tiempo de la sección transversal de la probeta (g/cm^2).

M_{it} = masa húmeda de la probeta, en gramos.

M_{si} = masa seca de la probeta, en gramos.

A_i = área de la sección transversal de la probeta, en metros cuadrados.

4.3.5 Permeabilidad al agua

Se realizará de acuerdo a la norma NCh 2262.of 2009: Hormigón y mortero - Métodos de ensayo - Determinación de la impermeabilidad al agua - Método de la penetración de agua bajo presión.

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a. Las probetas a ensayar se encontrarán sumergidas en agua saturada con cal 28 días desde su fabricación.
- b. A los 10 días $\pm$ 3 días de edad, las probetas se deben raspar con la escobilla de acero en la cara que va a estar sometida a la presión del agua y en la zona de dicha cara que no estará sometida a la presión, se aplicara un material de sellado, siendo este una pasta de cemento, o un material epóxico u otro similar, para prevenir la perdida de agua, procurando que sirva de mejor contacto con el anillo de ajuste.
- c. Después de 3 horas, las probetas deben ser devueltas a la piscina de curado hasta cumplir los 28 días de edad.
- d. Una vez que las probetas cumplan los 28 días, se coloca la probeta en el equipo para ensayarla, de modo que la presión que actúe sobre la cara tratada y las otras caras puedan ser vistas.

- e. Se coloca un anillo de sellado, de goma u otro similar entre la unión de la probeta y el equipo, evitando la pérdida de agua.
- f. Se debe aplicar presión de agua de $0,5 \pm 0,05$ MPa ($5,0985 \text{ kgf/cm}^2$) durante un período de 72 horas.

Si en alguna probeta, llegara a desbordarse el agua, o filtrarse, se deberá tomar una nueva muestra y la muestra anterior deberá ser eliminada.

Una vez terminado lo anterior, se realizará un corte a la probeta, y se medirá la penetración del agua y la forma en que se distribuye, marcando la zona para definir claramente la zona. La impermeabilidad del mortero será medida como el promedio de las máximas profundidades de penetración de agua en mm, con aproximación a 1mm.

4.3.6 Permeabilidad al aire (método Torrent)

El método “Torrent” fue desarrollado principalmente para el control de ejecución, es decir, para ser aplicado a estructuras nuevas; sin embargo, la técnica puede aplicarse en estructuras ya construidas, para obtener información sobre la calidad del mortero de recubrimiento.

Descripción del “Método Torrent” La disposición del instrumental del aparato se esquematiza en la Fig. 4.5.

Sus dos características distintivas son:

- a) Una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda. Consiste en una cámara interna i y una cámara externa e.
- b) Un regulador de presión a membrana, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$).

La operación del aparato es como sigue: con las válvulas 1 y 2 abiertas, se crea vacío en ambas cámaras mediante la bomba. Cuando la presión P_i baja a ~ 30 mbar se cierra la válvula 2, momento a partir del cual la bomba solo puede actuar (cuando se lo permite el regulador) sobre la cámara externa, de manera de equilibrar en todo momento la presión en ambas cámaras. De este modo, todo exceso de aire que ingrese lateralmente en la cámara externa será evacuado por la cámara exterior. Así se logra que el flujo de aire hacia la cámara central sea básicamente unidireccional y no afectado por el ingreso espurio de aire, sea por un deficiente sellado de la cámara externa o a través de la más permeable 'piel' superficial.

La evolución de la presión P_i se mide a partir de los 60 s con un sensor de presión comandado por un microprocesador que tiene integrado un cronómetro. El microprocesador almacena la información y efectúa los cálculos para mostrar automáticamente, al fin del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2). El fin del ensayo acontece cuando la elevación de la presión en la cámara interna P_i alcanza 20 mbar o, en el caso de hormigones muy impermeables cuando han transcurrido 720 s desde el comienzo del ensayo. Así, dependiendo de la permeabilidad del mortero, el ensayo puede durar de 2 a 12 minutos. El microprocesador es capaz de almacenar los datos de los ensayos y la información puede ser transferida a una PC para su posterior análisis y registro. La función de la válvula 1 es restablecer el sistema para un nuevo ensayo ventilándolo con aire a la presión atmosférica.

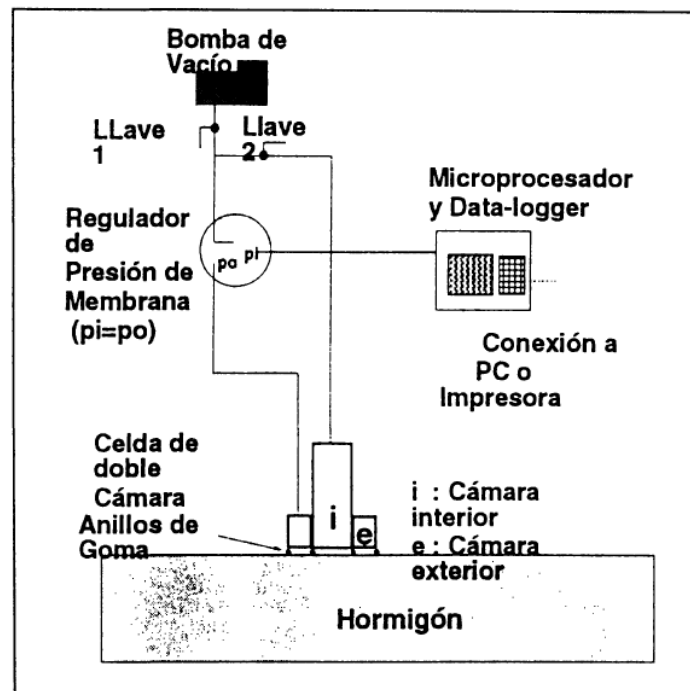


Fig.4.5: Esquema y detalle del método Torrent

(Fuente: Manual Técnico, R. J. TORRENT "Holderbank" Management & Consulting Ltd (2010))

Dado que en este método el fenómeno del problema está bien definida, mediante un modelo teórico es posible calcular el coeficiente de permeabilidad, aplicando la ecuación siguiente ecuación 4.2 .El conocimiento de kT permite estimar la profundidad de mortero afectada por el ensayo, que también es indicada por el equipo.

$$k_T = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left(\frac{\ln \left(\frac{p_a + p}{p_a - p} \frac{p_a - p_o}{p_a + p_o} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_o}} \right)^2$$

Ec 4.2

Dónde:

k_T : coeficiente de permeabilidad al aire del recubrimiento [m^2]

V_c : volumen de la cámara interior [m^3]

A : área de la cámara interior [m^2]

μ : viscosidad dinámica del aire [Ns/m^2]

ε : porosidad del mortero [-]

p_a : presión atmosférica [N/m^2]

p_o : presión en la cámara interior al inicio del ensayo $t_o = 60 \text{ s}$ [N/m^2]

p : presión en la cámara interior al final del ensayo t ($t \leq 720 \text{ s}$) [N/m^2]

Este método, que se describe, se emplea principalmente para la medición de la permeabilidad intrínseca al aire del mortero de recubrimiento (k_T) y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se establece una valoración de la calidad del recubrimiento, según la siguiente tabla.

Tabla 4.4 Medición de permeabilidad al aire

Clase	k_T (10^{-16} m^2)	Permeabilidad
PK1	< 0,01	Muy baja
PK2	0,01 – 0,1	Baja
PK3	0,1 – 1,0	Moderada
PK4	1,0 – 10,0	Alta
PK5	> 10	Muy alta

(Fuente: Manual Técnico, R. J. TORRENT "Holderbank" Management & Consulting Ltd (2010)).

4.3.7 Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de NO_x

Para la medición de la degradación de los óxidos de nitrógeno (NO_x) se utilizará la norma UNE-ISO 22197-1:2007. La norma plantea un método para la determinación de la actividad descontaminante de materiales. El ensayo consiste en la exposición continua de una muestra a un gas contaminante bajo radiación UV y la medición de las concentraciones de dicho gas antes y después de pasar por la muestra. Este procedimiento puede ser utilizado con diferentes tipos de materiales, como los materiales cerámicos y los materiales de construcción.

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a- Se enciende la lámpara y se ajusta a la irradiancia deseada ($10 \pm 1 \text{ W/m}^2$).
- b- Se enciende el detector de NO_x y la bomba.
- c- Se ajustan los flujos de NO, aire seco y aire húmedo para obtener, para cada caudal, una concentración de NO igual a $1000 \pm 50 \text{ ppbv}$ y una humedad relativa del $50 \pm 10\%$ a $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- d- Se coloca la muestra en el reactor y se cierra el mismo, asegurándose que se encuentra convenientemente sellado para evitar fugas. Se inicia el ensayo con el by-pass abierto ($t_0 = 0$). A los 2 minutos se cierra el by-pass para permitir el paso del gas por el reactor, durante 3 minutos. A los 5 minutos del inicio del ensayo (t_1) se irradia la muestra durante 30 minutos (t_2). El valor inicial de la concentración de cada gas (C_{in}) se calcula tomando la lectura obtenida inmediatamente antes de iniciarla irradiación.
- e- Transcurrido ese tiempo, se vuelve a proteger el reactor de la luz, con lo que la concentración de NO vuelve al valor inicial.

En la figura 4.7 y 4.8 se puede observar los materiales requeridos para el ensayo:



Fig.4.6: Analizador de gases

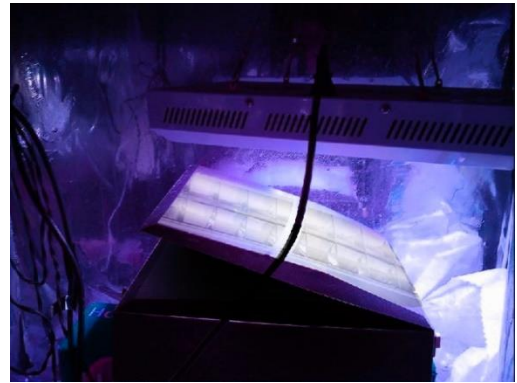


Fig.4.7: Fotoreactor.

4.3.8 Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de compuestos orgánicos

Para la medición de la degradación de compuestos orgánicos se utilizará el procedimiento experimental del autor Yuranova (2007). El ensayo plantea un método para la determinación de la actividad de degradación de partículas orgánicas sean estos, tintes, manchas superficiales de descoloramiento y cualquier tipo de material que afecte al enlucido de una capa superficial de mortero. El ensayo consiste en la exposición continua de una muestra líquida bajo radiación UV y las mediciones de áreas expuesta antes y después de pasar por el compuesto orgánico utilizado. Este procedimiento puede ser utilizado con diferentes tipos de materiales de la construcción

El procedimiento empleado es el siguiente:

- a. Las probetas a ensayar deben estar limpias de impurezas, deberán ser lavada en agua desionizada durante 30 minutos y luego sometidas en horno durante 24 hrs a $110^{\circ}\text{C} \pm 5$.
- b. Se usará una lámpara que alcance $90\text{W}/\text{m}^2$ a una altura de 30 cm desde la parte superior de la probeta hasta la ampolleta, esta podrá ser de tipo LED o Haluro metálico.
- c. El componente orgánico , será cualquier líquido que descolore a las placas, ejemplo de estos líquidos, son el vino , aceite de maíz o el benceno,
- d. Con gotario se dispersa entre 10 a 15ml de líquido de composición orgánica.
- e. Se utilizará cualquier medio de fotografía o sistema, para medir el área degradada durante un periodo de 72 hrs

5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se centra en la presentación de los resultados obtenidos de las mezclas confeccionadas con distintos porcentaje de dióxido de titanio (0%, 2 % y 5%) de acuerdo al peso del cemento indicados en la tabla 4.1, y sometidas a los ensayos descritos en el capítulo 4. Estos contemplaron análisis en estado fresco para la determinación de su consistencia y aire atrapado en la mezcla, como a su vez en estado endurecido determinándose capilaridad, permeabilidad al aire y agua y la capacidad fotocatalíticas del mortero propuesto según Nch 2256 Of.2013 “Morteros- requisitos generales”.

5.1 Ensayo de consistencia

Según la norma chilena, NCh 2256/1, la consistencia es el grado de fluidez del mortero fresco, que depende fundamentalmente de la razón agua/cemento y que, debe ser medido de forma extendida en la mesa de sacudidas según NCh 2257/1. El valor de consistencia para un mortero puede variar en estado seco, plástico y fluido entregados en la tabla 5.1, donde el resultado más óptimo recae entre los 180 mm y 220 mm para un revestimiento de enlucido, entregando una mejor trabajabilidad y transporte del mortero en cuanto a colocación en muros.

Tabla 5.1 Tabla de consistencia de un mortero

Tipos	Extendido	Cono reducido
	mm	mm
Seca	<180	<10
Plástica	180-220	10-30
Fluida	>220	>30

(Fuente: NCh 2256 Of.2013 “Morteros- requisitos generales”).

Después de haber realizado el ensayo los resultados fueron los siguientes:

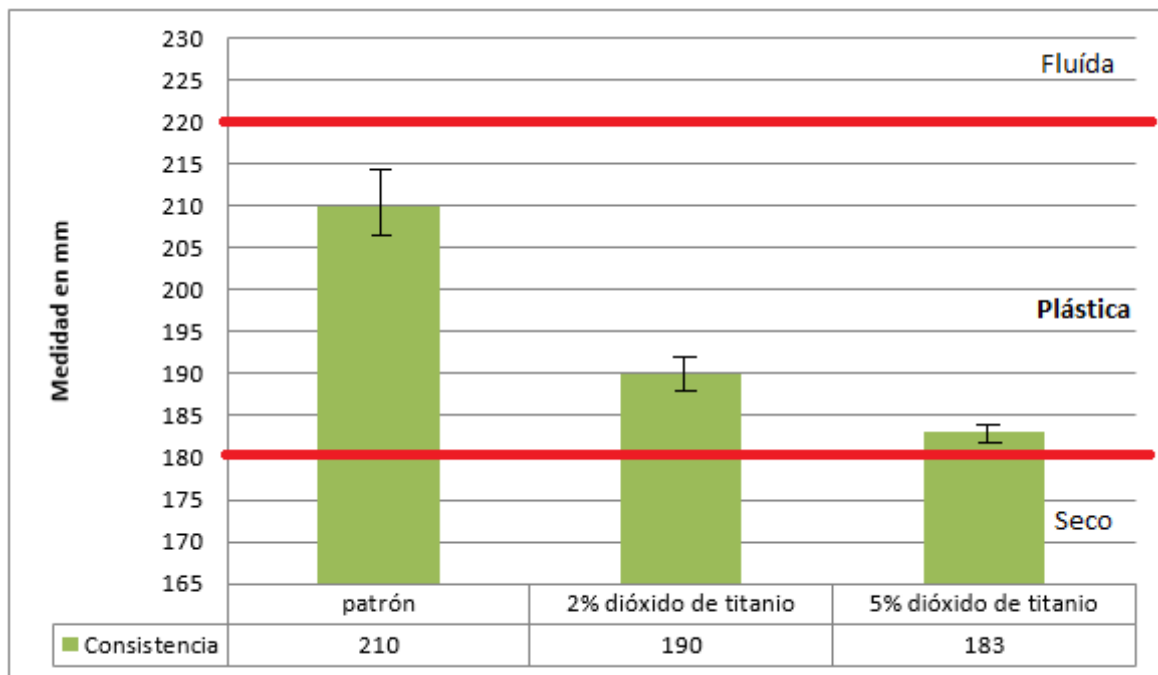


Fig.5.1: Gráfico de consistencia.

En el gráfico se puede apreciar que el aumento de la dosis de dióxido de titanio en la mezcla produce un mortero de consistencia más seca, es decir, las propiedades mismas del pigmento TiO_2 tiende a absorber el agua retenida en la mezcla, pero de igual manera las muestras desarrolladas llegan a cumplir los requerimientos según la NCh 2256 Of.2013 para el desarrollo de un mortero de revestimiento.

En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se pueden apreciar y distinguir las distintas imágenes del proceso de ejecución del ensayo obtenidos en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Valparaíso.



Fig.5.2: Consistencia de mortero patrón en mesa de sacudidas



Fig.5.3: Consistencia de mortero con adición de 2% de dióxido de titanio



Fig.5.4: Consistencia de mortero con adición de 5% de dióxido de titanio.

5.2 Ensayo de contenido de aire

El método que se describe en el capítulo anterior es para determinar el contenido de aire del mortero fresco; este se basa en la medición del cambio de volumen del mortero sometido a un cambio de presión calculado a través de Aparato tipo Washington que registra directamente el contenido de aire en %, con respecto al volumen de mortero.

Los resultados obtenidos de % de aire son los siguientes:

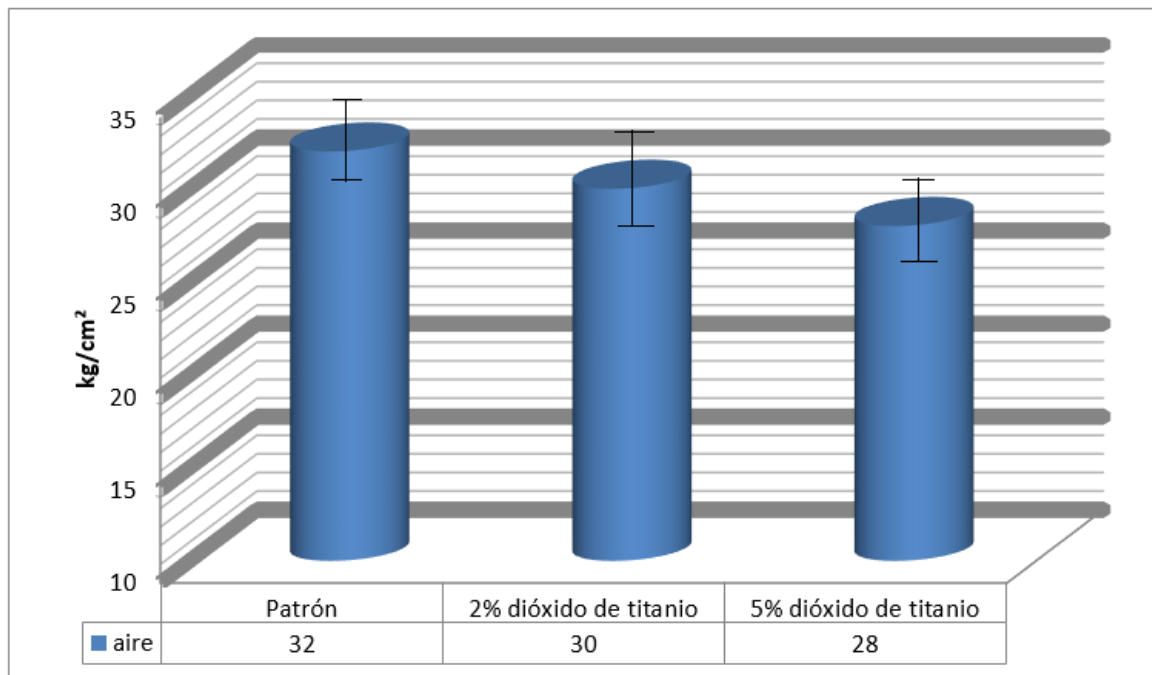


Fig.5.5: Gráfica de contenido de aire en el mortero

El resultado del ensayo muestra una disminución en el porcentaje de aire a medida que aumenta el contenido de TiO_2 , mostrando variaciones de 6.25% de aire ocluido en un 2% de TiO_2 , y un 12,5% de aire ocluido para un 5% de TiO_2 considerando todos los datos respecto al patrón establecido inicialmente, que son expresadas en la fig.5.5. Esto puede tener beneficios en su resistencia e impermeabilidad, pero también contaría con una menor trabajabilidad y resistencia al hielo-deshielo.

5.3 Ensayo de compresión

Los morteros para revestimiento se clasifican según grados de resistencia a compresión, determinada según la NCh 158 Of.67, dando como resultado parámetros

de calidad y resistencia del revestimiento. Para ello se utilizaron moldes tipo RILEM de 4x4x16 cm, ensayados a los 7, 14 y 28 días, para así establecer una relación gráfica de la resistencia de la pasta de cemento, ver fig. 5.6.

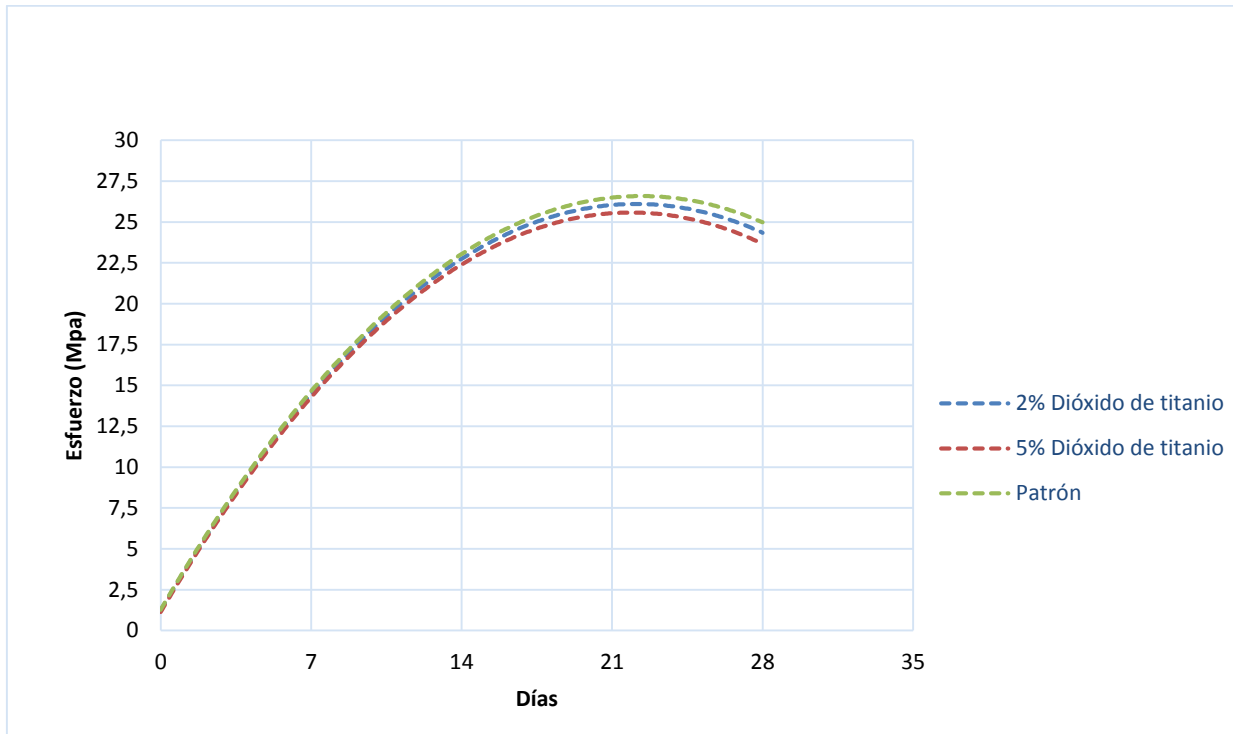


Fig.5.6: Gráfica de resistencia a compresión del mortero.

En el gráfico se puede apreciar los distintos grados de resistencia ensayados con probetas prismáticas a los días especificados anteriormente. A medida que hay un incremento de la nanopartícula de TiO_2 , la resistencia mecánica disminuye.

En los primeros 7 días, la variación de resistencia mecánica al añadirle la nanopartícula influye negativamente en un rango del 1,5 al 4 % de su resistencia respecto al patrón.

Ya al llegar al día 14, el incremento en la resistencia de la pasta de cemento logra alcanzar una resistencia promedio de 20 MPa, variando levemente sus resistencias, alcanzando un rango de variación alrededor de 1,17% al 1,76 % respecto al patrón.

Sin embargo, a los 28 días, la variación entre sus resistencia es del 2% al 6% del patrón establecido. Estos cambios de resistencia obtenidos en laboratorio no tienen

trascendencia en un mortero de revestimiento, los grados de variaciones son muy poco significativos. El uso de esta adición a una mezcla de mortero tendría una leve repercusión en la resistencia mecánica de un muro de revestimiento.

La NCh 2256:1 of 2013 clasifica los mortero según sus resistencia obtenidas a los 28 días en probetas ensayadas según Nch158, como se indica en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Grado de mortero para revestimiento según resistencia especificada, f_{mr}

Grado del mortero	Resistencia especificada Mpa
$M_r - A$	$0.5 < f_{mr} < 2.0$
$M_r - B$	$2.0 < f_{mr} < 4.0$
$M_r - C$	$4.0 < f_{mr} < 6.0$
$M_r - D$	$f_{mr} > 6.0$

(Fuente, Nch 2256 Of.2013 “Morteros- requisitos generales”)

Según la tabla anterior y tomando en cuenta la norma, las 3 dosificaciones obtenidas de mortero de cemento se considerarían un grado $M_r - D$, usándose preferencialmente en las áreas superficiales descritas en la siguiente tabla 5.3, según el grado establecido.

Tabla 5.3 Aplicaciones típicas según grado de mortero

Grado del mortero	Resistencia especificada Mpa
$M_r - A$	Revestimientos aplicados sobre albañilería de ladrillo hecho a mano o bloques de hormigón celular no expuestos a la intemperie.
$M_r - B$	Revestimientos aplicados sobre albañilería de ladrillo hecho a mano o bloques de hormigón celular expuestos a la intemperie.
$M_r - C$	Revestimientos aplicados sobre albañilería de ladrillo hecho a máquina, sobre albañilería de bloques de hormigón o muros de hormigón.
$M_r - D$	Revestimiento de bajo espesor, aplicados sobre albañilerías de bloques o muros de hormigón.

(Fuente, Nch 2256 Of.2013 “Morteros- requisitos generales”)

5.4 Absorción capilar

El ensayo de Absorción Capilar se realizó de acuerdo a la norma argentina IRAM 1871, señalada en capítulo anterior. A los 28 días de edad y a los 56 días de edad con un total de 3 muestras por cada tipo de mortero dosificado (ver fig.5.7). Cada valor obtenido representa un indicador de absorción de masa de agua por centímetro cuadrado.

Los resultados de los coeficientes de absorción para morteros de cemento, son los que se muestran en la tabla en el capítulo de ANEXOS (dependiendo de la diferencia en peso de agua absorbida (gr/m^2) y el tiempo).



Fig.5.7: Ensayo absorción capilar

Para tener una mayor apreciación de la velocidad de absorción en el área superficial del mortero de cemento, se confeccionaron 3 gráficos con los datos tabulados. El ensayo se realizó durante un periodo de 24 hrs, midiendo los gramos absorbidos de agua de cada una de las probetas, las cuales son ilustradas en las siguientes figuras (ver 5.8 ,5.9 y 5.10).

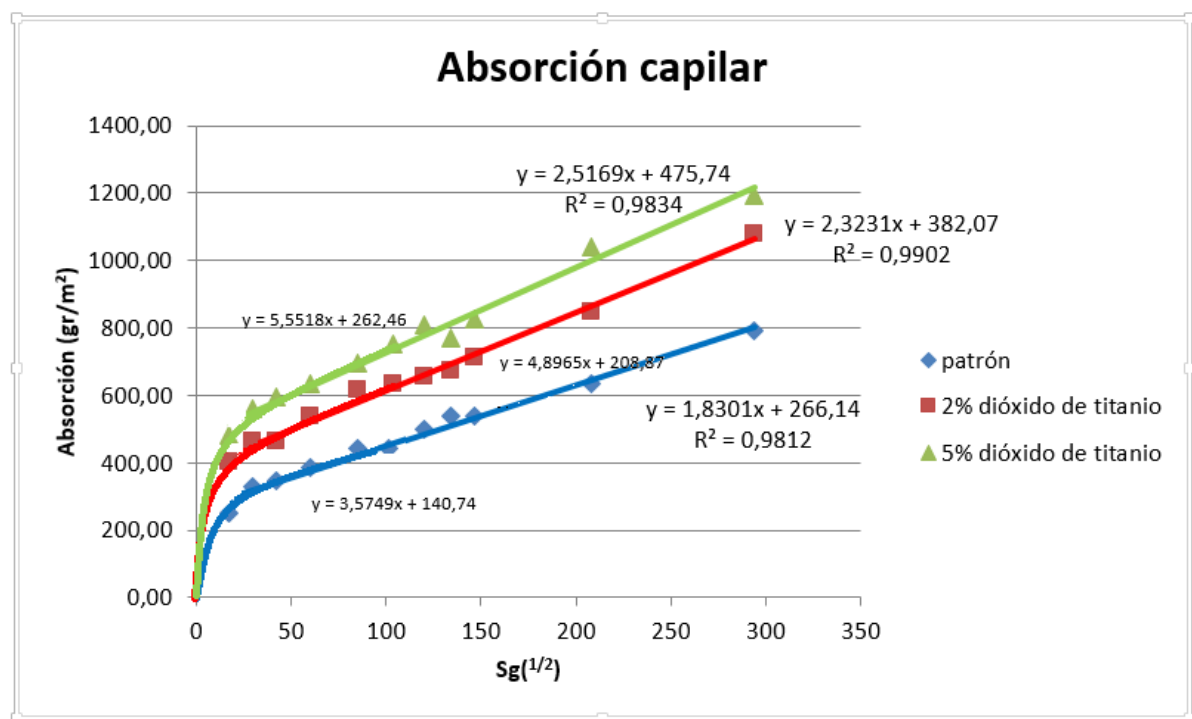


Fig.5.8: Absorción capilar a los 28 días

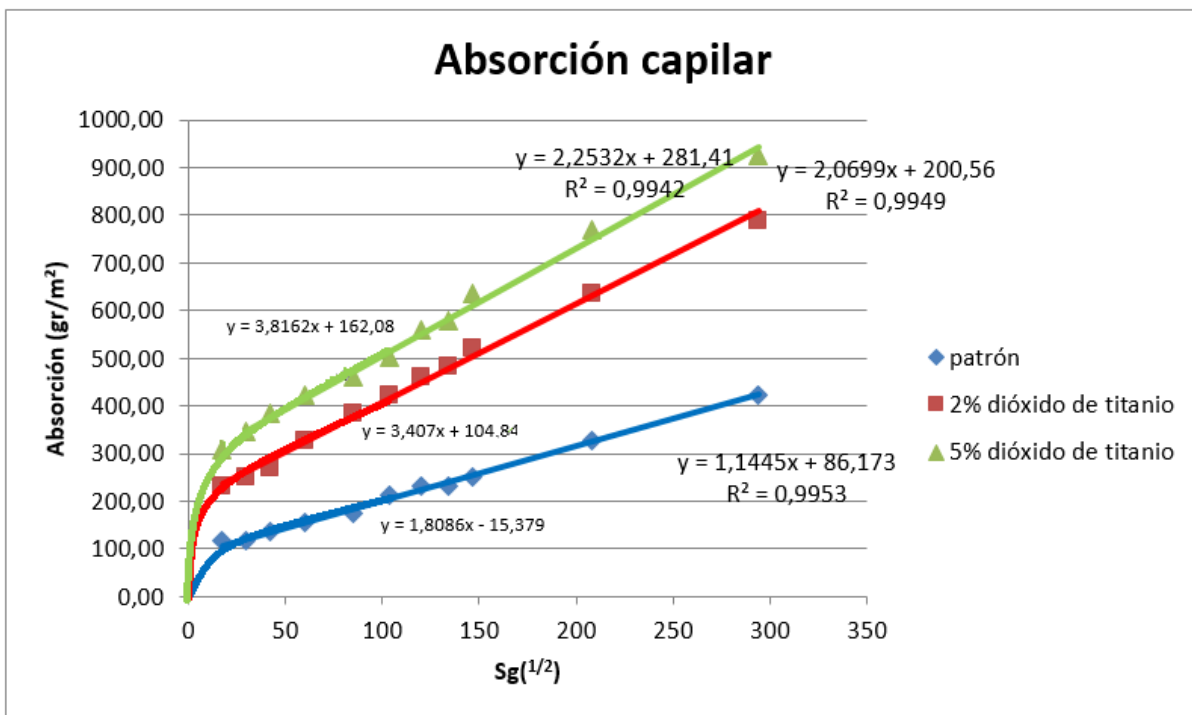


Fig.5.9: Absorción capilar a los 56 días

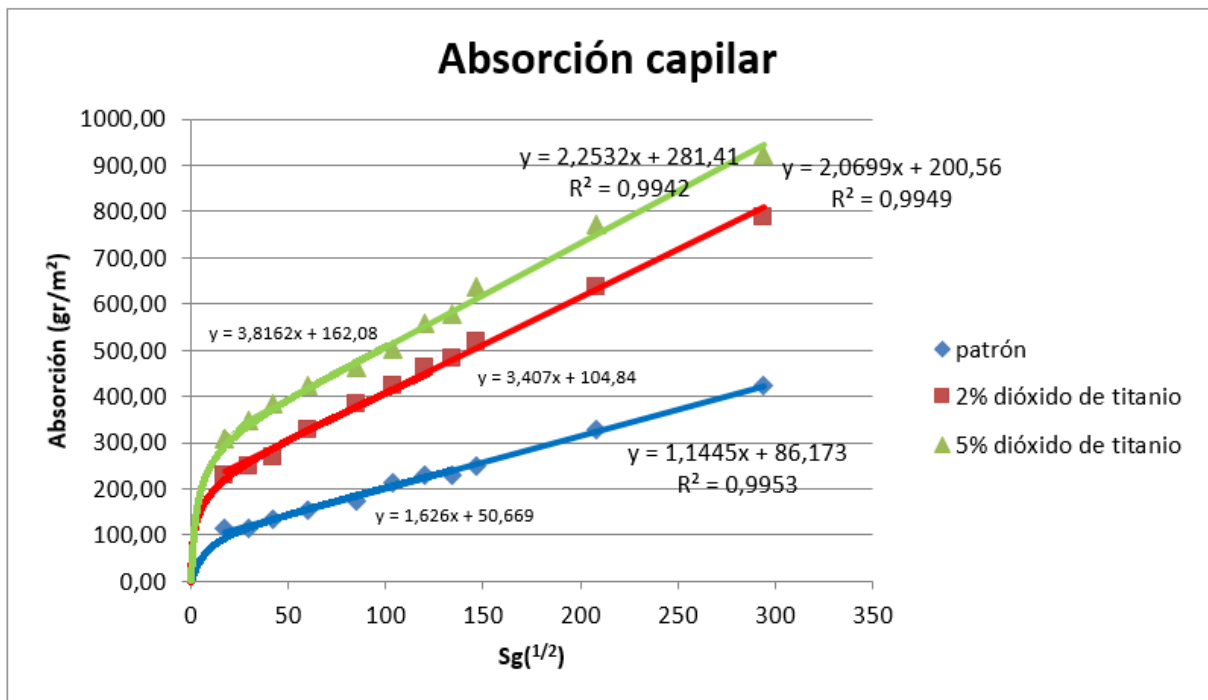


Fig.5.10: Absorción capilar a los 90 días

La tasa secundaria de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$) se encuentra definida como la pendiente de la línea que mejor se ajusta a “S” graficado versus la raíz cuadrada del tiempo ($\text{s}^{1/2}$) usando los puntos desde las horas estimada al ensayo. Se utilizó regresión lineal de mínimos cuadrados para determinar la pendiente. Si los datos obtuvieran un coeficiente de correlación menor que 0.98 y muestran una curvatura del tipo exponencial o parabólica, la tasa secundaria de absorción de agua no podría ser determinada en el ensayo.

Las velocidades de succión obtenidas son:

➤ A los 28 días:

- Mortero patrón con una velocidad de succión inicial de 3.57 y secundaria de 1.83 ($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- Mortero adicionado el 2% de TiO_2 con una velocidad de succión inicial de 4.89 y secundaria 2.32($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- Mortero adicionado el 5% de TiO_2 con una velocidad de succión inicial de 5.55 y secundaria 2.51($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)

➤ A los 56 días:

- Mortero patrón con una velocidad de succión inicial de 1.80 y secundaria de 1.14 ($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- Mortero adicionado el 2% de TiO_2 con una velocidad de succión inicial de 3.41 y secundaria 2.06($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- Mortero adicionado el 5% de TiO_2 con una velocidad de succión inicial de 3.80 y secundaria 2.25($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)

➤ A los 90 días:

- Mortero patrón con una velocidad de succión de inicial de 1.6 y secundaria 1.14 ($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- Mortero adicionado el 2% de TiO_2 con una velocidad de succión inicial de 3.41 y secundaria 2.06($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- Mortero adicionado el 5% de TiO_2 con una velocidad de succión inicial de 3.82 y secundaria 2.25($\text{gr/m}^2\text{s}^{1/2}$)

Al realizar el ensayo a los 28, 56 y 90 días, existen variaciones de su absorción. Esto ocurre porque el mortero todavía no establece un punto de equilibrio, según la literatura el cemento puzolánico tarda en reaccionar al dar finalizado el proceso de hidratación. El mortero de cemento logra reflejar una disminución en la interconexión de sus poros transcurrido los 90 días.

De acuerdo lo señalado anteriormente, la absorción capilar tiende a aumentar cuando existe una mayor concentración de TiO_2 en la mezcla, cabe recordar que el dióxido de titanio es un material higroscópico, o sea, tiende a absorber humedad del medio circundante. Al tener una mayor absorción de agua a través del tiempo, el transporte de sustancias entre sus poros tiende a ser más prolífera.

5.5 Permeabilidad al agua

El ensayo de impermeabilidad al agua, fue ejecutada según Nch 2262 of 2009, mencionada en capítulo 4, en la sección 4.3.4, y los resultados se expresan en la siguiente tabla:

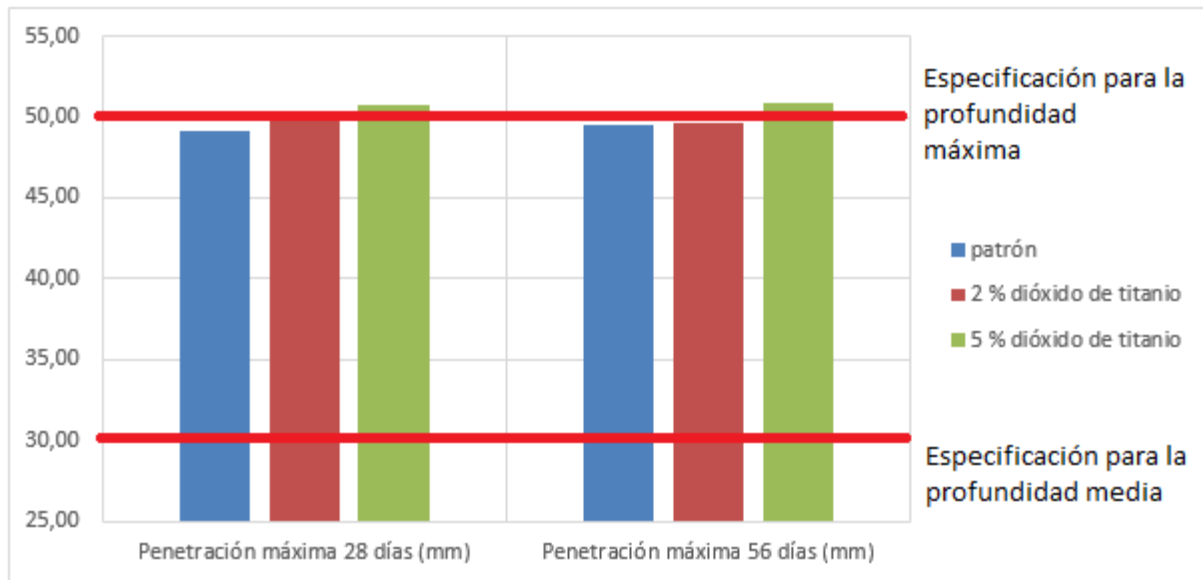


Fig.5.11: Resultados de penetración de agua

Los resultados obtenidos en el laboratorio, descrito en la fig 5.11 fueron a los 28 días y posteriormente a los 56 días, donde las probetas estuvieron sometidas durante 3 días en contacto con agua a una presión constante. Luego estas fueron cortadas en una prensa hidráulica donde se realizó la medición correspondiente a la altura entre los puntos más extremos en ambas caras interiores de la probeta (ver fig.5.12), para así establecer un promedio entre ellas, y obtener un resultado más preciso. Dentro los resultados el patrón obtuvo un promedio de penetración de 49,13 mm a los 28 días, no variando demasiado con respecto a los mortero con adición de TiO_2 , que para un 2% de TiO_2 solo tiene una diferencia de 1.04 mm y para 5% TiO_2 una diferencia de 1,6 mm.

Ya a los 56 días las probetas no tuvieron variación con respecto al ensayo realizado a los 28 días, las probetas con 2% TiO_2 tiene un diferencia de 0,13 mm con respecto a su patrón y para los 5% de TiO_2 difiere con el patrón en 1,33 mm.



Fig.5.12: Medición de penetración de agua

Dicho lo anterior, en el ensayo y según NCh 2262, no se observa una variación importante en resultados de permeabilidad al agua. Si tomamos en cuenta que el TiO_2 es un material que absorbe humedad por naturaleza, este pigmento no logra ni optimizar ni empeorar su impermeabilidad. Si bien hay un aumento de la penetración de agua, las mediciones no lograron variar de mayor manera, solamente en un rango de 1 a 2 mm. Considerando lo referido en el capítulo III este dependerá de factores mucho más relevante que la misma adición de la nanopartícula de TiO_2 , sean estos, la relación agua y cemento en la mezcla, compactación del mortero y cantidad de aire ocluido.

Aunque si comparamos los resultados con normas internacionales, éstas entregan valores referenciales para la máxima penetración, según la clase de exposición en la que se encuentre, donde apreciamos que en las normas EHE-08, CIRSOC 201, DIN 1045, entrega rangos máximo de 50 mm de penetración máxima y con una media de 30 mm, considerándolo un producto totalmente impermeable.

5.6 Medición de la permeabilidad al aire.

Para la determinación de la permeabilidad al aire en el mortero de cemento se empleó un equipo conocido como “Torrent”, apto para mediciones tanto en condiciones de laboratorio como in situ, de manera no destructiva.

El equipo opera de manera automática y en un tiempo menor o igual que 12 minutos se obtiene un valor de la permeabilidad al aire.

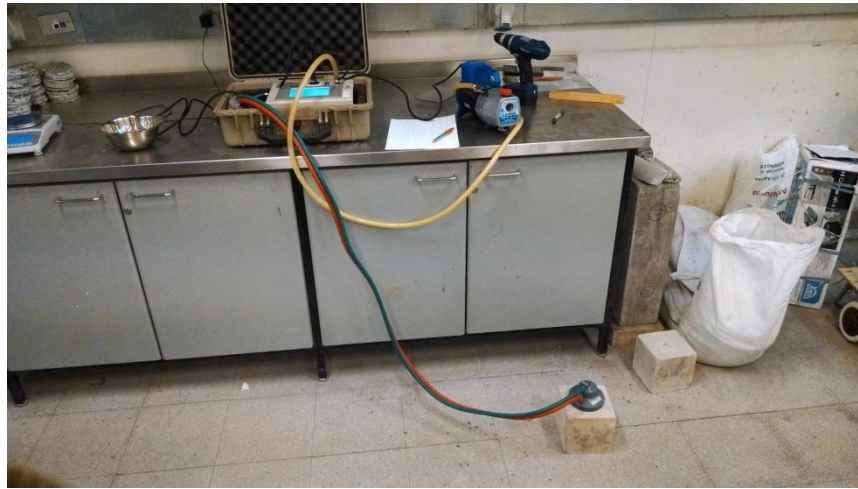


Fig.5.13: Equipo Torrent.

Tabla 5.4 Tabla de resultados de permeabilidad al aire 28 días

Mortero	λkT (10^{-16} m^2)	L	Permeabilidad
PA0	0.00551	<5	Muy baja
PA2	0.01216	<5	baja
PA5	0.025	10	baja

El mortero patrón se clasifica con una permeabilidad “Muy baja” en función del coeficiente de permeabilidad al aire (λkT), presentado en la tabla 5.4, como también la profundidad de penetración por el aire logra ser medida dando como resultado inferior a 5 mm, lo mínimo expresado en la unidad de medición del ensayo. Al tener adicionada la partícula TiO_2 las probetas tienden demostrar un valor de mayor penetración, a su vez un incremento de la permeabilidad de los morteros, en donde los resultados obtenidos a los 90 días demuestran claramente que la partícula de TiO_2 no ayuda en una mejora en la permeabilidad del mortero, sino que induce a una mayor cantidad de transporte de sustancias. Si se toma en cuenta lo expuesto en el capítulo 4 en la tabla 4.4 donde clasifica los rangos de permeabilidad con respecto al λkT y comparamos ambos resultados de TiO_2 con el patrón, puede existir varias razones que incrementen su permeabilidad, una de ellas es porque, sus poros se encuentran abiertos, esto quiere decir que sus ductos se encuentran mucho más conectados entre sus poros, porque la porosidad puede ser prácticamente igual, pero sus enlaces marcan la diferencia para el transporte.

5.7 Análisis y medición de la actividad fotocatalítica.

5.7.1 Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de NO_x .

Se realizó el ensayo según UNE-ISO 22197:1, con 3 probetas de cada espécimen con la dosificación propuesta.

Las condiciones generales del ensayo para las probetas fueron las siguientes:

- Caudal de gas para las mediciones: 3 L/min
- Concentración NO: 1 ppb
- Humedad relativa: $50 \pm 10\%$
- Led hortilight 400 W.

Por lo tanto dentro del reactor se mantienen constantes los caudales, la concentración de NO, la irradiancia y la humedad relativa durante el tiempo de ensayo. Los valores obtenidos se encuentran en el capítulo de ANEXOS:

Una vez medido las cantidades de gas concentrado NO_x , se confecciono la siguiente grafica a continuación (Fig 5.13)

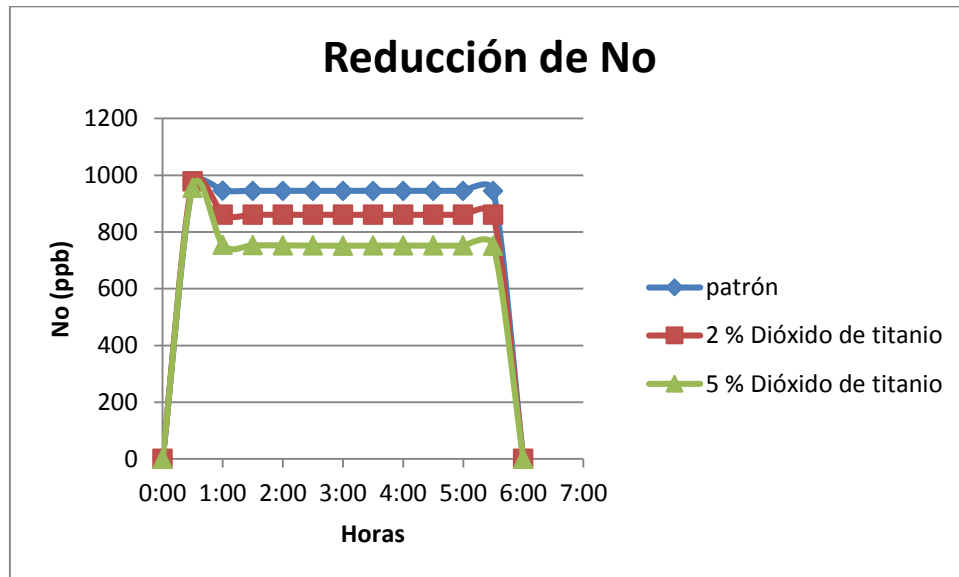
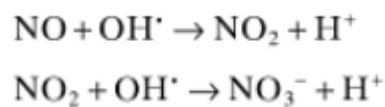


Fig.5.14: Reducción de NO_x en mortero de cemento.

Dado a los gráficos anteriores, se deduce que a mayor cantidad de TiO_2 en la mezcla, su poder fotocatalítico tiende a aumentar en la reducción de los gases NO_x , el patrón establecido sin adición tiende a disminuir los gases, pero en menor grado, ya que el cemento utilizado contiene un grado de TiO_2 en su composición química, sin

embargo, lo que reduce este patrón es un valor de 2,1% de los gases NO_x . En las probetas con un 2% TiO_2 la disminución de los gases alcanza entre un 12% de reducción de gases NO_x y las probetas ensayada con un 5% de adición logra alcanzar un 21 % de reducción.

También cabe recalcar que el método utilizado por quimioluminiscencia (ISO 22197:1), tiende a la formación de dióxido de nitrógeno dentro de la cámara, ya que la reacción del ozono incorporado para medir la cantidad de NO_x , prolifera la formación de dióxido de nitrógeno en la cámara, pero logra ser reducido, pero no en su totalidad como muestra la siguiente ecuación química:



Ec.5.1

Ahora como resultado de todo proceso químico la reacción en cadena que ocurre en la degradación de los gases NO_x , implica la disolución de iones de nitrato en la formación de ácido nítrico, que podría ser perjudicial a través del tiempo para el mortero de cemento, pero fácilmente puede ser limpiados con agua pluviales (lluvias), concentrando la lluvia acida en alcantarillas y suelos y no en el espacio ambiente.

La grafica a continuación (Fig. 5.14), nos entrega el rendimiento obtenido por una placa en 1 m^2 de superficie, para tener un mayor entendimiento de reducción de estos gases:

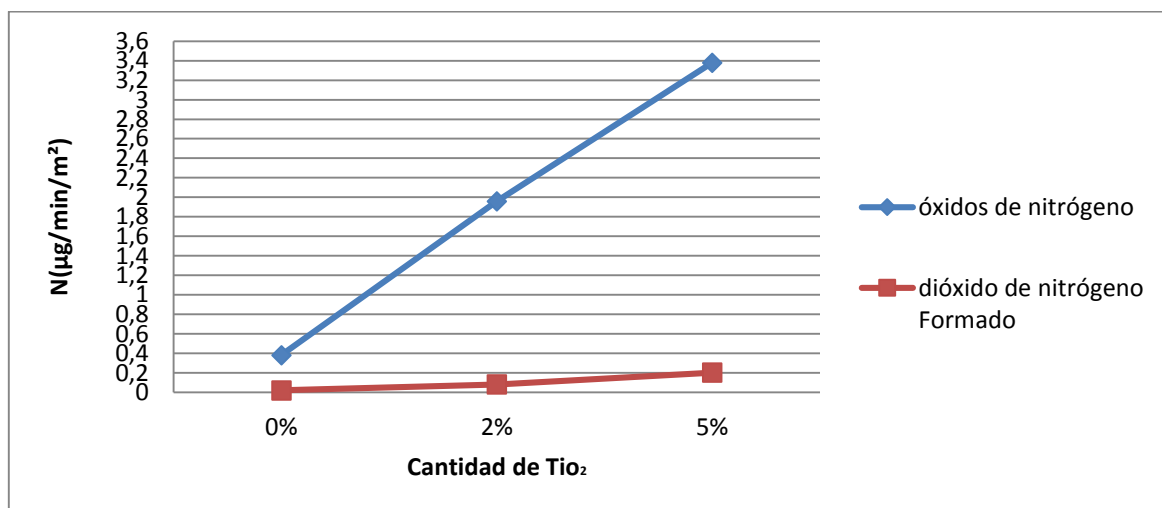


Fig.5.15: Cantidad de moles eliminado de NO_x y NO_2 formados en un metro cuadrado con un caudal de 3 l/min.

Podemos deducir que la cantidad reducida de gases NO_x en un m^2 depende netamente de la cantidad de dióxido de titanio en la mezcla, su incremento al 5% reduce aproximadamente $3.38 \mu\text{g}$ de NO_x , con un caudal constante de 3 L/min . Si lo llevamos a un ejemplo a la realidad, generalmente en Chile, en la zona de Valparaíso tiene de alrededor de 10 hasta 14 horas de luz solar desde la salida del sol hasta su puesta según el horario de invierno / verano, si consideramos el mínimo de horas que serían 10, expuesto con las distintas cantidades de dióxido de titanio, en un m^2 reducirían las siguientes cantidades en un día:

- Mortero patrón con una reducción de $228 \mu\text{g}$ de gases NO_x aprox.
- Mortero adicionado el 2% de TiO_2 con una reducción de $1176 \mu\text{g}$ de gases NO_x aprox.
- Mortero adicionado el 5% de TiO_2 con una reducción de $2028 \mu\text{g}$ de gases NO_x aprox.

Además podemos añadir que en Chile la norma de calidad primaria de aire contempla en 1 hora será con un máximo $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, según estos datos tenemos que:

- Mortero patrón con un nivel mínimo de reducción alcanzaría en una hora la cantidad de $22.8 \mu\text{g}$ de su concentración en un espacio de 1 m^3 .
- Mortero adicionado el 2% de TiO_2 alcanzaría en una hora la cantidad de $117.6 \mu\text{g}$ de su concentración en un espacio de 1 m^3 .
- Mortero adicionado el 5% de TiO_2 alcanzaría en una hora la cantidad de $202.8 \mu\text{g}$ de su concentración en un espacio de 1 m^3 .

Con el mortero con una dosificación de 5% de TiO_2 este lograría adecuarse a la norma de calidad en sectores donde hubiera su tope máximo fueran de $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora, o sea, si logra alcanzar $202,8 \mu\text{g}$ de reducción en un espacio de 1 m^3 , los $600-202.8$ daría como resultado $398.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora, donde la calidad primaria de aire contempla para un 1 m^3 un valor de $400 \mu\text{g}$ como máximo.

5.7.2 Medición de la actividad fotocatalítica por la degradación de compuestos orgánicos.

Con la finalidad de demostrar la capacidad de auto-limpieza del mortero, se realizó ensayo, en donde A. Maury y N. Belie proponen un ensayo de degradación con productos de tinte orgánico producido por T. Yuranova (2007), esto quiere decir, la utilización de algún líquido que pueda teñir el mortero, en este caso usaremos un vino tinto, el procedimiento usado es el siguiente:

- Las probetas a ensayar (mortero patrón y con un 5% de TiO_2) se dispusieron al horno para eliminar cualquier material orgánico durante un periodo de 24 horas
- Luego se dispuso de una lámpara haluro metálico de 90W/m^2 a una altura de 30 cm desde la parte superior de la probeta hasta la ampollita.
- Se utilizó un vino tinto orgánico Santa Emiliana, donde sus referencias señalaban que era orgánico, ya que los vino disponen de diversos químicos que pueden alterar el ensayo.
- Con gotario se dispersó 15ml de vino tinto sobre la superficie de la probeta, en un estado oscuridad durante 5 horas.
- Para finalizar se encendió la ampollita y se midieron en un periodo de 72 horas, donde se capturaron fotografías a las 0, 24 , 48 y 72 horas la degradación de sus áreas (ver Fig.5.17 y 5.18)

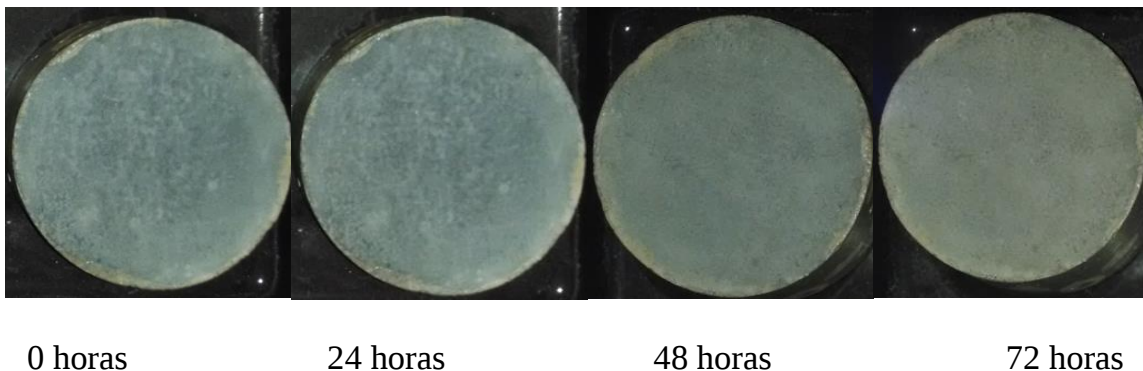


Fig.5.16: Degradación de tinte orgánico mortero patrón.



0 horas

24 horas

48 horas

72 horas

Fig.5.17: Degradación de tinte orgánico mortero con 5% de adición TiO_2 .

Se logró demostrar a través de las fotografías la degradación del tinte orgánico (vino), donde se logra una recuperación del color mismo del mortero de cemento, aunque es un proceso largo, claramente muestra una mejora del punto vista estético, donde se puede lograr un gran acabado de un muro revestimiento tanto de exterior como uno interior, en cambio el mortero patrón ya transcurrida el período de 48 a 72 horas no demuestra un cambio favorecedor, el tinte sigue en la superficie de este, incluso tiende a colocarse de un tono más opaco.

Esto demuestra que el mortero obtiene una durabilidad estética, logrando mantener el color original, donde la arquitectura de una casa, edificio o cualquier tipo de construcción se puede beneficiar de estas características, ya que proporciona superficies con estéticas inalterables por los agentes atmosféricos, generando buena impresión al entorno y al mercado en sí.

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

6.1 Conclusión

Dentro de los objetivos que se plantearon al iniciar la investigación para poder comprobar si este material tiene algún efecto en la durabilidad de los materiales cementicios, particularmente para el caso de mortero de cemento para revestimiento exterior, se realizaron diversos estudios de tipo destructivo y no destructivo, donde se puede concluir que:

- Al incorporar un mayor porcentaje de dióxido de titanio a la mezcla, respecto al peso del cemento, esto es la combinación de agregados (árido fino), cemento, agua y TiO_2 , resulta una mezcla de mortero en estado más seco, es decir, pierde trabajabilidad a mayor incorporación de TiO_2 , por lo que se recomienda el uso de plastificante para obtener una mezcla más plástica y en un estado más trabajable.
- Las resistencia a la compresión, no varía sensiblemente, obteniéndose una disminución máxima de un 6% con respecto al patrón, de acuerdo a los requisitos que estima la NCh 2256 Of. 2013, este se encuentra dentro los rangos de resistencia para un revestimiento a la intemperie. Esto resulta muy relevante para aprovechar las propiedades fotocatalítica del TiO_2 , el material debe estar expuesto a luz solar.
- En referencia a los estudios de permeabilidad al agua, podemos concluir que no se observan grandes diferencias debido a que esta propiedad depende principalmente de la relación agua/cemento y la cantidad de aire incorporado como primer factor en vez de la cantidad de TiO_2 , para respaldar esta hipótesis se realizaron ensayos de absorción capilar y permeabilidad al aire. En el ensayo de absorción capilar, la superficie en un mortero obtendrá una mayor absorción de agua según el tiempo transcurrido directamente en función a una cantidad mayor de TiO_2 , este problema surge debido a que el pigmento al tener las propiedades de ser higroscópico e hidrofílico, capta el agua en el ambiente o en el medio acuoso, pero también ayuda a limpiar la superficie logrando adquirir una mayor capacidad fotocatalítica. El problema que radica en este material en su proceso de fotocatalisis, es la oxidación de los mismos compuestos, estos al ser oxidados se descomponen en iones, en esta investigación usamos el óxido de nitrógeno, este tipo de gas son degradados a iones de nitrato, conocido como ácidos nítricos quedan depositados en la capa expuesta a la luz solar, como la pasta de cemento hidratada tiene un carácter alcalino, producido fundamentalmente por la portlandita o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ generada en la hidratación de los silicatos, puede ser atacada por los ácidos dando las sales cálcicas correspondientes, aunque la mayoría de estos compuesto son solubles en agua, y como el pigmento es higroscópico logran ser lavados por un medio acuoso, dados estos aspectos se lograría un incremento de

porosidad en el material por los mismos iones. En el ensayo de permeabilidad al aire, las probetas se encuentran dentro de los rangos normales, solo generaba un incremento de sus poros, al adicionarle la nanopartícula a la mezcla, las razones se daba por la tendencia del pigmento a generar una especie de aglutinamiento entre sí, por mucho que el pigmento sea zurcido por una malla y sea distribuida paulatinamente en la betonera, se logró observar que en el ciclo de mezclado, que el pigmento buscaba adherirse como primera opción así mismo, dificultando la homogeneidad de la mezcla, quiere decir que el TiO_2 lograba formar masas relativamente pequeñas en la mezcla, logrando una mayor interconexión entre sus poros y porosidades de mayor tamaño, aunque el equipo Torrent entregaba aun así, resultados apropiados en los tres especímenes a prueba, para exposiciones a la intemperie. Para poder disminuir esta adherencia entre sus partículas, se debe pasar la nanopartícula por la malla N°200 o superior y se debe distribuir paulatinamente a la mezcla.

- Uno de los beneficios más característicos de este pigmento es la capacidad de degradar sustancias de polución atmosférica. Dentro del estudio, el gas utilizado fue el óxido de nitrógeno, que es la combinación química entre nitrógeno y oxígeno, los resultados muestran una importante capacidad fotocatalítica, el nivel de degradación que se alcanzó es casi de un 21% de reducción de NO_x . Cabe señalar que estos valores son solamente estimativos, ya que este dependerá de otros factores, como por ejemplo, de la cantidad de NO_x en un m^3 , la disposición u orientación del viento y la degradación de otras sustancias en el ambiente (SO_x , PM, etc).

En Chile estos tipos de materiales no son utilizados, pero si en países desarrollados, en donde su índice de contaminación es extremadamente alto, esto dependerá principalmente de la población y producción de materias primas en la nación, como por ejemplo, China, Alemania y EEUU sus índices de producción y gente son de mayor envergadura, el consumo de energías, el incremento de vehículos en la ciudad y la explotación de recursos incrementa la liberación de gases nocivos al ecosistema, como todo recurso es escaso, nuestra atmósfera, también es un recurso, aquellos países ya están desarrollando técnicas para revertir la gran problemática global generada. Sin embargo, Chile puede progresar a estándares de países líderes en innovación, sabemos que es un camino largo y lejano, pero mientras no se comience a recorrer, difícilmente podremos acortar la brecha. Las herramientas necesarias para comenzar, están a disposición de cualquier país o persona, sólo se necesita un cambio de actitud y pensamiento en los distintos sectores de la construcción.

6.2

Futuras investigaciones

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, tanto en la etapa preliminar como en la profundización con el componente TiO_2 , queda demostrado el potencial que tienen estas nanopartículas para constituirse en materiales con matrices cementicias con capacidades de auto-limpieza con respecto a los gases expuestos en el ambiente, lo cual justifica la motivación por seguir profundizando su estudio.

Quedan así planteadas varias líneas de investigación referentes a los materiales auto-limpiantes sobre los que solamente se realizó un análisis preliminar de su durabilidad.

En ellos ha quedado pendiente todo lo referente a la determinación de descontaminación de otras partículas (SO_x , PM), y definir para qué elementos constructivos presentan el mejor desempeño.

Es prioritario realizar también estudios de resistencia a largo plazo previendo las futuras condiciones de elaboración, evaluando la influencia de la temperatura ambiente en las distintas épocas del año, de la temperatura de ambiente controlado o a altas temperaturas. También se recomienda ensayo en saturación de estos materiales en ácidos nítricos y de azufre para entender con más exactitud las reacciones que lograrían a largo plazo en distintos materiales.

Se debe considerar el ensayo en bacterias y endoesporas, también queda en duda que tipos de bacterias son eliminadas en el proceso y las capacidades de eliminación, sería prudente realizar ensayo con diferentes bacterias típicas encontradas en el ambiente y que estas tuvieran como primera reacción algún deterioro a los materiales de construcción.

En cuanto a la aplicación de estos materiales compuestos, también se deberá realizar el estudio de su aplicación en elementos constructivos con ensayos a escala de uso: paneles de revestimiento interior y/o exterior, elementos de cubierta, elementos estructurales con requerimientos de absorción de energía como pueden ser aquellos sometidos a fenómenos naturales.

También es prudente realizar ensayos con distintos tipos de nanopartículas, ya que existe una gama de pigmento dentro del mercado con diferentes precios y poder fotocatalítico.

Referencias

- Andrade, J. A. Jr., Costa, U. M. S., Almeida, M. P., Makse, H. A. and Stanley, H. E.: (1998), *Inertial effects on fluid flow through disordered porous media*, Vol.82, no. 26, pp.5249–5252.
- Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Marotta R (1999). “*Advanced Oxidation Processes (AOP) for Water Purification and Recovery*”. *Catalysis Today*, vol. 53, no. 1, pp 51-59.
- Blake D. (2001). “*Photocatalytic Removal of Hazardous Compounds from Water and Air Update Number 4*”, pp. 1- 273.
- Campbell A. y Roper H. (1991). *Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair*. Essex: Longman Scientific and Technical, pp. 1-410.
- Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G.L., Amadelli, R., (2003). *White cement for architectural concrete, possessing Photocatalytic properties*, pp. 1-160.
- Castro Borges, P. Torres-Acosta, A. Balancán-Zapata, M, López-González, (1995-1997). “*Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado*”. *Revista Construcción y Tecnología*. 8 (87) pp. 28-33; 8 (89) pp. 17-24; 8 (95) pp.6-15; 9 (99) pp. 6-11; 9 (104) pp.16-20; 9 (197) pp.6-10; 10 (113) pp.22-27.
- Chen, J., Poon, C. (2009). “*Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications.Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis*”, vol.19, no. 44, pp. 1899-1906.
- Fernandez Canovas M., (1994). *Ets de Ingenieros de caminhos*, pp. 1-400.
- Fujishima A. y Honda K., (1972). “*Electrochemical Photolysis of water at a semiconductor electrode*,” *Nature*, vol. 238, no. 5358, pp. 37–38.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., Watanabe, T. (1999). *TiO₂ Photocatalysis – Fundamentals and Applications*. BKC Inc, Tokyo, pp. 1-166.
- Grupo Español del Hormigón Durabilidad de estructuras de hormigón, guía de diseño CEB, (1993). Editorial del colegio de Ingenieros de Caminos y Puertos, Madrid, España, pp. 1-164.
- Guillard C., Disdier J., Herrmann J.M., Lehaut C., Chopin T., Malato S., Blanco J , (1999). “*Comparison of Various Titania Samples of Industrial Origin in the Solar*

Photocatalytic Detoxification of Water Containing 4-ChloroPhenol". *Catalysis Today*, vol. 54, no. 1, pp. 217-228.

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi W. Y., and Bahnemann, D. W., Howard, A. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl. Microbiol. Biotechnology*. Vol. 95, no.1, pp.69–96.

Hussain A. y Serpone N., *Langmuir*, (1989). Vol. 5, no. 1, pp.250-255.

Itoh, S., (2011), "Permeability of a Densely Packed Bed of Solids", pp. 1-33.

J. G. Cabrera y C. plowman (1980): "The influence of pulverized fuel ash on the early and long term strength of concrete". 7." *Congres International de la Chimie des Ciments*. Vol. 2, no. 84, pp. 102-133.

Kaneko M., Okura I., (2002), *Photocatalysis: Science and Technology*, Springer, pp. 1-356.

Lawryk, N.J., Wiesel, C.P. (1996). *Environ. Sci. Technology*. Vol. 30, no. 3, pp. 810-816.

Linsebigier, G. Lu and J. T: Yates, (1995). *Photocatalysis on TiO₂ Surfaces*, *Chemical Reviews*, Vol. 95, no.1 , pp. 735-758.

M. Faraldos,, A Bahamonde, A iglesias, J Carbajo, G Rovito, D Almazám ,(2012). *Guía práctica de la fotocátalisis aplicada a infraestructura urbana*, pp. 1-77.

Maier, W., Nilsson, C.G., Holzer, M., Lind, J., Rosenbom, K., (2005). Photocatalytic plaster for indoor air purification. In: *Proceedings of 1st National Congress on Construction Mortars*, Vol. 83, no. 10, pp. 1652-1704.

Maury, N. De Belie, (2010), *State of the art of TiO₂ containing cementitious materials: self-cleaning properties*, Vol. 60, no. 298, pp.33-50.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte MOP. (1989). *Durabilidad del Hormigón: Estudio sobre medida y control de su permeabilidad*. Editorial Secretaria General técnica, Santiago de Chile.

Montoya, P. Hormigón Armado. (1979), Editorial Gustavo Gili, Barcelona, España, pp.1-630.

Negishi, N., et al. (1995) Preparation of transparent TiO₂ thin film photocatalyst and its photocatalytic activity, Vol. 24, no. 9, pp. 841-842.

Neville A., (2010). *Concrete Technology*, Second edition, pp. 1-460.

Paz, Y., Luo, Z., Rabenberg, L., Heller, A., (1995). Photooxidative selfcleaning transparent titanium dioxide films on glass. *Journal of Materials Research*, Vol. 10, no. 1, pp. 2842-2848.

Prousek J. (1996). "Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. Photochemical Processes", Vol. 90, no. 1, pp. 307-315.

Romeas. V. et al, (1999) Self-cleaning properties of TiO₂-coated glass: Degradation under simulated solar light of palmitic (hexadecanoic) acid and fluoranthene layers deposited on the glass surface, Vol. 4, no. 9, pp. 247-252.

Samsonov G.V., Ed. (1982), *The oxide Handbook*, IFI/ Plenum, New York, pp. 1-213.
Serpone N., (1995). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 38, no. 1, pp. 369-379.

Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, SINCA, (2013). *Bases generales de medio ambiente*, Santiago, Chile, pp. 1 -296.

Swamy V, Gale J, Dubrovinsky L. Atomistic simulation of the crystal structures and bulk modull of TiO₂ polymorPhs. *J.Phys. Chem. Solids*, 2001. Vol. 62, no. 5, pp. 887-895.

T. Yuronova (2007). Photocatalytic discoloration of organic compounds on outdoor building cement panels modified by photoactive coatings. Vol. 122, no. 2, pp 109-117.

Telford T., (1992). "Durable Concrete Structures: CEB Design Guide", pp. 1-112.

Tompkins, et al, (1995), Evaluation of photocatalysis for gas-phase air cleaning, *ASHRAE TRANS*, Vol. 3, no. 2, pp. 60-84.

Valenta, O. *Durability of Concrete*. (1968). *International Syposium on the Chemistry of cement*, Tokyo, Vol. 3, no. 1, pp. 1-32.

Zabaleta, H. (1988) *Compendio de tecnología del Hormigón*. Editorial del instituto chileno del cemento y del hormigón. Santiago de chile, pp. 1-27.

ANEXOS

Anexo 1: Granulometría del árido

Abertura Nominal (mm)	Malla ASTM (pulgada)	% que pasa
10	3/8	100
5	8	97
2,5	4	82
1,25	16	63
0,63	30	49
0,315	50	25
0,16	100	7
	Módulo de finura	2,77

Características físicas del árido

Densidad Real superficialmente saturada	2754,8	Kg/m ³
Densidad Neta	2825,2	Kg/m ³
Absorción de agua	1,4	%
Densidad Aparente compactada	1,74	Kg/m ³
Densidad aparente suelta	1,63	Kg/m ³

Anexo 2: Datos de resistencia ensayados a los 7, 14 y 28 Días

	Probeta	7 Días		14 Días		28 Días	
Patrón	Rc0-1	18,13	17,99	20,22	20,1	26,77	26,48
	Rc0-2	18,22	18,3	21,56	21,23	24,23	24,8
	Rc0-3	17,56	17,98	19,86	20,03	24,84	24,99
	Promedio	18,03		20,5		25,35	
2%	Rc2-1	17,22	17,65	20,11	20,27	24,98	24,13
	Rc2-2	18,01	18,21	20	20,48	25,77	26,19
	Rc2-3	17,78	17,63	20,21	20,5	23,52	23,88
	Promedio	17,75		20,26		24,75	
5%	Rc5-1	17,11	16,65	19,88	19,06	24,41	23,76
	Rc5-2	16,68	17,3	20,39	20,01	22,57	23,17
	Rc5-3	17,47	18,53	21,07	20,43	24,84	25,49
	Promedio	17,29		20,14		24,04	

Anexo 3: Datos de absorción ensayados a los 28 Días

	Patrón			2%			5%		
T	Ca ₀ -1 (Gr)	Ca ₀ -2 (Gr)	Ca ₀ -3 (Gr)	Ca ₂ -1 (Gr)	Ca ₂ -2 (Gr)	Ca ₂ -3 (Gr)	Ca ₅ -1 (Gr)	Ca ₅ -2 (Gr)	Ca ₅ -3 (Gr)
0:00	936	892	929	956	933	954	975	959	967
0:05	943	895	932	963	940	961	983	968	975
0:15	945	896	933	963	942	962	985	969	976
0:30	945	897	933	963	942	962	986	970	976
1:00	946	897	934	965	943	963	986	971	977
2:00	947	899	934	966	945	964	987	972	978
3:00	947	899	934	967	945	964	988	973	979
4:00	948	900	935	967	945	965	990	974	979
5:00	949	900	936	967	946	965	988	974	979
6:00	949	900	936	968	946	966	989	974	981
12:00	950	902	938	970	949	968	993	977	985
24:00	953	905	940	975	955	969	995	979	989

	Patrón			2%			5%		
T	Ca ₀ -1 (Gr/cm ²)	Ca ₀ -2 (Gr/cm ²)	Ca ₀ -3 (Gr/cm ²)	Ca ₂ -1 (Gr/cm ²)	Ca ₂ -2 (Gr/cm ²)	Ca ₂ -3 (Gr/cm ²)	Ca ₅ -1 (Gr/cm ²)	Ca ₅ -2 (Gr/cm ²)	Ca ₅ -3 (Gr/cm ²)
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:05	404,414	173,300	173,330	404,414	404,367	404,437	462,187	519,901	462,214
0:15	519,961	231,067	231,107	404,414	519,901	462,214	577,734	577,667	519,991
0:30	519,961	288,834	231,107	404,414	519,901	462,214	635,508	635,434	519,991
1:00	577,734	288,834	288,884	519,961	577,667	519,991	635,508	693,201	577,768
2:00	635,508	404,367	288,884	577,734	693,201	577,768	693,281	750,968	635,544
3:00	635,508	404,367	288,884	635,508	693,201	577,768	751,054	808,734	693,321
4:00	693,281	462,134	346,661	635,508	693,201	635,544	866,601	866,501	693,321
5:00	751,054	462,134	404,437	635,508	750,968	635,544	751,054	866,501	693,321
6:00	751,054	462,134	404,437	693,281	750,968	693,321	808,828	866,501	808,875
12:00	808,828	577,667	519,991	808,828	924,268	808,875	1039,921	1039,801	1039,982
24:00	982,148	750,968	635,544	1097,695	1270,868	866,651	1155,468	1155,335	1271,089

T(sg ^{1/2})	Patrón (Gr/cm ²)	2% (Gr/cm ²)	5% (Gr/cm ²)
17	250,35	404,41	481,43
30	327,38	462,18	558,46
42	346,63	462,18	596,98
60	385,15	539,21	635,49
85	442,92	616,23	693,26
104	442,92	635,49	751,04
120	500,69	654,75	808,81
134	539,21	674,01	770,29
147	539,21	712,52	828,07
208	635,50	847,32	1039,90
294	789,55	1078,40	1193,96

Anexo 4: Datos de absorción ensayados a los 56 Días

	Patrón			2%			5%		
T	Ca0-1 (Gr)	Ca0-2 (Gr)	Ca0-3 (Gr)	Ca2-1 (Gr)	Ca2-2 (Gr)	Ca2-3 (Gr)	Ca5-1 (Gr)	Ca5-2 (Gr)	Ca5-3 (Gr)
0:00	936	892	929	956	933	954	975	959	967
0:05	941	892	930	958	938	958	981	963	972
0:15	942	892	930	958	938	959	982	965	972
0:30	942	893	930	959	939	959	984	965	972
1:00	942	893	930	960	941	959	985	966	972
2:00	944	894	930	961	942	960	986	967	972
3:00	944	894	930	962	942	961	986	968	973
4:00	945	894	930	963	943	961	987	969	974
5:00	944	894	931	964	943	961	988	969	974
6:00	944	894	932	965	944	961	988	971	975
12:00	946	896	932	968	945	963	992	972	977
24:00	948	897	934	970	949	965	994	977	978

	Patrón			2%			5%		
T	Ca0-1 (Gr/cm ²)	Ca0-2 (Gr/cm ²)	Ca0-3 (Gr/cm ²)	Ca2-1 (Gr/cm ²)	Ca2-2 (Gr/cm ²)	Ca2-3 (Gr/cm ²)	Ca5-1 (Gr/cm ²)	Ca5-2 (Gr/cm ²)	Ca5-3 (Gr/cm ²)
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:05	288,867	0,000	57,777	115,547	288,834	231,107	346,640	231,067	288,884
0:15	346,640	0,000	57,777	115,547	288,834	288,884	404,414	346,600	288,884
0:30	346,640	57,767	57,777	173,320	346,600	288,884	519,961	346,600	288,884
1:00	346,640	57,767	57,777	231,094	462,134	288,884	577,734	404,367	288,884
2:00	462,187	115,533	57,777	288,867	519,901	346,661	635,508	462,134	288,884
3:00	462,187	115,533	57,777	346,640	519,901	404,437	635,508	519,901	346,661
4:00	519,961	115,533	57,777	404,414	577,667	404,437	693,281	577,667	404,437
5:00	462,187	115,533	115,554	462,187	577,667	404,437	751,054	577,667	404,437
6:00	462,187	115,533	173,330	519,961	635,434	404,437	751,054	693,201	462,214
12:00	577,734	231,067	173,330	693,281	693,201	519,991	982,148	750,968	577,768
24:00	693,281	288,834	288,884	808,828	924,268	635,544	1097,695	1039,801	635,544

T(sg ^{1/2})	Patrón (Gr/cm ²)	2% (Gr/cm ²)	5% (Gr/cm ²)
17	115,55	231,09	308,12
30	115,55	250,35	346,63
42	134,81	269,60	385,15
60	154,06	327,37	423,66
85	173,32	385,14	462,18
104	211,83	423,66	500,69
120	231,09	462,17	558,46
134	231,09	481,43	577,72
147	250,35	519,94	635,49
208	327,38	635,49	770,29
294	423,67	789,55	924,35

Anexo 5: Datos de absorción ensayados a los 90 Días

T	Patrón			2%			5%		
	Ca0-1 (Gr)	Ca0-2 (Gr)	Ca0-3 (Gr)	Ca2-1 (Gr)	Ca2-2 (Gr)	Ca2-3 (Gr)	Ca5-1 (Gr)	Ca5-2 (Gr)	Ca5-3 (Gr)
0:00	936	892	929	956	933	954	975	959	967
0:05	941	892	930	958	938	959	982	964	971
0:15	941	892	930	959	938	959	982	965	972
0:30	942	892	930	959	939	959	984	965	972
1:00	942	893	930	960	941	959	985	966	972
2:00	943	893	930	961	942	960	986	967	972
3:00	944	894	930	962	942	961	986	968	973
4:00	945	894	930	963	943	961	987	969	974
5:00	944	894	931	964	943	961	988	969	974
6:00	944	894	932	965	944	961	988	971	975
12:00	946	896	932	968	945	963	992	972	977
24:00	948	897	934	970	949	965	994	977	978

		Patrón			2%			5%	
T	Ca0-1 (Gr/cm ²)	Ca0-2 (Gr/cm ²)	Ca0-3 (Gr/cm ²)	Ca2-1 (Gr/cm ²)	Ca2-2 (Gr/cm ²)	Ca2-3 (Gr/cm ²)	Ca5-1 (Gr/cm ²)	Ca5-2 (Gr/cm ²)	Ca5-3 (Gr/cm ²)
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:05	288,867	0,000	57,777	115,547	288,834	288,884	404,414	288,834	231,107
0:15	288,867	0,000	57,777	173,320	288,834	288,884	404,414	346,600	288,884
0:30	346,640	0,000	57,777	173,320	346,600	288,884	519,961	346,600	288,884
1:00	346,640	57,767	57,777	231,094	462,134	288,884	577,734	404,367	288,884
2:00	404,414	57,767	57,777	288,867	519,901	346,661	635,508	462,134	288,884
3:00	462,187	115,533	57,777	346,640	519,901	404,437	635,508	519,901	346,661
4:00	519,961	115,533	57,777	404,414	577,667	404,437	693,281	577,667	404,437
5:00	462,187	115,533	115,554	462,187	577,667	404,437	751,054	577,667	404,437
6:00	462,187	115,533	173,330	519,961	635,434	404,437	751,054	693,201	462,214
12:00	577,734	231,067	173,330	693,281	693,201	519,991	982,148	750,968	577,768
24:00	693,281	288,834	288,884	808,828	924,268	635,544	1097,695	1039,801	635,544

T(sg ^{1/2})	Patrón (Gr/cm ²)	2% (Gr/cm ²)	5% (Gr/cm ²)
17	115,55	211,83	288,86
30	134,81	231,09	346,63
42	154,06	269,60	385,15
60	154,06	327,37	423,66
85	211,83	385,14	462,18
104	211,83	423,66	500,69
120	231,09	462,17	558,46
134	231,09	481,43	577,72
147	250,35	519,94	635,49
208	327,38	635,49	770,29
294	423,67	789,55	924,35

Anexo 6: Datos de permeabilidad al agua 28 y 56 días.

Mortero	Penetración máxima 28 días (mm)	Promedio	Penetración máxima 56 días (mm)	Promedio
P ₀ -1	46,30	49,13	49,70	49,50
P ₀ -2	51,10		48,20	
P ₀ -3	50,00		50,60	
P ₂ -1	50,40	50,17	49,00	49,63
P ₂ -2	50,50		49,50	
P ₂ -3	49,60		50,40	
P ₅ -1	51,50	50,73	50,80	50,83
P ₅ -2	50,30		50,40	
P ₅ -3	50,40		51,30	

Anexo 7: Datos de permeabilidad al aire 90 días.

ENSAYO A LOS 28 DIAS				
Probetas	sección	λkT (10^{-16} m ²)	L	Permeabilidad
PA ₀ -1	A	<0,001	<5	Muy baja
PA ₀ -1	B	0,0084	<5	Muy baja
PA ₀ -2	A	0,015	6	Baja
PA ₀ -2	B	0,0039	<5	Muy baja
PA ₀ -3	A	0,0034	<5	Muy baja
PA ₀ -3	B	0,0014	<5	Muy baja
PA ₂ -1	A	0,0014	<5	Muy baja
PA ₂ -1	B	0,001	<5	Muy baja
PA ₂ -2	A	0,018	<5	Baja
PA ₂ -2	B	0,0056	<5	Muy baja
PA ₂ -3	A	0,021	<5	Baja
PA ₂ -3	B	0,026	<5	Baja
PA ₅ -1	A	0,022	10	Baja
PA ₅ -1	B	0,021	10	Baja
PA ₅ -2	A	0,027	11	Baja
PA ₅ -2	B	0,025	11	Baja
PA ₅ -3	A	0,027	11	Baja
PA ₅ -3	B	0,032	12	Baja

Anexo 8: Datos de reducción de NO_x

tiempo (min)	NO _x (ppb) patrón	NO _x (ppb) 5% TiO ₂ en la mezcla	NO _x (ppb) 2% TiO ₂ en la mezcla
0:00:00	0	0	0
0:30:00	967,4	956,11	978,6
1:00:00	945,1	754,31	861,17
1:30:00	944,9	753,23	861
2:00:00	944,9	753,11	860,58
2:30:00	944,8	752,2	860,58
3:00:00	944,8	752	860,57
3:30:00	944,9	752,1	860,55
4:00:00	944,8	752,3	860,55
4:30:00	944,9	752,1	860,55
5:00:00	944,9	752,1	860,54
5:30:00	944,8	860,55	860,54
6:00:00	0	0	0